

I contributi delle neuroscienze cognitive alla ridefinizione delle basi neurali del linguaggio

Andrea Marini

Laboratorio di neuroscienze cognitive, Università di Udine

Questo articolo mira a descrivere i contributi delle neuroscienze cognitive alla comprensione delle basi neurali e cognitive della produzione del linguaggio. In particolare, è idealmente suddiviso in due parti. Nella prima, dopo aver accennato brevemente ad alcune delle più antiche osservazioni sulla possibile relazione tra lesioni cerebrali e disturbi del linguaggio, vengono introdotte le caratteristiche generali dei modelli localizzazionisti della seconda metà del XIX (Testut 1897) e del XX secolo (Geschwind 1965a, b). Nella seconda parte dell'articolo ci si concentrerà sugli sviluppi emersi nell'ambito del recente approccio associazionista. Tale approccio sostiene che le funzioni della mente sarebbero semplicemente troppo complesse per essere elaborate da una manciata di aree isolate del cervello e, al contempo, troppo specifiche per essere organizzate nel cervello nella sua interezza (Marini 2018). In effetti, una quantità crescente di esperimenti con tecniche di neuroimaging e neuromodulazione (ad es., Marini & Urgesi 2012; Piervincenzi et al. 2013) ha dimostrato che le diverse funzioni della mente (incluso il linguaggio) sono implementate in ampie reti neurali con epicentri localizzabili in aree corticali, sottocorticali e cerebellari. Nello specifico, verrà fornito un esempio di rete neurale responsabile della produzione del discorso narrativo (Levelt et al. 1999; Indefrey 2012). Infine, l'attenzione si focalizzerà sull'utilità della comprensione dei correlati neurali del linguaggio per la riabilitazione (ad es., Marangolo et al. 2013).

Keywords: Neurolinguistica; modello associazionista; sistemi di elaborazione del linguaggio

1. Introduzione

Il linguaggio è il prodotto di una complessa funzione cognitiva organizzata in un'articolata rete neurale (Catani & Bambini 2014; Marini 2018; Friederici et al. 2017). L'interesse per i rapporti tra le strutture del cervello e i prodotti di quella che oggi chiamiamo mente (ad esempio, il linguaggio, la memoria, etc...) è molto antico. Si pensi al ritrovamento di una serie di tavolette babilonesi scritte in caratteri cuneiformi e risalenti al 1.800 a.C. circa (Reynolds & Wilson, 2014) in

cui vengono riportati casi clinici caratterizzati da una grande varietà di disturbi neurologici (ad esempio dovuti a ictus o epilessia) e psichiatrici (ad esempio, fobie, disturbi ossessivo-compulsivi, disturbi d'ansia, etc.). In relazione al linguaggio, particolare interesse riveste il Papiro Chirurgico ritrovato a Luxor in Egitto e risalente al 1.700 a.C. circa in cui vengono descritti 27 casi clinici che avevano subito un trauma cranico (Breasted 1930). L'aspetto interessante di questo antico documento risiede nel fatto che di ciascun paziente veniva riportato il sintomo principale. In seguito alla lesione cerebrale, alcuni avevano perso la memoria, altri la capacità di andare a cavallo in quanto emiplegici. Uno di questi pazienti (il Caso 22) vi veniva descritto come "muto nella sua tristezza", ovvero non più in grado di parlare (Stiefel et al. 2006). Oggi si parlerebbe di afasia non fluente con quadro depressivo (Marini 2016). È evidente che descrizioni di questo tipo, anche se puramente aneddotiche e non basate su sistematiche osservazioni neuropsicologiche, implicano una idea fondamentale e cioè che le funzioni della mente (a quei tempi ci si riferiva all'anima) venissero implementate nel cervello e non in altre parti del corpo. Serpeggiava inoltre un'altra idea cruciale: lesioni in punti diversi del cervello condurrebbero alla perdita di abilità differenti.

Nel corso dei secoli, osservazioni di questo tipo si sono accumulate portando alla formulazione di ipotesi sulla natura delle possibili relazioni tra il cervello e i suoi prodotti cognitivi. Nonostante ciò, è solo dalla seconda metà del XIX secolo che, di fatto, si può parlare di un approccio scientifico alla questione. Il presente contributo mira a fornire una panoramica dei modelli sviluppati nel corso degli ultimi 170 anni per descrivere i complessi rapporti tra strutture del cervello e uno dei prodotti più notevoli della nostra attività cognitiva: la capacità di produrre e comprendere il linguaggio.

2. Caratteristiche e limiti dei modelli neuropsicologici tradizionali del linguaggio

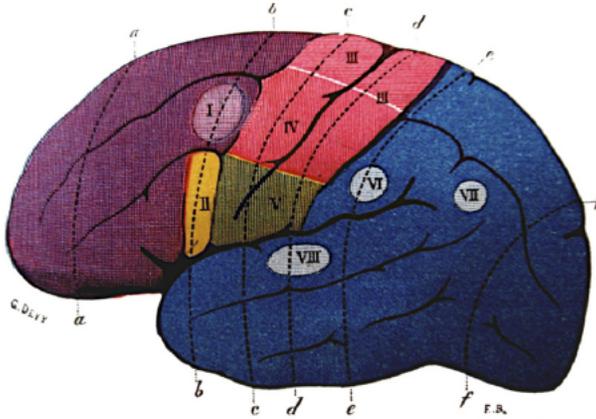


Figura 1. Organizzazione anatomico-funzionale del linguaggio sulla superficie corticale dell'emisfero sinistro secondo i localizzazionisti di fine '800 (modificata da Testut 1897). Area I: Centro di Exner (scrittura); Area II: Area di Broca (eloquio); Area III: Aree motorie (anteriori) e somatosensoriali (posteriori) implicate nel movimento e nella percezione degli arti inferiori; Area IV: Aree motorie (anteriori) e somatosensoriali (posteriori) implicate nel movimento e nella percezione degli arti superiori e delle mani; Area V: Aree motorie (anteriori) e somatosensoriali (posteriori) implicate nel movimento e nella percezione della bocca e dell'apparato fono-articolatorio; Aree VI (giro sopramarginale) e VII (giro angolare) nel lobo parietale inferiore: Centro di Dejerine, oggi noto come Territorio di Geschwind (lettura); Area VIII: Area di Wernicke (ascolto)

Nella seconda metà del XX secolo i modelli localizzazionisti vennero riformulati ad opera del neuroanatomico comparato Norman Geschwind (1965a, b; 1970) nel Modello Wernicke-Geschwind dell'elaborazione del linguaggio secondo cui la produzione della parola richiederebbe l'integrità dell'area di Broca e la sua comprensione quella dell'area di Wernicke (cfr. Figura 2). Nel caso specifico della produzione di una parola, secondo questo modello tutto inizierebbe con una preliminare fase in cui verrebbe generato il concetto da produrre grazie ad una struttura associativa nel lobo parietale inferiore dell'emisfero sinistro (il Territorio di Geschwind). In seguito, questo concetto verrebbe inviato attraverso il fascicolo arcuato all'area di Broca che gestirebbe le informazioni fonologico-articolatorie delle parole. Infine, lo schema fonologico-articolatorio della parola da produrre verrebbe inviato ad una parte della corteccia motoria primaria che controlla i

movimenti del volto e dell'apparato fono-articolatorio per coordinare i movimenti che porteranno alla sua emissione. Nel caso della comprensione della parola, la sequenza acustica percepita verrebbe innanzitutto analizzata nella corteccia uditiva primaria nel giro temporale superiore dei due emisferi. A questo punto, riconosciute le frequenze dei suoni percepiti, l'informazione verrebbe inviata all'area di Wernicke dove verrebbe innescato un processo di ricerca degli schemi acustici relativi alle parole presenti in memoria. Trovata la sequenza corretta, questa informazione verrebbe fatta interagire con altre informazioni di varia natura (ad esempio, visiva, tattile, motoria, etc...) nel territorio di Geschwind nel lobo parietale inferiore sinistro per generare una rappresentazione concettuale del suo significato. Il modello Wernicke-Geschwind propone anche delle vie legate alla lettura e alla scrittura ma in questa sede non verranno riportate.

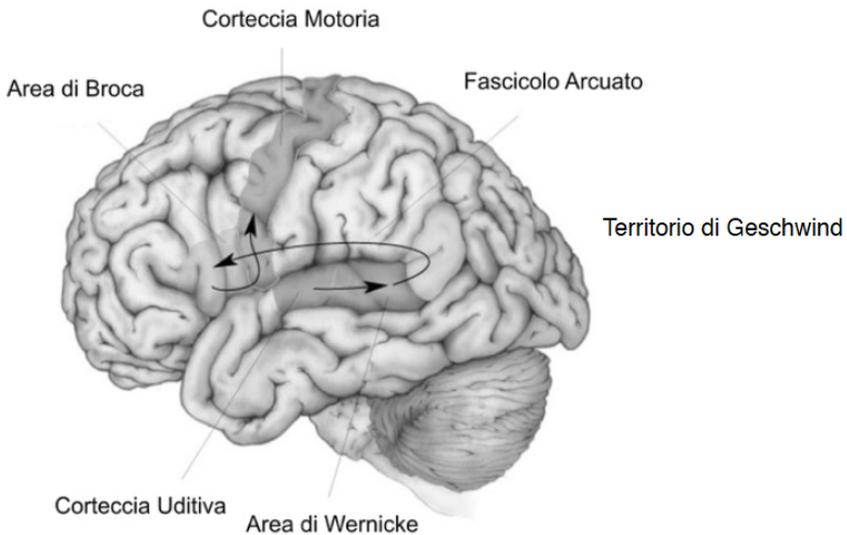


Figura 2. Schematizzazione del modello Wernicke-Geschwind. Modificata da Marini (2018)

Il Modello Wernicke-Geschwind, di fatto, rimase il modello di riferimento fino alla fine del secolo quando, con l'aumentare del numero di studi con tecniche di neuroimaging divenne sempre più chiaro che il linguaggio non può essere semplicemente implementato in una manciata di aree sulla superficie corticale dell'emisfero sinistro. In effetti, modelli come questo erano caratterizzati da diverse carenze. Innanzitutto, si basavano prevalentemente sull'osservazione di pazienti con lesioni cerebrali acquisite che avevano perso in parte o in toto le

proprie abilità linguistiche. Assumevano che la localizzazione dei sintomi implicasse la localizzazione della funzione: se più persone hanno perso una abilità specifica (ad es. la capacità di parlare) in seguito a una lesione focale (nel nostro esempio, l'area di Broca), allora l'area lesionata deve essere cruciale per quella specifica funzione anche nella popolazione generale. Un crescente numero di studi elettrofisiologici e di neuroimaging condotti negli ultimi 40 anni ha mostrato che questo assunto è semplicemente sbagliato. In effetti, già nel corso della prima metà del XX secolo secondo diversi neurologi non di rado ci poteva imbattersi in pazienti che, in seguito ad una lesione focale (per esempio nell'area di Broca) non presentavano i sintomi tipici del disturbo previsto dai modelli localizzazionisti (nel nostro esempio, l'incapacità di parlare in modo fluente). Inoltre, potevano essere osservati anche pazienti che presentavano quei sintomi ma avevano una lesione in una parte diversa del cervello. Come spiegare tutto ciò?

La spiegazione di questo fenomeno ci porta a mettere in evidenza il secondo problema insito nei modelli localizzazionisti tradizionali. Numerose indagini sperimentali hanno in effetti confermato che le abilità cognitive non sono il prodotto dell'elaborazione in una specifica area cerebrale in isolamento. Al contrario, le funzioni cognitive emergono dall'interazione tra più centri cerebrali collegati in ampie reti definite reti neurali. Di conseguenza, gli approcci localizzazionisti sono stati gradualmente sostituiti dai modelli associazionisti contemporanei. L'elaborazione cognitiva, ad inclusione del linguaggio, sarebbe implementata in ampie reti neurali con epicentri in aree corticali e sottocorticali di entrambi gli emisferi con l'inclusione anche delle strutture cerebellari (Catani et al. 2012a; Mesulam 1998). Quindi il linguaggio, lungi dall'essere organizzato in poche aree sulla corteccia dell'emisfero sinistro, sarebbe il risultato dell'elaborazione di un'ampia rete neurale con epicentri in aree corticali e sottocorticali in entrambi gli emisferi e in aree del cervelletto (e.g., Piervincenzi et al. 2016; Indefrey 2012; Vigneau et al. 2006).

Un terzo problema che si riscontra nei modelli localizzazionisti tradizionali riguarda la definizione stessa di cosa si intenda per "linguaggio". In effetti, per lungo tempo, i neurologi che formulavano i modelli fin qui descritti lo consideravano come un mero processo lessicale. Per esempio, il modello Wernicke-Geschwind descriveva unicamente aree corticali coinvolte nella comprensione e produzione di parole. Tuttavia, il linguaggio è molto più di questo. L'elaborazione linguistica si basa su una costante interazione tra abilità primariamente linguistiche e altre abilità cognitive. Le abilità primariamente linguistiche sono organizzate in una dimensione micro- ed una macroelaborativa del linguaggio (ad es., Marini et al. 2011). I processi microelaborativi permettono l'organizzazione di fonemi in sequenze morfologiche e parole e determinano il

contesto sintattico richiesto da ciascuna parola per la generazione di frasi sintatticamente ben formate. Quindi, i processi microelaborativi si basano su due sistemi di base: il primo richiesto per l'elaborazione lessicale, il secondo per quella grammaticale. L'elaborazione lessicale permette l'identificazione dei concetti lessicali, la selezione delle parole target nel lessico mentale e l'accesso alle loro informazioni morfosintattiche, morfologiche, fonologiche, sillabiche e fonetiche (Levelt, 1989). L'informazione morfosintattica associata alle parole selezionate è in seguito usata dal secondo sistema di base della dimensione microelaborativa del linguaggio, quello grammaticale, che rende possibile l'elaborazione di strutture gerarchiche generate da una operazione combinatoriale ricorsiva di base nota come Merge (Chomsky 1995). Per esempio, sulla base dell'assunto secondo cui gli articoli richiedono dei nomi e non altri articoli, la funzione Merge potrebbe generare il Sintagma Nominale "La macchina" assemblando insieme le parole [la] e [macchina]. Inoltre, questa sequenza potrebbe essere a sua volta fusa con un verbo per formare un Sintagma Verbale come in [[guarda] [la macchina]] che potrebbe essere nuovamente fuso con altre parole per andare a formare frasi via via più complesse (Friederici et al. 2017). Nel corso di una interazione comunicativa, i processi macrolinguistici permettono a loro volta la generazione/compressione di una intenzione comunicativa e la contestualizzazione dei significati veicolati attraverso i processi microlinguistici. Queste abilità sono collegate all'elaborazione pragmatica (ad es. Sperber & Wilson 2002; Levinson 1983). Ulteriori processi macroelaborativi includono l'elaborazione testuale/discorsiva che consiste nella capacità di organizzare le proposizioni veicolate dalle frasi mediante l'instaurazione di legami di coesione e coerenza fino a giungere alla generazione del modello mentale (Johnson-Laird 1983) o scenario (attraverso processi di costruzione di scenari; Buckner & Carrol 2007) della storia.

3. Un modello neurocognitivo della produzione del discorso

Come si è accennato nel § 2, la produzione di un discorso dotato di senso si basa su una complessa architettura cognitiva e neurale caratterizzata dalla costante interazione tra abilità cognitive e linguistiche. Innanzitutto, il parlante deve **gettare le fondamenta** su cui sviluppare la trama del discorso (Gernsbacher 1990) generando una intenzione comunicativa (ovvero quello che si vuole dire e lo scopo per cui lo si sta facendo) e organizzando la struttura concettuale dei contenuti che intende veicolare (generando il modello mentale o scenario cui si faceva riferimento alla fine del §2). In questa fase preliminare il linguaggio

interagisce con altre abilità cognitive: l'**attenzione**, che permette di mantenere le risorse cognitive incentrate sull'obiettivo comunicativo per periodi prolungati di tempo (attenzione sostenuta) ripartendole tra più fronti (attenzione divisa) e ignorando eventuali stimoli distraenti (attenzione selettiva); le **funzioni esecutive**, che permettono di pianificare quello che si deve ancora dire, monitorare se quello che si sta producendo o è stato prodotto sia conforme a quanto pianificato, aggiornare le informazioni da veicolare ed eventualmente inibire la produzione di enunciati irrilevanti, ripetuti o tangenziali rispetto al filo del discorso; la **memoria di lavoro fonologica** che permette di gestire momentaneamente le informazioni da produrre in attesa della loro effettiva emissione; la **memoria a lungo termine dichiarativa semantica**, che consente di associare ai concetti da veicolare le parole presenti nel proprio deposito lessicale (noto come lessico mentale); la **memoria a lungo termine dichiarativa episodica**, che permette di organizzare i concetti da veicolare basandosi su informazioni presenti in memoria (ad esempio, scripts, strutture delle storie, etc...) e organizzare la costruzione dello scenario da veicolare (ad es. Mozeiko *et al.* 2011; Marini *et al.* 2019; Ferretti *et al.* 2017). Inoltre, sempre in questa fase preliminare il locutore deve tenere in considerazione il contesto (quello che è stato già detto e le informazioni relative al momento e al luogo in cui l'interazione comunicativa stia avvenendo) e le aspettative degli interlocutori generando una serie di ipotesi su quello che verosimilmente già fanno o ancora non fanno, i loro obiettivi, le loro aspettative. Quest'ultima capacità viene chiamata **Teoria della Mente** (dall'ingl. *Theory of Mind*, ToM) ed è fondamentale dal momento che solo mettendosi nei panni altrui possiamo generare intenzioni comunicative pertinenti al contesto linguistico e situazionale, scegliere argomenti coerenti e sapere come presentarli in modo adeguato agli interlocutori. Sappiamo che questa fase preliminare della generazione del discorso richiede il coinvolgimento di numerose aree corticali e sottocorticali nei lobi frontali di entrambi gli emisferi cerebrali ad inclusione della corteccia orbitofrontale, del giro anteriore del cingolo, dell'area motoria supplementare e delle cortecce prefrontali dorsolaterali bilaterali (ad es. Hirschfeld *et al.* 2008). Si osservi che lesioni nel giro anteriore del cingolo e nell'area motoria supplementare portano in genere ad una ridotta propensione a parlare che caratterizza un disturbo noto come afasia transcorticale motoria. I pazienti affetti da questa sindrome non hanno problemi di pronuncia ed eloquio. In effetti, riescono a ripetere bene parole o frasi prodotte da altri. Tuttavia, spesso non riescono a iniziare a parlare in autonomia. Sono quindi pazienti non fluenti non per problemi di tipo articolatorio o di pianificazione fonologica (come nel caso dei pazienti affetti da afasia di Broca) ma a causa di una difficoltà nell'attivare il meccanismo di produzione linguistica (Devinsky *et al.* 1995).

D'altro canto, attivazioni nella corteccia prefrontale dorsolaterale bilaterale sono state implicate in numerose abilità che rientrano nel novero delle funzioni esecutive (Yuan e Raz 2014). Per esempio, pazienti con lesioni a queste aree nell'emisfero sinistro (Coelho *et al.* 2012) e destro (Marini 2012) possono presentare difficoltà nella pianificazione e nel monitoraggio dei contenuti dei loro discorsi. Sempre in questa fase preliminare di preparazione del discorso da produrre un ruolo molto importante è rivestito anche dalla capacità di generare una intenzione comunicativa. Secondo Catani & Bambini (2014) questa complessa abilità è verosimilmente implementata in epicentri in aree prefrontali coinvolte nei processi di mentalizzazione (Lombardo *et al.* 2010; van Overwalle 2009) e connesse all'area di Broca nel giro frontale inferiore sinistro attraverso un fascio di fibre di connessione (il tratto frontale obliquo; Catani *et al.* 2012b) che si estende fino ad aree frontali coinvolte nella generazione di una teoria della mente. È probabile che queste funzioni siano integrate anche da altri fascicoli come porzioni del corpo calloso che mette in connessione i due emisferi cerebrali (Mamiya *et al.*, 2018; Solso *et al.* 2016).

Una volta generata la struttura del discorso, il parlante dovrà organizzarla in sequenze che dovranno essere poi convertite in proposizioni e infine verbalizzate attraverso processi di preparazione concettuale, selezione lessicale, accesso lessicale e articolazione (Indefrey & Levelt 2000; cfr. Figura 3). La **fase di preparazione concettuale** permette di attivare nella memoria a lungo termine dichiarativa semantica il concetto lessicale che meglio si addica all'intenzione comunicativa del parlante. Per concetto lessicale si intende un concetto per cui sia disponibile una parola nel lessico mentale (Levelt 2001). Il concetto lessicale attivato innesca a sua volta un processo di **selezione lessicale** in cui viene ricercata la parola corrispondente al concetto lessicale attivato (Roelofs 1992). Nella fase di selezione lessicale la ricerca della parola avviene attraverso un meccanismo di attivazione della parola target e contestuale inibizione dei potenziali competitori semantici. Ad esempio, se è stato attivato il concetto lessicale MACCHINA l'idea di *macchina* conterrà al suo interno tratti semantici che saranno in comune con altri concetti lessicali (ad esempio CAMION). I tratti semantici contenuti in MACCHINA tenderanno ad abbassare le soglie di attivazione (e quindi a preattivare) non solo la parola target (*macchina*, appunto), ma anche le parole caratterizzate da uno o più tratti semantici in comune con *macchina*. Perché il processo di selezione lessicale vada a buon fine, occorre che solamente la parola target (*macchina*) si attivi e che gli eventuali competitori semantici (ad esempio *camion*) si inibiscano (ovvero alzino i propri livelli di attivazione prevenendo una loro errata selezione). Come si è osservato per la fase precedente, diverse funzioni cognitive svolgono un ruolo importantissimo anche nella fase di selezione

lessicale. Occorre, ad esempio, mantenere le risorse cognitive focalizzate sul processo di selezione della parola target (attenzione sostenuta) distribuendo le risorse cognitive disponibili tra i vari processi coinvolti contemporaneamente (attenzione divisa) e ignorando eventuali stimoli distraenti (attenzione selettiva). Occorre inoltre mantenere il concetto lessicale selezionato nella memoria di lavoro fonologica e monitorare il processo di selezione lessicale inibendo l'eventuale attivazione di parole errate. Impiegando compiti di lettura e di generazione lessicale, diversi studi di *neuroimaging* hanno mostrato che l'attivazione del concetto lessicale e la successiva fase di selezione lessicale richiedono il coinvolgimento di una rete che include parti del lobo temporale sinistro (il polo temporale oltre a porzioni anteriori del giro temporale inferiore e del giro fusiforme), del giro frontale inferiore sinistro (porzioni posteriori dell'area di Broca; il solco precentrale) e del cervelletto (ad es., De Zubicaray *et al.* 2006; Indefrey 2012). Si osservi, inoltre, che numerose evidenze neuropsicologiche suggeriscono che il lobo temporale sinistro contribuisca a mantenere attivo in memoria il concetto lessicale fino alla selezione della parola target (ad es. Damasio *et al.* 1996). Il giro frontale inferiore sinistro potrebbe inoltre contribuire a questa rete neurale grazie al suo ruolo nella memoria di lavoro fonologica e il suo potenziale coinvolgimento nel processo di selezione di parole informative, ovvero parole che siano adeguate da tutti i punti di vista (da quello fonologico e morfologico a quello semantico e pragmatico (Marini & Urgesi 2012; Mazzon *et al.* 2019). Infine, fondamentale in questa fase di selezione lessicale è il ruolo svolto da fascicoli come le porzioni anteriori del tratto frontale obliquo, del fascicolo fronto-occipitale inferiore e delle radiazioni talamiche anteriori (Corrivetti *et al.* 2019).

Una volta identificata la parola target occorre accedere a tutte le informazioni (morfosintattiche, morfologiche, fonologiche, sillabiche e fonetica) in essa contenute. La prima informazione a diventare disponibile è quella relativa alla sua categoria grammaticale e alle sue valenze morfosintattiche. In questo caso si parla di **accesso al lemma** della parola selezionata. Si osservi che le valenze morfosintattiche contenute nel lemma vengono utilizzate per innescare il processo di **codifica grammaticale** della frase che dovrà essere prodotta. In effetti, come notato nel §2, una volta attivato il lemma, le informazioni morfosintattiche in esso contenute interagiscono con la funzione *Merge* (Chomsky 1995) innescando la generazione della frase e la collocazione del lemma selezionato nella posizione corretta. Ovviamente, anche in questa fase diverse abilità cognitive svolgono un ruolo essenziale. Ad esempio, è grazie ai sistemi dell'attenzione sostenuta se riusciamo a mantenere le risorse cognitive focalizzate sulla costruzione della frase target mentre l'attenzione selettiva aiuta a evitare di elaborare informazioni

distraenti. Inoltre, l'attenzione divisa consente di distribuire le risorse disponibili sulle varie fasi del processo di produzione della frase. La memoria di lavoro fonologica mantiene attive le informazioni lessicali fino a quando è necessario durante la costruzione della frase mentre il *buffer* episodico, una componente della memoria di lavoro, fa altrettanto con le informazioni fornite dalle frasi precedenti per mantenere adeguati livelli di coesione linguistica e coerenza concettuale. Infine, la memoria a lungo termine dichiarativa semantica custodisce le informazioni morfosintattiche relative al lemma attivato mentre quella non dichiarativa procedurale consente di mettere in atto processi altamente automatizzati come la funzione *merge* che sfuggono al diretto controllo del parlante. Una recente metanalisi conferma il ruolo svolto in questo processo di accesso al lemma e di codifica grammaticale da una rete di aree fronto-temporali (Zaccarella *et al.* 2017). Nell'ambito di questa rete, la porzione posteriore del giro frontale inferiore sinistro (in particolare della *pars opercularis* nell'area di Broca) e del giro temporale superiore sinistro (area di Wernicke) sono interconnesse dal segmento lungo del fascicolo arcuato. In particolare, l'attività nella porzione posteriore del giro frontale inferiore sinistro è stata messa in relazione con la funzione *Merge* (Zaccarella & Friederici 2015), mentre le aree posteriori del giro temporale superiore sinistro sembrano coinvolte nella capacità di trasferire le informazioni morfosintattiche del lemma selezionato nelle strutture frasali generate nel giro frontale inferiore sinistro (den Ouden *et al.* 2012). In questa fase di codifica grammaticale un ruolo non secondario sembra essere svolto anche da strutture sottocorticali con il nucleo caudato nei gangli della base (Moro *et al.* 2001).

Una volta identificato il lemma della parola selezionata, diventa finalmente possibile avere accesso alle informazioni morfologiche, fonologiche, sillabiche e fonetiche in essa contenute (**fase di accesso lessicale**). Le informazioni morfologiche (i morfemi astratti che caratterizzano la parola) diventano disponibili grazie a una fase di **codifica morfologica** nella quale un ruolo importantissimo è svolto dalla memoria a lungo termine dichiarativa semantica (che contiene queste informazioni e ne permette il recupero) e dalla memoria di lavoro (per gestire ad esempio le informazioni relative all'accordo di genere e numero da usare nella frase). Una volta avuto accesso alle informazioni morfologiche, per poter attivare i morfi da produrre, l'attivazione viene diffusa alle informazioni fonologiche contenute nella parola in memoria (**codifica fonologica**). Questa informazione fonologica deve poi essere combinata in unità ritmiche di base, le sillabe, che andranno infine a formare una parola fonologica dotata di sillabe toniche e atone (**fase di sillabificazione**). Un processo di **codifica fonetica** a questo punto convertirà i fonemi in schemi articolatori astratti che

infine verranno prodotti durante la **fase di articolazione**. In queste ultime fasi del processo di produzione del messaggio, la memoria a lungo termine dichiarativa permette di recuperare le informazioni relative alle sillabe che comporranno le parole da produrre, mentre le abilità di pianificazione e controllo motorio si occupano della produzione della sequenza generata. Infine, i sistemi della memoria a lungo termine non dichiarativa procedurale permettono di eseguire i movimenti automatizzati degli articolatori mobili (lingua, velo del palato e labbra), che non sono sotto il controllo consapevole del parlante. Durante le successive fasi di codifica morfologica, sillabica e fonologica si osserva il reclutamento della corteccia uditiva dell'emisfero sinistro e, nel caso specifico della sillabificazione, il coinvolgimento di un'articolata rete neurale che include aree dei lobi frontali e temporali oltre ad aree sotto la corteccia cerebrale come il talamo e porzioni dell'emisfero cerebellare destro. Le ultime due fasi di codifica fonetica e articolazione sono implementate in altre reti neurali: codifica fonetica (area motoria supplementare, insula anteriore sinistra; Dronkers 1996; Carreiras *et al.* 2006); articolazione (giro precentrale sinistro, talamo sinistro, gangli della base, nucleo dentato nell'emisfero cerebellare destro; Peeva *et al.* 2010; Tettamanti *et al.* 2005). Si osservi, infine, che questi epicentri sono interconnessi da numerosi fascicoli (Corrivetti *et al.* 2019).

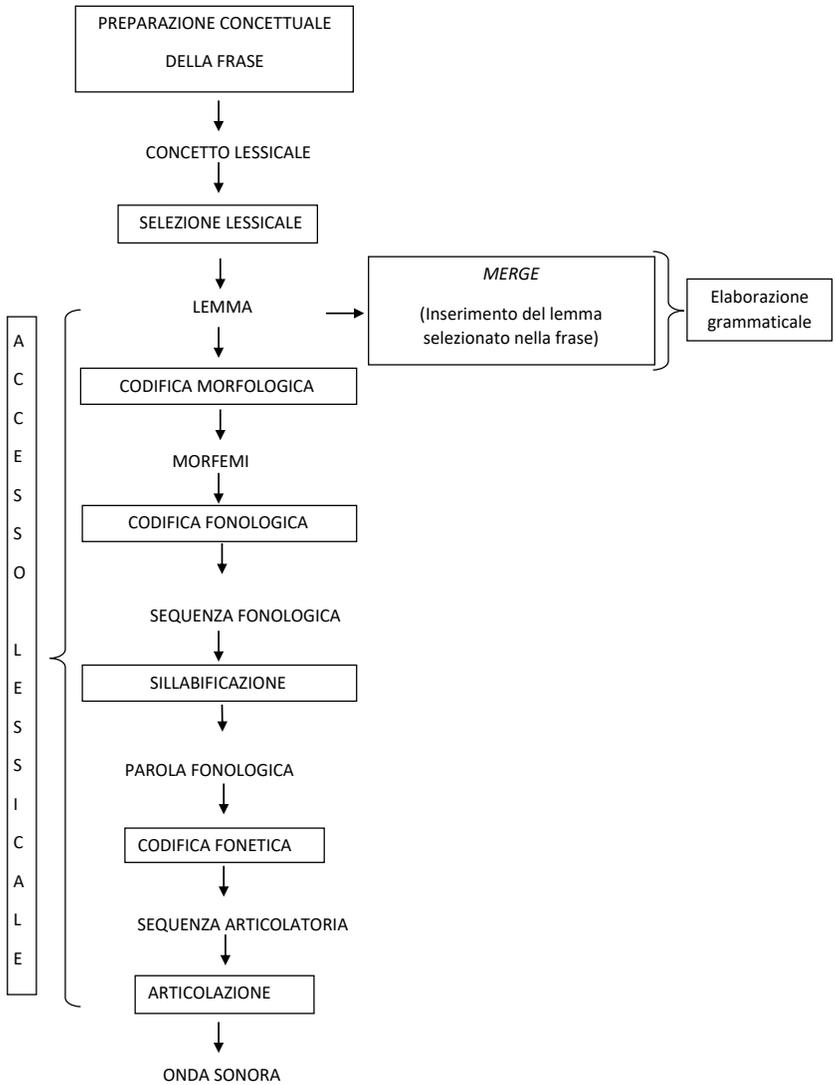


Figura 3. Schematizzazione del modello di produzione del messaggio (modificata da Marini & Vicari 2022)

4 Conclusioni sulle conseguenze del nuovo approccio per la pratica clinica

In questo contributo sono stati presentati alcuni dei più recenti sviluppi delle nostre conoscenze relative ai correlati neurali del linguaggio. Come si è potuto constatare, nel corso degli ultimi venti anni molte delle conoscenze date per assodate per oltre un secolo si sono rivelate quanto meno incomplete, e il crescente numero di indagini con tecniche di *neuroimaging* strutturale e funzionale condotte sia su soggetti sani sia su pazienti con lesioni cerebrali stanno portando ad una sempre migliore comprensione dei complessi rapporti tra cervello e linguaggio. In queste note finali, è opportuno inserire alcune riflessioni sulle conseguenze pratiche degli sviluppi sperimentali descritti fin qui. In particolare, verrà presa in considerazione la migliorata comprensione dei processi alla base della interpretazione dei disturbi e della riabilitazione delle funzioni linguistiche nei bambini con disturbi del neurosviluppo e in persone con lesioni cerebrali acquisite.

Nel § 3 si è riflettuto sul fatto che la capacità di generare un discorso di senso compiuto si basa su numerose funzioni cognitive e su molteplici abilità micro- e macrolinguistiche. Questo non può non avere un impatto sulla corretta interpretazione della performance osservabile in pazienti con lesioni cerebrali sottoposti a compiti di natura linguistica. Ad esempio, Marini e colleghi (2004) hanno dimostrato che una scarsa performance osservabile in bambini con Disturbo Primario di Linguaggio in compiti di produzione lessicale e grammaticale può in realtà dipendere in misura significativa da disturbi di memoria di lavoro. Ovviamente, avere consapevolezza di come questa e altre abilità cognitive influenzino l'elaborazione linguistica è un primo passo per procedere nella pianificazione di un efficace programma riabilitativo. Similmente, la conoscenza delle reti neurali (e dei relativi epicentri) responsabili di specifiche abilità linguistiche nella popolazione generale deve portare il clinico all'adozione di innovative tecniche riabilitative complementari a quelle tradizionali. Ad esempio, come si è visto nel § 3 alcuni studi indicano il potenziale coinvolgimento delle porzioni dorsali del giro frontale inferiore sinistro nella capacità di selezionare parole informative all'interno di un contesto discorsivo. In un esperimento di risonanza magnetica strutturale, Spalletta *et al.* (2010) hanno dimostrato che la ridotta capacità informativa di una coorte di pazienti con diagnosi di schizofrenia correlava con i livelli di atrofia di questo epicentro (cfr. Figura 4a). Similmente, Marini & Urgesi (2012) hanno riscontrato che l'inibizione della medesima area con la tecnica della stimolazione magnetica transcranica (TMS, dall'ingl. *Transcranic Magnetic Stimulation*) in un gruppo di

studenti universitari sani riduceva significativamente i livelli di informatività del loro eloquio narrativo. Inoltre, Mazzon e colleghi (2019) hanno osservato che una riduzione dei livelli di informatività è un campanello d'allarme per persone con diagnosi di disturbo cognitivo lieve che stanno purtroppo per sviluppare demenza di Alzheimer. Si osservi, inoltre, che in questa coorte di pazienti i ridotti livelli di informatività erano nuovamente correlati con una notevole ipoperfusione (cioè scarso afflusso sanguigno) nella medesima area trovata atrofica negli schizofrenici e la cui inibizione riduceva i livelli di informatività nei sani (Figura 4b). Sulla base delle osservazioni in Spalletta *et al.* (2010) e Marini e Urgesi (2012), Marangolo e colleghi (2013) hanno infine dimostrato che l'appaiamento di una riabilitazione di tipo tradizionale con una stimolazione eccitatoria del giro frontale inferiore sinistro con la tecnica della stimolazione corticale diretta transcranica (TdCS, dall'ingl. *Transcranial direct Cortical Stimulation*) era in effetti in grado di potenziare l'esito del percorso riabilitativo in una coorte di pazienti afasici non fluenti cronici e resistenti ad una riabilitazione tradizionale. Ovviamente, questi passi in avanti della riabilitazione non sarebbero stati possibili senza il vigoroso sviluppo delle neuroscienze cognitive e della neurolinguistica.

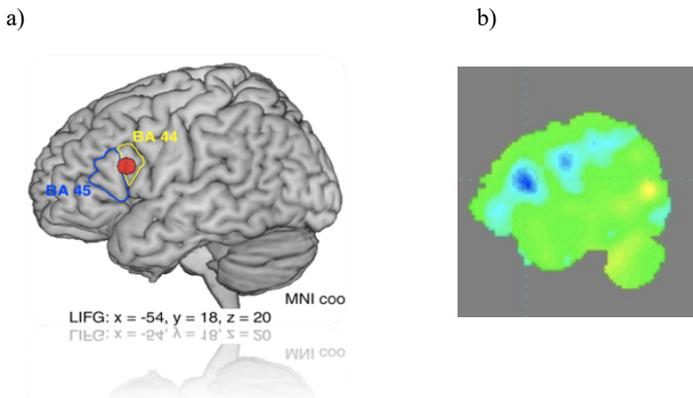


Figura 4. I risultati di due studi volti ad esplorare il ruolo svolto dalla porzione dorsale del giro frontale inferiore sinistro nella capacità di selezionare parole informative mentre si produce un discorso narrativo: a) l'atrofia di questa porzione del giro frontale inferiore sinistro correlava alla riduzione dei livelli di informatività in una coorte di pazienti schizofrenici; b) l'ipoperfusione di quest'area era particolarmente marcata e in relazione ai ridotti livelli di informatività in una coorte di pazienti con disturbo cognitivo lieve che stanno sviluppando demenza di Alzheimer

Bibliografia

- Breasted, J.H. 1930. *The Edwin Smith Surgical Papyrus*. Chicago: The University of Chicago Press, Illinois.
- Broca, P. 1866. Remarques sur le siège de la faculté du langage, suivie d'une observation d'aphémie (perte de la parole). *Bulletins de la Société Anatomique* 6: 330-357.
- Buckner, R.L. & Carroll, D.C. 2007. Self-projection and the brain. *Trends in Cognitive Sciences* 11(2): 49-57.
- Catani, M. & Bambini, V. 2014. A model for Social Communication and Language Evolution and Development (SCALED). *Current Opinion in Neurobiology* 28: 165-171.
- Catani, M., Dell'Acqua, F., Bizzi, A., Forkel, S. J., Williams, S., Simmons, A., Murphy, D. G. & Thiebaut de Schotten, M. T. 2012a. Beyond cortical localization in clinico-anatomical correlation. *Cortex* 48: 1262-1287.
- Catani, M., Dell'acqua, F., Vergani, F., Malik, F., Hodge, H., Roy, P., Valabregue, R. & Thiebaut de Schotten, M. 2012b. Short frontal lobe connections of the human brain. *Cortex* 48:273-291.
- Chomsky, N. 1995. *The Minimalist Program*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Coelho, C., Le, K., Mozeiko, J., Krueger, F. & Grafman, J. 2012. Discourse production following injury to the dorsolateral prefrontal cortex. *Neuropsychologia* 50(14): 3564-3572.
- Corrivetti, F., Thiebaut de Schotten, M., Poisson, I., Froelich, S., Descoteaux, M., Rheault, F. & Mandonnet, E. 2019. Dissociating motor-speech from lexico-semantic systems in the left frontal lobe: insight from a series of 17 awake intraoperative mappings in glioma patients. *Brain Structure and Function* 224: 1151-1165.
- Damasio, H., Grabowski, T.J., Tranel, D., Hichwa, R.D. & Damasio, A.R. 1996. A neural basis for lexical retrieval. *Nature* 380 (6574): 499-505.
- Dejerine, M.J. 1892. Contribution à l'étude anatomo-pathologique et clinique des différentes variétés de cécité verbale. *Mémoires présenté à la Société de Biologie* 44 (9): 61-90.
- den Ouden, D.B., Saur, D., Mader, W., Schelter, B., Lukic, S., Wali, E., Timmer, J., Thompson, C.K., 2012. Network modulation during complex syntactic processing. *Neuroimage* 59: 815-823.
- Devinsky, O., Morrell, M.J., Vogt, B.A. 1995. Contributions of Anterior Cingulate Cortex to Behavior. *Brain* 118: 279-306.
- De Zubicaray, G., McMahon, K., Eastburn, M., Pringle, A. 2006. Top-down influences on lexical selection during spoken word production: A 4T fMRI investigation of refractory effects in picture naming. *Human Brain Mapping* 27: 864-873.
- Carreiras, M., Mechelli, A. & Price, C.J. 2006. Effect of word and syllable frequency on activation during lexical decision and reading aloud. *Human Brain Mapping* 27: 963-972.
- Dronkers, M.F. 1996. A new brain region for coordinating speech articulation. *Nature* 384: 159-161.
- Exner, S. 1881. *Untersuchungen über die Localization der Functionen in der Grosshirnrinde des Menschen*. Wien: Wilhelm Braumuller.
- Ferretti, F., Adornetti, I., Chiera, A., Nicchiarelli, S., Magni, R., Valeri, G. & Marini, A. 2017. Mental Time Travel and Language Evolution: A narrative account of the origins of human communication. *Language Sciences* 63: 105-118.

- Friederici, A., Chomsky, N., Berwick, R.C., Moro, A. & Bolhuis, J.J. 2017. Language, mind and brain. *Nature Human Behaviour* 1: 713-722.
- Gernsbacher, M.A. 1990. *Language comprehension as structure building*. Erlbaum: Hillsdale, NJ.
- Geschwind, N. 1965a. Disconnexion syndromes in animals and man. I. *Brain* 88(2): 237-294.
- Geschwind, N. 1965b. Disconnexion syndromes in animals and man. II. *Brain* 88(3): 585-644.
- Geschwind, N. 1970. *The organization of language and the brain*. *Science* 170: 940-944.
- Hirschfeld, G., Jansma, B., Bölte, J. & Zwitserlood, P. 2008. Interference and facilitation in overt speech production investigated with event-related potentials. *Neuroreport* 19(12): 1227-1230.
- Indefrey, P. & Levelt, W.J.M. 2000. The neural correlates of language production. In M.S. Gazzaniga (ed.), *The new cognitive neurosciences*. Cambridge, MA: MIT Press: 845-865.
- Indefrey, P. 2012. The spatial and temporal signatures of word production components: a critical update. *Frontiers in Psychology* 2: 255.
- Johnson-Laird, P.N. 1983. *Mental Models*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Levelt, W.J.M., Roelofs, A. & Meyer, A.S. 1999. A theory of lexical access in speech production. *Behavioural Brain Science* 22: 1-38.
- Levelt, W.J.M. 1989. *Speaking: from intention to articulation*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Levelt, W.J.M. 2001. Spoken word production: A theory of lexical access. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 98 (23): 13464-13471.
- Levinson, S. 1983. *Pragmatics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Lichteim, L. 1885. On Aphasia. *Brain* 7: 433-484.
- Lombardo, M.V., Chakrabarti, B., Bullmore, E.T., Wheelwright, S.J., Sadek, S.A., Suckling, J. & Baron-Cohen, S. 2010. Shared neural circuits for mentalizing about the self and others. *Journal of Cognitive Neuroscience* 22: 1623-1635.
- Mamiya, P.C., Richards, T.L. & Kuhl, P.K. 2018. Right forceps minor and anterior thalamic radiation predict executive function skills in young bilingual adults. *Frontiers in Psychology* 9(9): 118.
- Marangolo, P., Fiori, V., Calpagnano, M.A., Campana, S., Razzano, C., Caltagirone, C. & Marini, A. 2013. tDCS over the left inferior frontal cortex improves speech production in aphasia. *Frontiers in Human Neuroscience* 7(539): 1-10.
- Marini, A. 2012. Characteristics of narrative discourse processing after damage to the right hemisphere. *Seminars in Speech and Language* 33(1): 68-78.
- Marini, A. 2016. *Che cosa sono le neuroscienze cognitive*. Roma: Carocci.
- Marini, A. 2018. *Manuale di neurolinguistica*. Roma: Carocci.
- Marini, A., Andreetta, S., del Tin, S. & Carlomagno S. 2011. A multi-level approach to the analysis of narrative language in Aphasia. *Aphasiology* 25: 1372-1392.
- Marini, A. & Urgesi, C. 2012. Please, get to the point! A cortical correlate of linguistic informativeness. *Journal of Cognitive Neuroscience* 24(11): 2211-2222.
- Marini, A., Gentili, C., Molteni, M. & Fabbro, F. 2014. Differential verbal working memory effects on linguistic production in children with Specific Language Impairment. *Research in Developmental Disabilities* 35: 3534-3542.
- Marini, A., Ferretti, F., Chiera, A., Magni, R., Adornetti, I., Nicchiarelli, S., Vicari, S. & Valeri, G. 2019. Episodic future thinking and narrative discourse generation in children with Autism Spectrum Disorders. *Journal of Neurolinguistics* 49: 178-188.

- Marini, A., Ferretti, F., Chiera, A., Magni, R., Adornetti, I., Nicchiarelli, S., Vicari, S., & Valeri, G. 2019. Episodic future thinking and narrative discourse generation in children with autism spectrum disorders. *Journal of Neurolinguistics* 49: 178-188.
- Marini, A. & Vicari, S. 2022. (a cura di) *I disturbi del linguaggio in età evolutiva: caratteristiche, diagnosi e trattamento*. Bologna: Il Mulino.
- Mazzon, G., Ajčević, Cattaruzza, T., Menichelli, A., Guerriero, M., Capitano, S., Pesavento, V., Dore, F., Sorbi, S., Manganotti, P. & Marini, A. 2019. Connected speech deficit as an early hallmark of CSF-defined Alzheimer's disease and correlation with cerebral hypoperfusion pattern. *Current Alzheimer Research* 16: 1-12.
- Mesulam, M.M. 1998. From sensation to cognition. *Brain* 121: 1013-1052.
- Moro, A., Tettamanti, M., Perani, D., Donati, C., Cappa, S.F. & Fazio, F. 2001. Syntax and the brain: disentangling grammar by selective anomalies. *NeuroImage* 13(1):110-118.
- Mozeiko, J., Le, K., Coelho, C., Krueger, F. & Grafman, J. 2011. The relationship of story grammar and executive function following TBI. *Aphasiology* 25: 826-835.
- Peeva, M.G., Guenther, F. H., Tourville, J. A., Nieto-Castanon, A., Anton, J.L., Nazarian, B., & Alario, F.X. 2010. Distinct representations of phonemes, syllables, and suprasyllabic sequences in the speech production network. *NeuroImage* 50: 626-638.
- Piervincenzi, C., Petrilli, A., Marini, A., Caulo, M., Committeri, G. & Sestieri, C. 2016. *Multimodal assessment of hemispheric lateralization for language and its relevance for behavior*. *NeuroImage* 142: 351-370.
- Reynolds, E.H. & Wilson, J.V.K. 2014. Neurology and psychiatry in Babylon. *Brain* 137: 2611-2619.
- Roelofs, A. 1992. A spreading activation theory of lemma retrieval in speaking. *Cognition*, 42: 107-142.
- Solso, S., Xu, R., Proudfoot, J., Hagler, D. J., Campbell, K., Venkatraman, V., Barnes, C.C., Ahrens-Barbeau, C., Pierce, K., Dale, A., Eyler, L. & Courchesne, E. 2016. Diffusion tensor imaging provides evidence of possible axonal overconnectivity in frontal lobes in autism spectrum disorder toddlers. *Biological Psychiatry* 79(8): 676-684.
- Spalletta, GF, Spoletini, I., Cherubini, A., Rubino, I.A., Siracusano, A., Piras, F., Caltagirone, C, & Marini, A. 2010. Cortico-subcortical underpinnings of narrative processing impairment in schizophrenia. *Psychiatry Research: Neuroimaging* 182: 77-80.
- Sperber, D. & Wilson, D. 2002. Pragmatics modularity and mind-reading. *Mind and Language* 17: 3-23.
- Stiefel, M., Shaner, A. & Schaefer S.D. 2006. The Edwin Smith Papyrus: the birth of analytical thinking in medicine and otolaryngology. *Laryngoscope* 116(2): 182-8.
- Testut, L. 1897. *Traité d'anatomie humaine*. Paris: O. Doin.
- Tettamanti, M., Moro, A., Messa, C., Moresco, R.M., Rizzo, G., Carpinelli, A. & Perani, D. 2005. Basal ganglia and language: phonology modulates dopaminergic release. *Neuroreport* 16(4): 397-401.
- Van Overwalle, F. 2009. Social cognition and the brain: a meta-analysis. *Human Brain Mapping* 30: 829-858.
- Vigneau, M., Beaucousin, V., Hervé, P. Y., Duffau, H., Crivello, F., Houdé, O., Mazoyer, B. & Tzourio-Mazoyer, N. 2006. Meta-analyzing left hemisphere language areas: Phonology, semantics, and sentence processing. *NeuroImage* 30: 1414-1432.
- Wernicke, C. 1874. *Der aphasische Symptomencomplex. Eine psychologische Studie auf anatomischer Basis*. Breslau: Cohn und Weigert.

-
- Yuan, P., Raz, N. 2014, .Prefrontal Cortex and Executive Functions in Healthy Adults: A Meta-Analysis of Structural Neuroimaging Studies. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews* 42: 180-192.
- Zaccarella, E. & Friederici, A.D. 2015. Merge in the human brain: a sub-region based functional investigation in the left pars opercularis. *Frontiers in Psychology* 6: 524.
- Zaccarella, E., Schell, M. & Friederici, A.D. 2017. Reviewing the functional basis of the syntactic Merge mechanism for language: A coordinate-based activation likelihood estimation meta-analysis. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* 80: 646-656.