

A Cora, Teresa, Beatrice, Marcella.

Alla mia famiglia.

“...lo squillo insisteva. Si susì santiando...sollevò il ricevitore.

"Montalbano sono. Dovrei dire pronto, ma non lo dico.

Sinceramente, non mi sento pronto..."

Andrea Camilleri, “La gita a Tindari”

RINGRAZIAMENTI

L'ipotesi di lavoro da cui questa tesi origina, è una follia ibrida che ha convinto ben pochi, all'inizio.

Ringraziando Mendel e le sue coltivazioni di piselli, i miei geni trascrivono per una proteina che sviluppa una dose piuttosto elevata di testardaggine. Le pagine che ho davanti testimoniano che questo impegno ha dato frutto. L'uomo parla perché grazie al suo sistema motorio può comprendere le azioni altrui, riprodurle e immagazzinarle nel suo vocabolario motorio.

Ringraziare tutte le persone che hanno diviso, condiviso e accompagnato questi tre anni di lavoro, è impresa pressoché impossibile.

Cercherò, in queste righe, di ricordare tutti coloro che, in qualche modo, sono stati, per me, di aiuto e sostegno.

Prima di scendere nell'ovvietà da cui ci si fa prendere ringraziando a destra e a manca, voglio rivolgere il pensiero a tutti quelli che non mi hanno aiutata, non mi hanno capita, non mi hanno ascoltata, perchè mi hanno dato la forza di riaccendere la sfida e puntare all'orizzonte una volta di più. Senza quei no e quei silenzi, mi sarei annoiata.

Ringrazio il professor Carlo Peretto per avermi dato la possibilità di lavorare a questo soggetto così appassionante.

Al professor Luciano Fadiga, vanno i miei ringraziamenti più sentiti, per il sostegno, materiale e spirituale e per avermi dimostrato che ogni idea, per quanto folle e impraticabile sia, trova sempre sostenitori appassionati.

Alla professoressa Laila Craighero per la sua disponibilità, i preziosi consigli, il tempo speso insieme e l'immane "siga?".

Al professor Jean-Marie Hombert e al professor Francesco d'Errico per il tempo e i consigli che hanno voluto dedicarmi.

Al professor Stefano Grimaldi, per gli innumerevoli pranzi che mi ha offerto e la fiducia che mi ha dimostrato: ti aspetto alla prossima maratona di New York.

Al professor Giorgio Manzi, che mi ha incautamente affidato un suo tesista e mi ha concesso la sua amicizia.

Alle "partecipanti al corso di ginnastica", per talmente tante cose che mi sarebbe impossibile riassumerle in poche righe: alle dottoresse Maddalena Fabbri Destro e Chiara Begliomini grazie, dal profondo del cuore.

Alla dottoressa Ilaria Bufalari, per aver sottratto i soggetti dalle mie grinfie taglienti, per avermi insegnato tanto e aver condiviso con me le solitudini autostradali sul Pandino.

Al dottor Alessandro D'Ausilio, per aver avuto il coraggio di coinvolgermi in discussioni su Kuhn e la filosofia della scienza dopo un *social dinner* e per aver voluto imparare qualcosa sui miei amati tools.

Al dottor Pierpaolo Busan e alle sue schiccherate di TMS sul mio "sinistro" cervello.

Al dottor Saro Canto, che mi fa auguri alternativi e mi indica quali creme risultano gradevoli o meno all'olfatto del mio prossimo.

A Dany, perché le discussioni con te, nei nostri 20 metri quadrati parigini, sono la causa di tutto questo.

A Matteo, perché fare scienza in modo serio e riderne, non è qualità che si incontri sovente.

A Lluqui, Leti, Arturo e Alba (los del tan reducido piso y del barrio bohemio) per il sostegno, l'amicizia e le notti felici di vizi proibiti.

Agli 88 tasti (mal me ne incolga se li chiamo folli), alla pazienza e ai giramenti esplosivi.

Agli amici con la "A" maiuscola: Annalisa, Panz, Pedro, Clara, Joe, Roby, Buddha.

Alla mia famiglia, per tutto: dal microscopico al macroscopico, grazie.

Infine, a quelli che mi hanno lasciato: Cora, Teresa, Titty, Marcy: questa tesi è dedicata a voi e a tutti i rappresentanti del genere *Homo* che hanno calcato questo suolo.

*“Le vingt-cinq septembre douze cent soixantequatre, au petit jour, le duc
d’Auge se pointa sur le sommet du donjon de son château pour y
considérer, un tantinet soit peu, la situation historique.
Elle était plutôt floue.*

(...)

*Les Huns préparaient des stèques tartares, le Gaulois fumait une gitane,
les Romains dessinaient des grecques, les Sarrasins fauchaient de
l’avoine, les Francs cherchaient des sols
et les Alains regardaient cinq Ossètes. Les Normands buvaient du calva.
- Tant d’histoire, dit le duc d’Auge au duc d’Auge, tant d’histoire pour
quelques calembours, pour quelques anachronismes. Je trouve cela
misérable. On n’en sortira donc jamais?*

Raymond Queneau, Les fleurs bleues

INTRODUZIONE

Il linguaggio può essere genericamente definito come la capacità di associare suoni e significati mediante regole grammaticali. La moderna linguistica strutturalista, da de Saussure in poi (*Cours de linguistique générale*, 1916) attribuisce al linguaggio due funzioni principali: una comunicativa e una simbolico-astrattiva.

La funzione comunicativa veicola la trasmissione di informazioni ed è strumento dell’interazione tra individui, mentre quella simbolico-astrattiva ha valenza più propriamente conoscitiva perché il linguaggio permette di descrivere gli eventi attraverso l’uso di concetti che veicolano, a loro volta, conoscenze relative alla realtà anche in assenza di esperienza diretta da parte del soggetto.

Il problema della sua origine, la definizione delle sue caratteristiche e le sue implicazioni sociali e filosofiche sono una costante che attraversa

discipline e ambiti di indagine molto distanti tra di loro, spaziando dalla religione alla linguistica, dall'antropologia all'archeologia, dalla psicologia alle neuroscienze.

Tra i Presocratici Democrito afferma che *Λόγος γὰρ ἔργου σκιη*, “la parola è ombra dell'azione”, mentre Eraclito, nei suoi frammenti, fissa l'*arché* nel “*λόγος*”, da cui traggono origine tutte le cose; di linguaggio parla la Bibbia, dal primo dialogo tra Eva e il serpente, passando per il racconto della costruzione della torre di Babele e arrivando, infine, al prologo del Vangelo di Giovanni, in cui si stabilisce l'analogia tra Dio e il Verbo, analogia che influenzerà la riflessione sul linguaggio presso la filosofia cristiana, patristica e scolastica. L'Umanesimo antropocentrico, da Marsilio Ficino in poi, identifica l'uomo e le sue capacità peculiari (tra cui quella linguistica) nell'unico oggetto degno di riflessione. Nel 1590 Giordano Bruno, ne “*Lo spaccio della bestia trionfante*” afferma che l'uomo si distingue dalle altre creature per l'enorme capacità di interazione che hanno la sua mano e il suo cervello, capacità che lo mette in condizione di cambiare la realtà in cui vive. Il Naturalismo settecentesco, con Spinoza, afferma che le origini del linguaggio siano da ricercarsi nel comportamento motorio e nell'azione gestuale.

Darwin, ne “*L'origine dell'uomo*” (1871) si interroga sull'unicità della comunicazione linguistica del genere *Homo*, arrivando ad affermare che, anche grazie ad essa, “l'uomo si sia sollevato, sebbene a passi lenti e incerti, da una condizione infima al più elevato livello da lui mai raggiunto nel campo della conoscenza, della morale, della religione”.

Engels, nel saggio “*Parte avuta dal lavoro nel processo di umanizzazione della scimmia*” del 1876, accogliendo con entusiasmo le teorie evoluzioniste di Darwin, afferma che il primo passo verso l'umanizzazione consistette nella liberazione della mano, conseguente il

raggiungimento della postura eretta, come organo e allo stesso tempo prodotto del lavoro. Il linguaggio, insieme al lavoro della mano, avrebbero spinto il cervello della scimmia verso un'evoluzione che lo avrebbe reso, infine, compiutamente umano; in questo saggio, tra l'altro, Engels si sofferma in modo particolare sulle differenti risorse alimentari rese accessibili mediante l'uso di strumenti in pietra, la carne in primis, risorse che avrebbero costituito un mezzo essenziale per l'incremento cerebrale: una *Expensive Tissue Hypothesis* in nuce, insomma (Aiello, Wheeler 1995).

Nel corso del '900 l'interesse per questo argomento vede moltiplicarsi approcci e riflessioni, tra cui distinguiamo due assi principali di interesse, la linguistica comparata e la filosofia del linguaggio, il primo facente capo a de Saussure, il secondo a Wittgenstein.

de Saussure utilizzando gli strumenti della linguistica strutturalista, conduce un'indagine a ritroso alla ricerca della lingua primigenia, una glottogonia che approda, infine, alle lingue proto-indoeuropee, interpretate come stadio primigenio della lingua e risalenti a circa 12.000-15.000 anni da oggi, sebbene questa datazione sia del tutto ipotetica.

Wittgenstein, invece, centra il suo "*Tractatus Logico-philosophicus*" (1921) sul principio di uso e sulla teoria dei giochi di lingua, affermando che non occorre cercare il significato delle parole, bensì l'uso che ne viene fatto, perché compito della filosofia è discernere tra la molteplicità di questi usi e far emergere regole che ne permettano la comprensione, dal momento che non si può "*giocare a scacchi con le regole del rugby*". Freud, ne "*L'interpretazione dei sogni*" (1899) afferma con sicurezza che la prima parola pronunciata dall'uomo sarebbe stata "no", sebbene poco

sia lasciato intendere sulle ragioni che avrebbero portato a una tale affermazione o, meglio, negazione.

Più recentemente, due discipline di particolare interesse per questo lavoro, si sono interessate all'origine del linguaggio: archeologia preistoria e neuroscienze, arrivando a fondersi in quella che Renfrew (2008) definisce "neuroarcheologia". Il dettaglio di questo interesse, le scoperte che lo hanno acceso e le implicazioni che rendono ragionevole e auspicabile in termini di crescita per la scienza questa fusione tra discipline, saranno oggetto dei successivi capitoli.

Nell'ambito dell'indagine archeologica sull'origine ed evoluzione del linguaggio articolato l'evidenza fossile e quella comportamentale sono le due categorie di evidenze maggiormente prese in considerazione.

Nella trattazione sui dati biologici ed evolutivisti riferibili all'evidenza fossile, due sono gli assi di approccio principali, uno facente capo a Lieberman e Crelin (Lieberman, Crelin 1971; Lieberman 1988, 1992) e riguardante la ricostruzione del tratto vocale degli ominidi a partire dal pionieristico lavoro effettuato sullo *specimen* fossile de La-Chapelle-aux-Saints 1, l'altro avente come riferimento Falk, Tobias e Holloway (Falk 1980; Falk, Gibson 2001; Tobias 1975, 1981, 1991, 2005; Holloway 1969, 1981, 1982; Holloway et al. 2004) e la cui indagine si è concentrata sull'analisi dei caratteri anatomici dell'evoluzione cerebrale.

La ricostruzione del tratto vocale degli ominidi viene pertanto utilizzata al fine di valutare la capacità degli ominidi di produrre suoni comparabili al moderno *speech*. Il tratto vocalico ricostruito sulla base dello *specimen* fossile de La-Chapelle-aux-Saints 1 (Lieberman et al. 1972), viene comparato a quello di uno scimpanzé, di un neonato e di un uomo moderno; a ciascuna ricostruzione è associata una gamma vocalica

riproducibile e le diverse frequenze vocaliche sono state comparate tra loro. La comparazione ha portato gli autori ad affermare che *Homo neanderthalensis* non possedesse le basi anatomiche necessarie allo *speech*, potendo quindi esprimere un *range* vocalico piuttosto limitato, con valori maggiormente simili a quelli di *Pan paniscus*. Studi successivi (Heim et al. 2002, Heim et al. 2005; Boë et al. 2007; Lieberman 2007) hanno, però, evidenziato come la ricostruzione di Lieberman e Crelin fosse piuttosto imprecisa relativamente alle parti molli, in particolare per quanto riguarda la posizione della laringe e l'ampiezza della faringe.

Questa imprecisione sarebbe, secondo Heim e Boe, da attribuirsi al fatto che la modellizzazione del tratto vocalico di questo *specimen* fossile è stata eseguita sulla base della ricostruzione fattane da Marcelin Boule (1913; 1921); questa ricostruzione è stata oggetto di numerose critiche (Falk, 1975; Trinkaus, Shipman 1993), in particolare riguardo alla base del cranio e al complesso laringo-ioideo. Trinkaus sottolinea che l'analisi paleopatologica ha evidenziato che l'uomo de La-Chapelle-aux-Saints 1 soffriva di una forte osteoartrite di cui Boule non avrebbe tenuto conto nella sua ricostruzione, inficiata anche, sempre secondo Trinkaus, Heim e Boe, dall'estrema frammentarietà del cranio al momento della scoperta. Secondo Lieberman e Crelin la posizione alta della laringe di *Homo neanderthalensis* in associazione con una faringe ritenuta poco ampia, non avrebbe consentito la produzione dell'intero spettro vocalico, possibile di contro quando la laringe si trova in posizione bassa e in associazione con una faringe ampia. Mancando queste caratteristiche, secondo i due autori, verrebbero a mancare i prerequisiti anatomici per la produzione fonetica: la conformazione del tratto vocalico del Neanderthal sarebbe simile a quella che caratterizza i primati e i neonati umani, nei quali la laringe risulta in posizione ancora elevata nel collo e

in cui l'ampiezza della faringe non è tale da consentire la produzione di suoni articolati. L'esperimento è stato quindi ripetuto sulla base della nuova ricostruzione (Heim 1986, 1989, 1990) e la comparazione del tratto vocalico si è arricchita di un ulteriore confronto, comprendendo anche uno *specimen* femminile moderno. I risultati hanno mostrato che la gamma delle frequenze vocaliche riproducibili da *Homo neanderthalensis* rientra nella variabilità intraspecifica tipica di *Homo sapiens*, dimostrando che *Homo neanderthalensis* possedeva capacità linguistiche.

Un diverso approccio ai dati biologico – evolucionistici nell'ambito dell'antropologia fisica, è sviluppato da Laitman et al. (1979, 1988, 1992) che basano la ricostruzione del tratto vocale degli ominidi antichi sul grado di flessione basicranica (da *prosthion* a *endobasion*), ipotizzando che questo rifletta in maniera soddisfacente la posizione di laringe e faringe. La morfologia ricostruita negli studi succitati è stata comparata con primati non umani (NHP) e uomo anatomicamente moderno (AMH) a diversi livelli di sviluppo e con un campione di ominidi fossili. La conclusione cui Laitman e collaboratori sono giunti, è che *Homo neanderthalensis* probabilmente possedeva un range vocalico ristretto rispetto a un *sapiens* adulto o subadulto, rimarcando tuttavia la differenza considerevole nel grado di flessione basicranica degli *specimen* di *Homo neanderthalensis* e Sterkfontein 5 rispetto alle linee basicraniche dei pongidi.

L'approccio paleoneurologico, cui fanno capo Falk, Tobias e Holloway in particolare (referenze citate), pone l'accento sullo studio del processo di encefalizzazione che caratterizza sin dalla sua comparsa il genere *Homo*. Lo studio delle impronte encefaliche e vascolari visibili nei calchi endocranici degli ominidi fossili, permette di tracciare linee di sviluppo e

di formulare ipotesi rispetto all'importanza evolutiva e funzionale delle diverse aree cerebrali. Tuttavia, il postulato forte che tale tipo di studi viene a tracciare, cioè che esista una precisa corrispondenza anatomica tra sviluppo di aree cerebrali e funzioni cognitive o motorie ad esse associate (cioè associazione univoca tra anatomia e funzione), costituisce un'equazione difficile da sostenere, soprattutto sulla base dei dati della neurofisiologia, che tende, al contrario a rompere questa dicotomia tra centro cerebrale e funzione associata. È inoltre necessario tenere conto anche delle difficoltà oggettive legate alla ricostruzione dell'endocranio fossile, spesso soggetto a deformazioni post deposizionali o a ricostruzioni arbitrarie.

L'approccio scelto in questo lavoro mira a integrare i dati derivanti dal comportamento tecnico antico con i dati della neurofisiologia a sostegno della teoria motoria sull'origine del linguaggio, secondo l'intuizione di Liberman (1985; 1991; 2000) che individua i costituenti ultimi dello *speech* non nei suoni, ma in gesti articolatori evolutisi esclusivamente al servizio del linguaggio.

Lo studio svolto si fonda sull'ipotesi che insiemi litici e produzione linguistica possiedano un substrato neurale comune, da ricercarsi nel coinvolgimento del sistema motorio nei processi cognitivi (Fadiga, Craighero 2006; Fadiga, Craighero 2007; Rizzolatti, Arbib 1998).

Per insieme litico si intende un complesso di manufatti, riferibile a un sito o a una *facies* culturale unitaria, laddove *facies* identifica l'insieme dei dati archeologici che insistono su un dato territorio, in un periodo determinato. Linguaggio e *tool-making* condividerebbero quindi caratteristiche fondamentali quali la ricorsività, la possibilità di pianificare azioni complesse e prevederne le conseguenze nel futuro. Entrambi, inoltre, sono caratterizzati da un chiaro goal comportamentale

rappresentato dalla necessità dell'individuo di realizzare un'interazione comunicativa.

Come risulta da dati recenti, l'area di Broca (area che si trova al piede della terza circonvoluzione frontale dell'emisfero sinistro, in corrispondenza delle aree 44 e 45 di Broadmann), oltre alle sue classiche funzioni (produzione linguistica attivazione durante l'ascolto), appare coinvolta anche in compiti motori come l'esecuzione di azioni e l'osservazione di azioni simili eseguite da terzi (Arbib 2000; Buccino 2005). L'area di Broca, infatti, è coinvolta nella produzione ed osservazione di gesti manuali ed orofacciali. Tali dati hanno permesso di avanzare l'ipotesi che quest'area possa rappresentare uno snodo centrale per il collegamento tra linguaggio, movimento e processi sensorimotori (Fadiga, Craighero 2006).

L'immediatezza con cui comprendiamo le azioni altrui ha suggerito l'esistenza di un meccanismo di comprensione diretto ed immediato in cui le azioni eseguite da altri sono direttamente rappresentate nel sistema motorio dell'osservatore, che conterrebbe, quindi, una copia motoria delle azioni osservate permettendogli una comprensione immediata, precedente qualunque processo di elaborazione cognitiva. Il meccanismo alla base della capacità di comprensione altrui è rappresentato dai "neuroni specchio" (Rizzolatti et al. 1996). I neuroni specchio sono una particolare classe di neuroni scoperti nell'area F5 della corteccia agranulare frontale del macaco. La particolarità di questi neuroni è che risultano attivi sia quando la scimmia compie un'azione, che quando la vede compiere da parte dello sperimentatore. Questa attivazione, definita "specchio", è stata interpretata come rappresentazione motoria dell'azione osservata e si è ipotizzato che sia alla base della comprensione degli eventi motori.

Dal punto di vista evolutivo, il *tool-making* è la prima azione motoria intenzionale attestata per il genere Homo attorno ai 2.6 MYa (Susman, 1994; Roche et al. 1999; Semaw 2000; Semaw et al. 2003; Semaw et al. 2005). Questo dato risulta particolarmente interessante perché stabilisce un legame significativamente concomitante tra evoluzione umana ed evoluzione tecnologica.

L'ambito teorico in cui questo lavoro si inserisce è stato recentemente definito da Renfrew (2005) "neuroarcheologia", cioè la nascente branca dell'archeologia che si interessa ai processi cognitivi e alla linee di sviluppo neurale che hanno accompagnato e intessuto la storia dell'evoluzione umana fin dall'apparizione del genere Homo, sia alla manifestazione archeologica di questi processi, cioè alla loro evidenza materiale attestata nel record archeologico.

Dal momento che questo record è riferito alla preistoria, queste manifestazioni sono riscontrabili in un limitato campione di materiali, tra i quali spicca, per ovvi motivi di conservazione, il registro litico, fenomeno e testimonianza del progredire e dell'evolversi dell'abilità tecnica e di pianificazione dell'uomo. L'apparizione della tecnologia marca indelebilmente la presenza del fatto umano (inteso come presenza umana concretamente rintracciabile in contesto archeologico) e consente di seguirne le linee evolutive. Come già sottolineato da Binford (1962), infatti, lo strumento è il risultato statico di un processo dinamico.

Il linguaggio umano potrebbe quindi essere considerato come il raffinamento evolutivo di un implicito sistema di comunicazione basato su rappresentazioni finalistiche di azioni di mano e bocca, poiché il precursore dell'area di Broca doveva essere dotato, prima dell'emergenza del linguaggio, di un sistema di riconoscimento gestuale tramite organizzazione e interpretazione delle sequenze motorie in termini di

obiettivi per le azioni (Rizzolatti, Arbib 1998). Si può ipotizzare, quindi, che nei nostri antenati esistesse una regione cerebrale in cui obiettivi e programmi motori erano rappresentati in maniera sintattica (Fadiga, Craighero 2007). L'attivazione dell'area di Broca all'osservazione di azioni potrebbe costituire dunque il collegamento neurobiologico per l'origine motoria del linguaggio articolato e funzionalmente parlando, il *tool-making* lo step intermedio tra la rappresentazione delle azioni e la comunicazione verbale (Fadiga et al. 2007; Peeters et al. 2009).

Riconoscere l'azione significa farla propria, poterla imitare e, in seguito, replicare. La replica di una serie di gesti precedentemente appresi rappresenta una sequenza motoria che, a sua volta, può essere applicata e riprodotta sulla base di principi tecnici, ulteriormente codificati in un metodo. Come sostiene Pelegrin (1991) "*on ne reconnaît que ce que l'on connaît*". Allo stesso modo, la replica di un comportamento motorio come il *tool-making*, comporta la codifica e l'implementazione dei singoli movimenti che compongono tale catena gestuale.

A supporto di quanto delineato in queste premesse teoriche, saranno esposti dati sperimentali volti a studiare la rappresentazione corticale durante l'osservazione di *tools* (cioè oggetti afferrabili aventi uno scopo funzionale) mediante rilevazione dell'eccitabilità corticale. Scopo di questi esperimenti è stato quello di indagare la dinamica temporale di attivazione cerebrale durante la presentazione di stimoli visivi (oggetti afferrabili e non afferrabili) utilizzando come tecnica l'EEG (elettroencefalografia). La scelta di utilizzare tale tecnica è legata al fatto che questa risulta essere la migliore a livello di risoluzione temporale, nell'ordine di millisecondi. Successivamente la nostra attenzione si è concentrata sul come nel cervello, un oggetto osservato acquisisca 'proprietà motorie' (attivi, cioè, le aree motorie) e in che momento i tools

si differenziano dagli oggetti semplicemente afferrabili, senza utilizzo funzionale.

La scelta di integrare i dati archeologici e antropologici qui presentati con dati sperimentali derivanti dall'elettrofisiologia, trova la sua giustificazione nelle premesse teoriche; se, come sottolineato, l'origine del linguaggio fosse motoria e se i costituenti ultimi dello *speech* sono gesti articolatori, in accordo con la teoria di Liberman, e se il linguaggio evolve a partire dalla rappresentazione di azioni (*hand action representation*, Fadiga, Craighero 2006) è dunque necessario indagare l'azione motoria iniziando da ciò che è oggetto dell'azione motoria stessa, cioè lo strumento, nella sua relazione con la capacità umana di manipolazione del *tool* stesso. Dal punto di vista archeologico queste ipotesi sono confermate dai ritrovamenti che attestano la capacità di fabbricazione e utilizzo intenzionale di strumenti.

Gli esperimenti condotti si sono articolati su dati sperimentali che dimostrano che la visione di oggetti "afferrabili" evoca automaticamente i piani motori ad esso associati, contrariamente a quanto avverrebbe alla visione di oggetti non afferrabili. In accordo con il concetto di "affordance" di Gibson (1979), quando noi osserviamo un oggetto, automaticamente selezioniamo alcuni "punti" dell'oggetto che possiamo utilizzare per interagire con esso.

Secondo Tucker, Ellis (2001) la visione di un oggetto attiva informazioni motorie e potenzia le *affordances* collegate all'interazione visuomotoria con questo oggetto. Funzionalmente parlando, questa interazione sta alla base della fabbricazione di strumenti che, dal punto di vista evolutivo, è la prima azione motoria attestata per il genere *Homo*.

La risonanza magnetica funzionale ha evidenziato nell'uomo (Peeters et al. 2009) l'attivazione specifica del settore rostrale del lobulo parietale inferiore (IPL) all'osservazione dell'utilizzo di tools. La parte anteriore del giro sopramarginale sinistro (aSMG) viene indicata come una regione specificamente attiva durante la preparazione e la simulazione dell'uso di strumenti (*tool-action specific region*). Il settore parietale, quindi, sembrerebbe essere parte di un circuito "mirror" specifico relativo all'uso di strumenti, ipotesi supportata dall'attivazione del SMG all'ascolto dello specifico suono prodotto da alcuni *tool* (Lewis et al. 2006). Non è stata riscontrata nessuna evidenza diretta di proprietà motorie per aSMG, ma risulta chiaro che questa area codifica le azioni compiute con uno strumento in termini di relazione causale astratta tra l'uso intenzionale del *tool* e i risultati ottenibili tramite questo utilizzo. Questa attivazione comporta una notevole possibilità di incremento del repertorio motorio umano e, se rapportata alla storia evolutiva di *Homo*, rappresenterebbe una maggiore capacità umana di interazione con l'ambiente circostante e, quindi, un salto evolutivo vantaggioso dal punto di vista cognitivo e dell'interazione con l'ambiente circostante; la mancata attivazione della medesima area nella scimmia (primati non umani) supporta le considerazioni evolutive a proposito del fatto che la capacità di utilizzare *tools* è andata di pari passo con la capacità di riconoscimento e ideazione motoria del *tool* stesso.

CAPITOLO 1: IL SISTEMA MOTORIO E LA COMPrensIONE DELL'AZIONE

1.1 Implicazioni funzionali dell'area di Broca

Nel 1861 il neurologo francese Paul Broca identificò un'area del cervello correlata con la funzione linguistica (Broca, 1861). Tale area si estende nella porzione del lobo frontale sinistro che comprende la *pars triangularis* e la *pars opercularis* del giro frontale inferiore (IFG) e coincide con le aree 44 e 45 di Brodmann (Brodmann, 1909).

Broca basandosi sulle osservazioni che aveva potuto condurre sul cosiddetto "paziente Tan" (perché la sua residua capacità linguistica gli consentiva di pronunciare solo la sillaba "tcaan") ritenne che questa fosse un'area motoria e che contenesse una memoria dei movimenti necessari all'articolazione delle parole.

Le osservazioni condotte sui reperti autoptici di questo paziente (che presentava una vasta lesione localizzata proprio in corrispondenza di questa area) gli confermarono che il normale funzionamento di questa area era fondamentale per una corretta espressione verbale (Broca 1861: "*Remarques sur le siège de la faculté du langage articulé, suivies d'une observation d'aphemie (perte de la parole)*," *Bulletins de la société anatomique de Paris*).

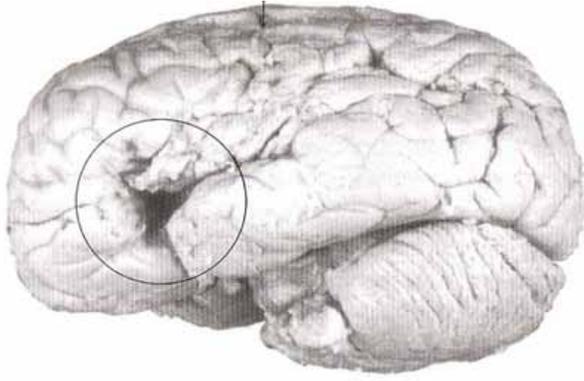


Fig. 1 Il cervello di Tan

La prima dimostrazione sperimentale del coinvolgimento dell'area di Broca nella produzione delle parole si deve al neurochirurgo Penfield (Penfield e Roberts, 1959) che, applicando la stimolazione elettrica di superficie al lobo frontale di pazienti svegli e collaboranti, sottoposti a neurochirurgia per epilessia intrattabile, osservò che la stimolazione dell'IFG provocava l'arresto dell'eloquio. La coincidenza tra la sede di questo effetto di *speech arrest* e l'area di Broca depose a favore del ruolo motorio di tale area (Penfield e Roberts, 1959).



Fig. 2: identificazione delle aree corticali di un cervello umano durante un'operazione di neurochirurgia. Da: Penfield e Roberts 1959.

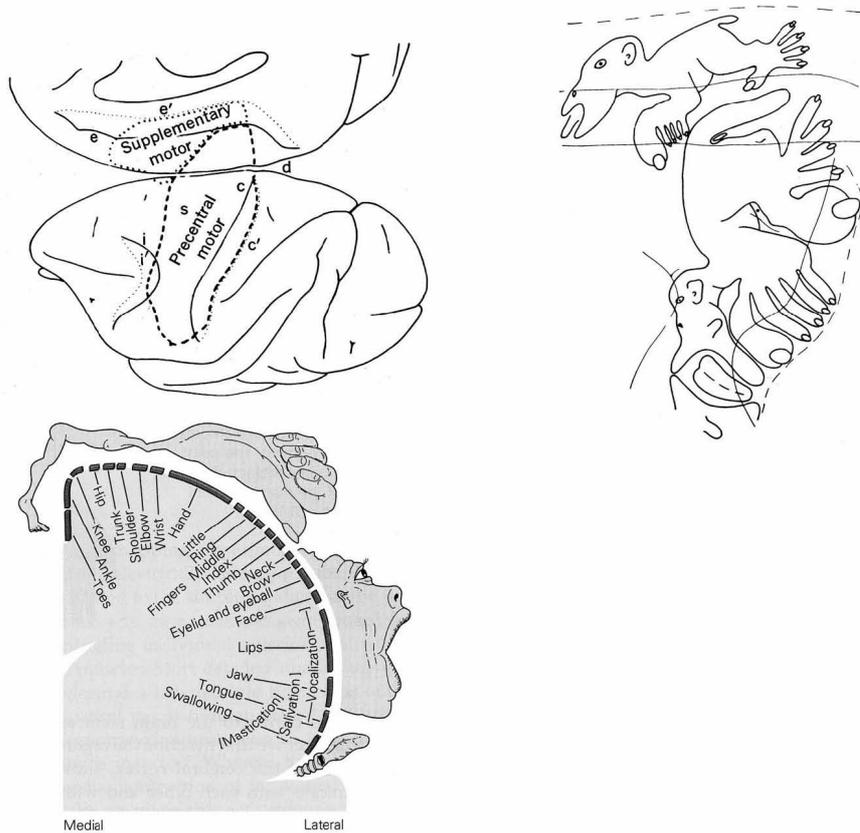


Fig.3 In alto a sinistra: visione mesiale e laterale del cervello di scimmia; le linee tratteggiate indicano la localizzazione dell'area motoria primaria e dell'area motoria supplementare secondo la neurologia classica. In alto a destra: i due omuncoli corrispondenti, rispettivamente, alla rappresentazione somatotopica dei movimenti nella corteccia motoria primaria e nella corteccia motoria supplementare come descritto da Woolsey. In basso a sinistra, l'*homunculus motorio* di Penfield.

Lo sviluppo delle tecniche di *brain imaging* ha permesso di dimostrare l'attivazione dell'area di Broca non solo durante la produzione linguistica, ma anche durante la percezione del linguaggio parlato, osservazioni che hanno confermato come questa area non sia rilevante esclusivamente per l'aspetto motorio del linguaggio, ma possieda anche funzioni percettive (Papathanassiou et al., 2000). Si ipotizza che questo ruolo percettivo non

sia limitato alla sola comprensione del linguaggio articolato, ma che possa estendersi anche ad altre funzioni.

L'accezione percettiva dell'area di Broca che interessa questo lavoro, riguarda la comprensione del linguaggio verbale nell'ambito più ampio del riconoscimento delle azioni compiute dagli altri (Rizzolatti, Fadiga 1998).

Due sono le ipotesi teoriche avanzate per spiegare come avviene la comprensione delle azioni altrui da parte di terzi: la *visual hypothesis* (Tanaka et al. 1991; Logothetis 1998) e la *direct match hypothesis* (Rizzolatti et al. 2001).

La *visual hypothesis* si basa sull'analisi visiva dell'azione che sarebbe inizialmente scomposta nei suoi elementi costitutivi (gli attori coinvolti, l'oggetto dell'azione e il contesto in cui si svolge la scena) e successivamente ciascun elemento verrebbe valutato in termini semantici in base all'analisi delle sue caratteristiche visive, e, infine, un processo deduttivo sulle interazioni tra i vari elementi significativi, porterebbe alla comprensione dell'azione nel suo complesso.

Se questa ipotesi è corretta, i substrati neurali coinvolti nel riconoscimento delle azioni devono comprendere le aree visive extrastriate, il lobo inferotemporale e la regione del solco temporale superiore (STS). Sia nei primati non umani che nell'uomo queste aree rispondono selettivamente all'osservazione di oggetti, parti del corpo, movimenti biologici e anche alle interazioni tra mani e oggetti (Carey et al., 1997; Allison et al., 2000; Kanwisher, 2000). Tuttavia quest'ipotesi non spiega in modo convincente come si possa comprendere un'azione anche quando variano i parametri visivi della scena osservata, ad esempio quando cambia il punto di vista dell'osservatore.

La scoperta dei *mirror neurons* ha suggerito una nuova ipotesi per spiegare come avvenga la comprensione delle azioni eseguite dagli altri.

I neuroni *mirror* sono una particolare classe di neuroni visuo-motori, identificati per la prima volta nell'area F5 della corteccia premotoria della scimmia, che si attiva sia quando l'animale esegue un'azione che quando osserva la medesima azione eseguita da terzi (Di Pellegrino et al., 1992; Gallese et al., 1996; Rizzolatti et al., 1996a).

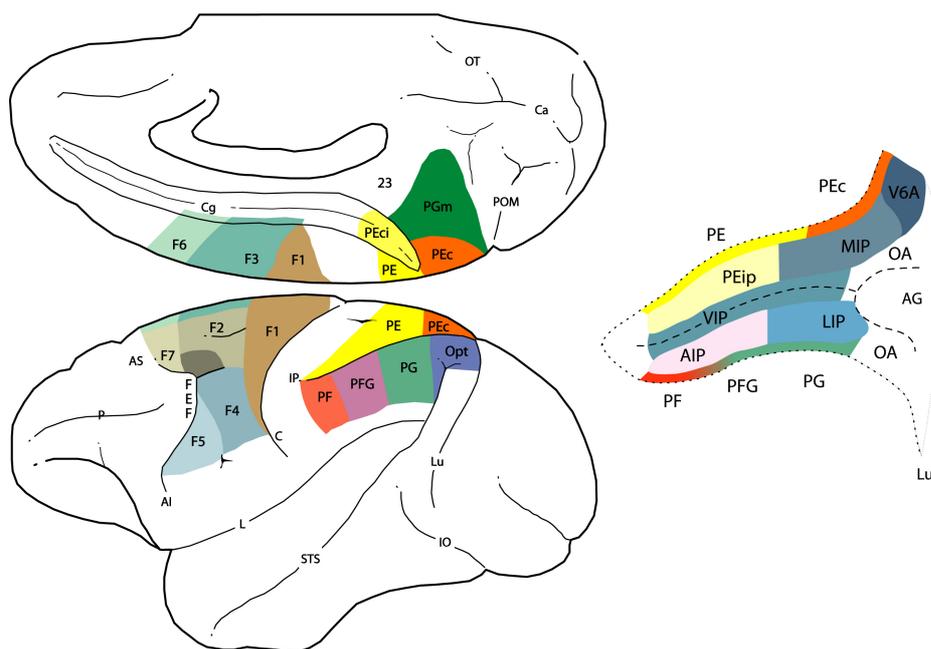


Fig. 4 Visione mesiale e laterale del cervello della scimmia che rivela la parcellizzazione anatomofunzionale della corteccia motoria e della corteccia parietale posteriore. Le aree della corteccia parietale posteriore sono indicate con la lettera P seguita da una (o più) lettere, secondo la convenzione di von Economo, modificata da Pandya, Selzer, 1982. A destra sono riportate le aree nascoste all'interno del solco intraparietale (IP): AIP area intraparietale anteriore, LIP area intraparietale laterale, MIP area intraparietale mediale, PEIP area PE intraparietale, VIP area intraparietale ventrale. Altre abbreviazioni: Cg

solco del cingolo, DLPFd corteccia prefrontale dorsolaterale dorsale, DLPFv corteccia prefrontale dorsolaterale ventrale, SI corteccia somatosensoriale primaria, POs solco parieto-occipitale. (Luppino, Rizzolatti, 2000)

I successivi studi sulle proprietà funzionali del meccanismo *mirror* hanno portato alla formulazione della *direct matching hypothesis* secondo la quale un'azione osservata può essere pienamente compresa perché l'osservazione attiva nell'osservatore la rappresentazione motoria dell'azione stessa. Questo meccanismo di "risonanza motoria", evocato dall'osservazione di un'azione, determina quindi una conoscenza diretta e immediata del significato dell'azione stessa senza che sia necessaria la mediazione di altri processi cognitivi. Il sistema *mirror* potrebbe rappresentare il substrato neurofisiologico che ha permesso l'evoluzione del linguaggio nell'uomo perché evidenzia come le informazioni sensoriali siano ancorate a procedure motorie.

1.2 Il sistema dei neuroni *mirror* nella scimmia

I neuroni *mirror* sono stati localizzati nella porzione rostrale della corteccia premotoria del macaco, in un'area chiamata F5 (Di Pellegrino et al., 1992; Gallese et al., 1996; Rizzolatti et al., 1996a), un'area essenzialmente motoria che controlla i movimenti finalizzati della mano e della bocca. I neuroni dell'area F5 hanno proprietà motorie e i *mirror* non fanno eccezione perché codificano prevalentemente per azioni che richiedono movimenti dei segmenti distali dell'arto superiore (mano e dita), come prendere e manipolare un oggetto. Una parte dei neuroni dell'area F5 scarica anche in risposta a stimoli visivi (Rizzolatti et al., 1988), pertanto sono detti neuroni visuo-motori. Sono state identificate

due classi di neuroni visuo-motori: alla prima classe appartengono i neuroni detti "canonici", che scaricano alla semplice presentazione di un oggetto manipolabile secondo le modalità da essi codificate (Murata et al., 1997); alla seconda classe, invece, appartengono neuroni che scaricano in risposta ad un'interazione tra un soggetto, lo sperimentatore o un'altra scimmia, e l'oggetto manipolabile. Questi particolari neuroni sono stati chiamati neuroni *mirror*, perché l'azione osservata sembra riflettersi nella rappresentazione motoria della medesima azione nell'osservatore. La presentazione dell'oggetto da solo o dell'azione mimata in assenza dell'oggetto, non evocano una risposta nei neuroni *mirror*.

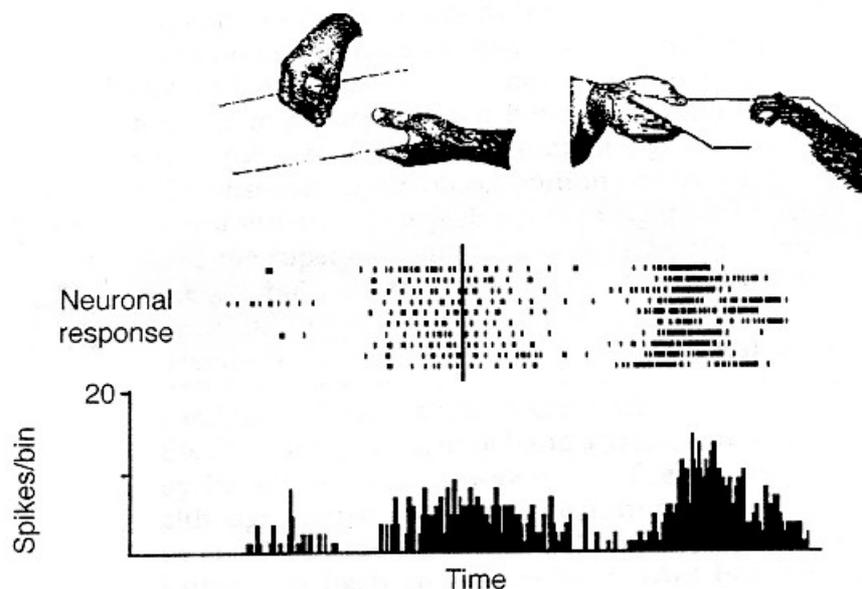


Fig. 5 Risposta neurale alla prensione e visione della prensione. Gallese et al. 1996

I neuroni *mirror* mostrano un ampio grado di generalizzazione rispondendo a stimoli visivi anche molto diversi tra loro, ma che

rappresentano la stessa azione o hanno lo stesso effetto e si attivano anche quando la scimmia osserva l'azione da punti di vista diversi.

Una caratteristica funzionale importante dei neuroni *mirror* è la relazione tra le loro proprietà visive e motorie. I neuroni *mirror* mostrano una congruenza tra gli stimoli visivi in grado di attivarli e le risposte motorie da essi codificate, per cui è possibile considerarli come un archivio di rappresentazioni di azioni potenziali, al quale attingere sia per la comprensione che per l'esecuzione delle azioni.

In base al grado di congruenza mostrato, i neuroni *mirror* sono stati suddivisi in due categorie. Alla prima categoria appartengono i neuroni *mirror strictly congruent*, che rispondono quando che l'azione osservata e l'azione compiuta coincidono tanto per lo scopo quanto per il modo in cui questo viene raggiunto. La maggior parte dei neuroni appartiene alla seconda categoria definita *broadly congruent*: a differenza dei precedenti, si attivano anche se l'azione osservata non è identica a quella da loro codificata. Nella maggioranza dei neuroni *mirror* presenti nell'area F5, la congruenza visuo-motoria è confinata allo scopo dell'azione e non al modo in cui esso viene raggiunto. Questo ha portato a ipotizzare che, se i neuroni *mirror* mediano la comprensione delle azioni, la loro attività deve riflettere il significato dell'azione osservata e non le sue caratteristiche visive, dal momento che l'oggetto dell'azione può essere temporaneamente nascosto alla vista dell'osservatore, senza che questo pregiudichi la comprensione dei comportamenti altrui.

Se la comprensione dell'azione si basa su un meccanismo di risonanza motoria, che innesca una rappresentazione interna dell'azione osservata, allora per l'attivazione di tale meccanismo è sufficiente l'accesso agli elementi minimi che permettano di comprenderne lo scopo. Allo scopo di verificare questa ipotesi, sono stati condotti esperimenti in cui le scimmie

erano messe in grado di comprendere il significato dell'azione che si svolgeva, ma non avevano accesso alle caratteristiche visive della scena che normalmente attivano i neuroni *mirror*, ovvero l'interazione tra la mano dell'attore (uomo o scimmia) e l'oggetto.

È stato dimostrato che l'attivazione del sistema *mirror* non dipende dalle caratteristiche visive dell'azione osservata, ma avviene anche quando la scimmia non è in grado di vedere l'interazione tra mano e oggetto, (perché nascosto) purché siano accessibili gli elementi (visivi o uditivi) alla necessari alla ricostruzione interna della sequenza nascosta (Umiltà et al. 2001; Kohler et al. 2002). Nel complesso questi studi confermano l'idea che i neuroni *mirror* codifichino il goal di un'azione, e non semplicemente i suoi parametri motori, visivi o uditivi.

Gli studi sui neuroni *mirror* sinora citati si sono concentrati sul settore dorsale dell'area F5 del macaco, in cui sono rappresentate prevalentemente le azioni della mano.

Uno studio successivo condotto sul settore ventrale dell'area F5, ha mostrato che esiste una parte di neuroni *mirror* codifica per azioni della bocca (Ferrari et al., 2003). In base allo stimolo visivo di attivazione, questi neuroni sono stati suddivisi in due categorie: *ingestive* e *communicative mirror neurons*. I primi sono neuroni *mirror* correlati ad azioni della bocca con funzione nutritiva (prendere un pezzo di cibo); questi neuroni mostrano una buona congruenza tra l'azione osservata in grado di evocare una risposta e l'azione di cui codificano l'esecuzione. I *communicative mirror neurons* (la minoranza) si attivano in risposta all'osservazione di azioni della bocca con funzione comunicativa (per i primati inferiori), come ad esempio schioccare le labbra, ma sono attivi anche quando la scimmia compie un'azione della bocca con funzione nutritiva. Questa discrepanza visuo-motoria suggerisce l'ipotesi che i

gesti comunicativi, o almeno alcuni di essi, possano essersi evoluti a partire da azioni compiute per nutrirsi (MacNeilage, 1998). Questo sembra suggerire che i neuroni *mirror* della bocca di tipo *communicative* riflettano un processo di corticalizzazione di funzioni comunicative non ancora slegate dalla loro originaria funzione nutritiva.

1.3 Il sistema *mirror* nell'uomo

La prima prova dell'esistenza di un sistema *mirror* nell'uomo si deve a uno studio di stimolazione magnetica transcranica (TMS) di Fadiga e collaboratori (1992). La TMS è stata applicata alla corteccia motoria primaria dell'emisfero sinistro di volontari sani, nell'area corrispondente alla rappresentazione della mano in cui sono stati registrati i potenziali motori evocati nei muscoli della mano destra. Ai soggetti era richiesto di osservare uno sperimentatore che afferrava un oggetto (azione transitiva) o che compiva un movimento del braccio privo di significato (azione intransitiva). Come condizioni di controllo sono state usate la presentazione di un oggetto tridimensionale e la rilevazione della diminuzione di intensità di una piccola fonte luminosa.

L'ipotesi sperimentale era che se l'osservazione di movimenti dell'arto superiore compiuti da un altro individuo determina un effetto facilitatorio nella corteccia motoria dell'osservatore (secondo il meccanismo di risonanza motoria dovuto ai neuroni *mirror*), la preattivazione avrebbe dovuto determinare un incremento selettivo dei potenziali motori registrati dagli stessi muscoli che il soggetto dovrebbe utilizzare per compiere il movimento osservato.

I risultati ottenuti hanno avvalorato quest'ipotesi, dimostrando che l'osservazione di movimenti dell'arto superiore, sia transitivi che intransitivi, determinano un aumento selettivo dei MEP registrati dai muscoli della mano e del braccio, rispetto alle condizioni di controllo.

La scoperta dell'attivazione del sistema *mirror* umano all'osservazione di movimenti intransitivi e non solo all'osservazione di movimenti transitivi, come avviene nella scimmia, è stata confermata da successivi studi (Iacoboni et al., 1999; Maeda et al., 2002).

Il sistema *mirror* nell'uomo presenta quindi importanti differenze rispetto a quanto osservato nella scimmia, perché risulta attivo anche per movimenti intransitivi privi di significato (Fadiga et al., 1995; Iacoboni et al., 1999; Maeda et al., 2002).

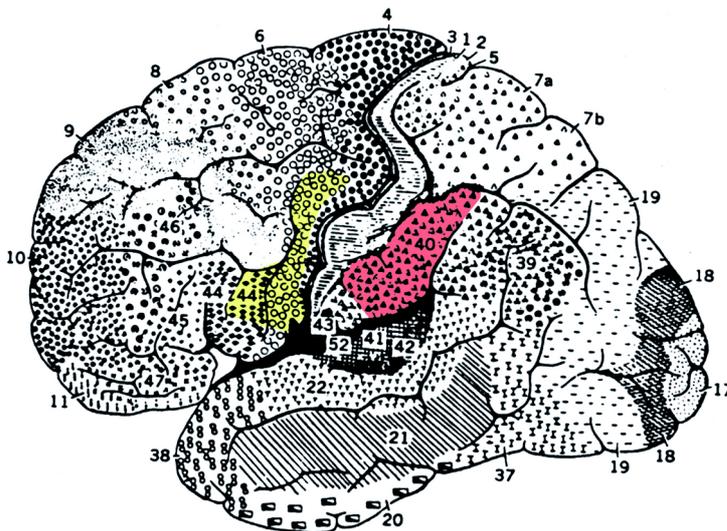


Fig. 6 Visione laterale di un cervello umano che mostra le aree (colorate) che formano il sistema specchio.

Nell'uomo l'osservazione di azioni determina un'attivazione del sistema motorio localizzabile nelle aree visive occipitali, nella regione del solco temporale superiore (STS), nel lobulo parietale inferiore, nella corteccia premotoria ventrale (PMv) e nell'area di Broca (Rizzolatti et al., 1996b; Grafton et al., 1996; Grèzes et al., 1998; Iacoboni et al., 1999). Anche nella scimmia l'osservazione di azioni compiute da altri determina la risposta di neuroni della regione del STS, del lobulo parietale inferiore e dell'area F5 della corteccia premotoria ventrale, fatto che suggerisce un'elevata corrispondenza tra questo sistema nell'uomo e nella scimmia, come confermato da studi citoarchitettonici che indicano che la *pars opercularis* del giro frontale inferiore (IFG), corrispondente all'area 44 di Brodmann (BA44), potrebbe rappresentare l'omologo umano dell'area F5 della scimmia (Petrides et al. 2005). Questo dato è confermato da studi di *brain imaging* che dimostrano che la BA44 dell'uomo contiene una rappresentazione motoria della mano, proprio come l'area F5 della scimmia (Binkofski et al., 1999; Iacoboni et al., 1999; Schubotz, Von Cramon, 2001) che dimostrano l'omologia anche dal punto di vista funzionale. La similarità dell'organizzazione somatotopica osservata nel lobulo parietale inferiore è confermata anche per il lobo frontale: l'osservazione di movimenti della mano e della bocca determina l'attivazione della *pars opercularis* del giro frontale inferiore (BA44), confermando l'omologia con l'area F5 della scimmia, mentre l'osservazione di movimenti della spalla e dell'arto superiore determina l'attivazione della corteccia premotoria ventrale, che si ritiene corrispondente all'area F4 della scimmia (Buccino et al. 2001).

Sulla base della letteratura citata si evince che il sistema *mirror* nell'uomo comprende tre regioni principali: una frontale, una parietale ed una temporale. La regione frontale comprende l'area premotoria ventrale,

che occupa la porzione inferiore del giro precentrale, e l'area di Broca, corrispondente alle aree 44 e 45 di Brodmann (BA44 e BA45), che occupano rispettivamente la *pars opercularis* e la *pars triangularis* del giro frontale inferiore. La regione parietale è rappresentata dalla BA40 o PF e dalla BA39 che costituiscono il lobulo parietale inferiore. La regione temporale è rappresentata dalla porzione posteriore del solco temporale superiore che comprende parte dell'area 22 di Brodmann. Occorre specificare che il STS non ha neuroni motori, ma solo visivi quindi non è propriamente *mirror* anche se fa parte del circuito. Questo sistema di risonanza motoria ha sviluppato importanti differenze nel corso dell'evoluzione, come è possibile evincere dalle differenze di attivazione riscontrabili nella scimmia e nell'uomo. Nell'uomo il sistema *mirror* è attivato anche da azioni mimate, cioè azioni intransitive ma aventi significato (Buccino et al., 2001; Grèzes et al., 2003) e da azioni intransitive anche prive di significato (Fadiga et al. 1995; Iacoboni et al. 1999), mentre nella scimmia l'attivazione del sistema *mirror* richiede l'interazione con un oggetto, per cui azioni intransitive, anche se aventi significato, non evocano una risposta. Inoltre, nell'uomo, il sistema *mirror* è in grado di descrivere sia lo scopo di un'azione sia come essa venga eseguita, in termini di sequenza temporale dell'attivazione dei diversi muscoli coinvolti.

1.4 Il sistema *mirror* e il linguaggio

Da quanto esposto fin ora, risulta chiaro che il sistema *mirror* costituisce il substrato neuronale di un meccanismo che permette all'osservatore la comprensione diretta delle azioni compiute dagli altri, senza bisogno di mediazioni cognitive: crea, perciò, un legame diretto tra il mittente e ricevente di un messaggio. Questo legame ha suggerito che il sistema

mirror rappresenti il meccanismo neurofisiologico che ha permesso l'evoluzione del linguaggio (Rizzolatti, Arbib 1998).

Le teorie dell'evoluzione del linguaggio si snodano attorno a due filoni: il primo ritiene il linguaggio un'evoluzione dei richiami degli animali (*primate insolation call*: Lieberman 2002), il secondo trova le basi di questa evoluzione nella comunicazione gestuale (Rizzolatti, Arbib 1998; Corballis, 1991, 1992; Kimura, 1993). È stato proposto che il sistema *mirror* possa costituire il meccanismo che ha permesso l'evoluzione dalla comunicazione gestuale a quella vocale (Rizzolatti, Arbib 1998). Questo sistema, in origine sviluppatosi per la comprensione delle azioni compiute dagli altri individui, creando un legame semantico non arbitrario e comune tra due individui che comunicano rappresenterebbe il substrato neurale per il requisito della parità del linguaggio, che prevede che gli elementi rilevanti ai fini comunicativi debbano essere condivisi da emittente e ricevente dello stesso messaggio, pena la mancata efficacia della comunicazione.

Tuttavia, il sistema *mirror* nelle scimmie si attiva solo per azioni transitive, e non per i gesti, quindi il primo problema che deve affrontare la teoria dei neuroni *mirror* per l'evoluzione del linguaggio è spiegare come questo sistema chiuso e incentrato sull'interazione tra effettore e oggetto sia diventato un sistema aperto, in grado di descrivere azioni e oggetti senza che questi siano presenti. E' probabile che il balzo evolutivo sia attribuibile allo sviluppo della capacità di imitazione (Arbib, 2002) e dai relativi cambiamenti del sistema *mirror* nell'uomo: le capacità di rispondere ad azioni mimate (Buccino et al., 2001, Grezes et al., 2003) e ad azioni intransitive (Fadiga et al. 1995; Iacoboni et al. 1999; Maeda et al. 2002), capacità assenti nella scimmia.

L'idea che azioni comunicative derivino da azioni evolutivamente precedenti di tipo transitivo venne formulata primariamente da Vygotsky (Vygotsky 1934) che individuava l'origine dei movimenti di puntamento tipici dei bambini nel tentativo di afferrare oggetti lontani.

L'esistenza di un legame neurofisiologico, tra azioni a scopo nutritivo e azioni a scopo comunicativo, è confermata dalle proprietà dei neuroni *mirror* della bocca presenti nell'area F5 della scimmia (Ferrari et al., 2003). Analogamente, McNeilage (McNeilage, 1998) ha suggerito che la comunicazione vocale umana possa derivare dai movimenti ciclici di apertura e chiusura della mandibola, originariamente compiuti per nutrirsi. Si può quindi ipotizzare che nell'uomo azioni mimate e varie azioni intransitive siano state progressivamente incorporate nel sistema *mirror*, che in questo modo avrebbe acquisito proprietà comunicative.

L'ipotesi che il linguaggio verbale si sia evoluto da un sistema di comunicazione basato su gesti manuali e successivamente oro-laringei implica che nell'uomo debba esistere una classe particolare di neuroni *mirror*, che permetta un acceso uditivo alla rappresentazione delle azioni.

Nell'area F5 della scimmia si trova una classe di neuroni, detti *mirror* audio-visivi, che si attivano sia quando la scimmia compie un'azione "rumorosa", sia quando essa ascolta il suono corrispondente alla stessa azione (Kohler et al., 2002). Tuttavia, nella scimmia, questi neuroni audio-visivi rispondono solo ad azioni transitive, pertanto non sono sufficienti a creare un sistema di comunicazione intenzionale efficiente.

Nell'uomo, la comunicazione verbale deve essere originata dall'associazione di suoni ad azioni intransitive e pantomime fatti con le mani e la bocca.

In effetti, la scoperta dei neuroni *mirror* audio-visivi nella scimmia e dei neuroni *eco-mirror* nell'uomo indica che, indipendentemente dalla natura sensoriale dello stimolo percepito, il sistema *mirror* entra in risonanza ed attiva la rappresentazione motoria correlata allo stimolo, purché questa sia compresa entro il proprio "vocabolario di azioni", posto nella corteccia frontale.

1.5 Evoluzione del linguaggio ed evoluzione umana

Secondo Corballis (2002) le origini del linguaggio non riguardano solo la bocca, ma anche la mano ed è grazie a questa interazione che prenderebbe corpo la voce.

I dati sperimentali (Petrides et al 2005; Binkofski et al. 1999; Iacoboni et al. 1999; Schubotz, Von Cramon 2001) dimostrano che la porzione posteriore dell'area di Broca dell'uomo (BA44), corrispondente alla *pars opercularis* del giro frontale inferiore sinistro, presenta un'omologia citoarchitettonica e funzionale con l'area F5 della scimmia ove sono stati originariamente trovati i neuroni *mirror*. Emerge la possibilità che l'area di Broca possa costituire un substrato neurale per la comprensione delle azioni compiute dagli altri individui, al pari dell'area F5. La spiegazione del percorso evolutivo che ha portato un'area premotoria con le proprietà dell'area F5 della scimmia ad assumere un ruolo preminente nella comunicazione è una sfida in grado di far confluire verso lo stesso ambito di indagine discipline tra loro lontanissime, come le neuroscienze, l'antropologia e l'archeologia preistorica.

Si può ipotizzare che nel percorso evolutivo del genere *Homo*, il sistema *mirror* si sia progressivamente esteso dalle azioni transitive alle azioni mimate ed ai gesti intransitivi e che queste acquisizioni abbiano

permesso a questo meccanismo di veicolare un sistema di comunicazione intenzionale.

La pressione evolutiva ha favorito lo sviluppo e il raffinamento di un meccanismo neurale di controllo della fonazione, tramite il quale è possibile non solo emettere suoni, ma anche combinarli tra loro in via pressoché infinita, favorendo, in questo modo, l'affrancamento del sistema vocale da quello gestuale. La capacità umana di apprendere per imitazione, possibile grazie alla trasformazione di informazioni sensoriali in atti motori e che porta alla condivisione dello stesso vocabolario motorio tra attore e osservatore, potrebbe aver giocato un ruolo fondamentale nella diffusione di questo meccanismo. L'affrancamento completo del sistema vocale da quello gestuale potrebbe risalire alla comparsa di *Homo sapiens* anatomicamente moderno (*Anatomically Modern Human*: AMH), i cui caratteri fenotipici appaiono stabilmente intorno a 154-160.000 anni da oggi (Lieberman et al. 2002; White et al. 2003; Desmond Clark et al. 2003, Schwartz, Tattersall 2002).

Lieberman, codificando la teoria motoria sull'evoluzione del linguaggio, secondo la quale i costituenti ultimi dello speech non sono i suoni, ma gesti articolatori evolutisi esclusivamente per questo scopo (Lieberman 1967, 1985; 2000; 2001) ha più volte focalizzato l'attenzione sul fatto che ciò che conta davvero nella comunicazione linguistica, non è il suono, ma il gesto articolatorio da cui questo suono genera e tramite il quale è reso possibile.

Qualche anno fa è stata scoperta una classe particolare di neuroni *mirror* che permette l'accesso uditivo alla rappresentazione delle azioni, la cui esistenza ha permesso di codificare l'esistenza di meccanismo di risonanza audio-motoria ("eco-*mirror*") attivato dall'ascolto di stimoli verbali (Fadiga et al., 2002; Rizzolatti, Buccino 2005). Questa scoperta

avvalora quanto sostenuto da Liberman e cioè che la transizione verso un sistema vocale affrancato da quello gestuale ha comportato necessariamente che i neuroni motori responsabili del controllo dei gesti articolatori orolaringei acquisissero la capacità di trasformare suoni verbali nella rappresentazione motoria dei gesti articolatori corrispondenti.

Il meccanismo dei neuroni specchio, inizialmente deputato al riconoscimento delle azioni altrui e privo di funzioni comunicative di tipo intenzionale, potrebbe aver costituito il sostrato neurale per la formazione di quella che viene definita “cultura mimica” (Donald 1991) e che avrebbe visto il suo focus di sviluppo grazie alla comparsa di *Homo habilis* prima ed *erectus* poi, nell’arco di tempo che va dai 2.6 ai 1.5 milioni di anni da oggi.

L’accresciuta capacità manuale di questi primi ominidi e le implicazioni evolutive che tale capacità potrebbe aver avuto ai fini di un’evoluzione linguistica, saranno oggetto del prossimo capitolo, così come la descrizione delle prime attestazioni di un comportamento motorio finalizzato e intenzionale nel corso della nostra storia evolutiva.

“Le monde vivant est caractérisé par l’exploitation physico-chimique de la matière. Aux deux extrêmes figures deux modes d’exploitation qui impliquent, l’un la mise en valeur de la matière, pourrait-on dire, par affrontement direct de la molécule exploitée par la molécule exploitante (...), l’autre une consommation en quelque sorte hiérarchisée qui exploite la matière inerte à travers une chaîne d’êtres vivants (...).”

André Leroi-Gourhan “Le geste et la parole. Technique et langage”

CAPITOLO 2: L’UOMO E LA MATERIA

Il più grande insegnamento di Leroi-Gourhan è che ogni archeologo o antropologo, deve costruirsi da sé i propri paradigmi, perché non esiste nessuna disciplina tanto interdisciplinare quanto la scienza dell’uomo. Quello scelto in questo lavoro passa per la materia, trasformata e percepita da un agente che chiameremo *Homo* e che, in questo mutuo rapporto, ha percorso una traiettoria di cui il solo arrivo è certo. È possibile tracciare la realtà di *Homo* solo attraverso i testimoni che ha lasciato ed è a questi che ci rivolgeremo, senza trascurare la relazione che è intercorsa tra i due soggetti di questo lavoro: l’uomo e la materia, appunto.

Nel rapporto dell’uomo con la materia, esiste una costante capace di legare i manufatti riferibili al Paleolitico inferiore con l’odierna tecnologia: il silicio, la sottile linea rossa che collega Kada Gona in Etiopia, con Silicon Valley in California.

Secondo la definizione che ne dà l’Enciclopedia Treccani, il silicio è un “elemento chimico di simbolo Si, numero atomico 14, peso atomico

28,09, tetravalente, appartenente al quarto gruppo del sistema periodico: mai libero in natura, è, dopo l'ossigeno, l'elemento più abbondante della crosta terrestre, in combinazione sotto forma di ossido o di silicato. Ottenuto puro con diversi processi, soprattutto per trattamento al forno elettrico della silice con carbone, si presenta sotto forma di cristalli scuri aventi un reticolo simile a quello del diamante; viene usato, tra l'altro, per la preparazione di siliciuri, per indurire leghe a base di alluminio, magnesio o rame, nella preparazione di acciai speciali; è il più importante materiale semiconduttore, ed è quindi largamente usato in elettronica, spesso sotto forma di monocristallo, nella realizzazione di giunzioni per ogni tipo di dispositivo: diodi, transistori, circuiti integrati, ecc.: transistor al s., circuiti al s.; rivelatori al s., rivelatori di particelle che sfruttano la corrente sviluppata attraverso un diodo a giunzione in silicio, polarizzato inversamente, dalle coppie elettrone-lacuna prodotte nel silicio dal passaggio di una particella. Tra i suoi composti, hanno importanza il carburo di s., preparato scaldando al forno elettrico sabbia silicea e carbone e usato come abrasivo e come refrattario, il tetracloruro di s., o tetraclorosilano, usato come intermedio nella preparazione di vari composti del silicio, fra cui i siliconi, e il tetrafluoruro di s., o tetrafluorosilano, intermedio nella preparazione dell'acido fluosilicico e della criolite sintetica".

Il silicio, quindi, combinato con vari elementi, costituisce, in peso, circa un terzo dell'intera superficie terrestre.

La selce è una roccia sedimentaria esogena composta quasi esclusivamente di silice, che deriva cioè da processi che avvengono sulla superficie terrestre, risultanti dall'accumulo di materiali provenienti dall'alterazione di rocce preesistenti, successivamente depositi da agenti naturali o antropici in prossimità della crosta terrestre: per ragioni di

conservazione, le tracce della prima attività umana archeologicamente documentabile passano per questo materiale.

La selce non è l'unico materiale usato dall'uomo nel corso della preistoria: insieme a lave a grana fine, come basalto, trachite o andesite, o a tessitura vetrosa, come l'ossidiana, o a quarzite e quarzo filoniano, ha accompagnato e scandito il fatto umano e la sua evoluzione.

Prima di trattare delle forme assunte da queste attività umane, occorre innanzitutto definire quali sono le proprietà fisiche di questo materiale che ne hanno permesso lo sfruttamento intensivo nel corso del Paleolitico.

2.1 Parametri tecnici su cui si fonda il frazionamento delle rocce dure

Le proprietà dei minerali cambiano a seconda della disposizione e della direzione che assumono tra loro gli atomi lungo piani o assi: ne consegue, quindi, che definiremo anisotropi i minerali le cui proprietà vettoriali cambiano con la direzione e isotropi quelli le cui proprietà fisiche si mantengono costanti in qualsiasi direzione. La selce appartiene a questa seconda categoria di materiali.

La rottura di un cristallo può avvenire lungo superfici irregolari (frattura) o lungo superfici piane e regolari dette piani di clivaggio. Questi piani di sfaldatura sono paralleli alle facce cristallografiche del reticolo cristallino, che rappresentano superfici di discontinuità e che possiedono quindi una minore resistenza alla rottura. Per questa ragione, la sfaldatura di un cristallo rispecchia frequentemente la forma del reticolo cristallino e l'angolo dei piani di sfaldatura costituisce quindi un carattere diagnostico per la determinazione dei minerali. I legami tra le diverse facce cristallografiche di un minerale controllano inoltre la facilità con

cui i piani di sfaldatura si separano. L'assenza di sfaldatura è una proprietà ampiamente utilizzata durante la preistoria come base teorica per la frattura concoidale, cioè una frattura che non avviene lungo i naturali piani di separazione, detta anche “frattura fragile” perché sviluppata in materiali fragili caratterizzati da superfici piuttosto lisce. La possibilità di ottenere manufatti litici mediante scheggiatura si basa sul fatto che alcuni materiali non possiedono sfaldatura, ma si rompono lungo superfici irregolari, non piane o curve (Weiner, Addadi 1997).

La frattura concoidale, la sua padronanza e applicazione hanno permesso la nascita della tecnologia, definita, secondo le linee teoriche dettate da Haudricourt (1964) e Leroi-Gourhan (1964), come scienza definita “umana” in quanto prodotto della conoscenza e della attività organizzata dell'uomo e il cui studio interessa tutto ciò che concerne l'azione dell'uomo sulla materia. Valore euristico della tecnologia. L'oggetto è un “fatto sociale totale” (Mauss 1924), la produzione tecnologica permette l'integrazione della produzione materiale nel tessuto socio-economico dei gruppi produttori. Lo studio tecnologico reintegra la produzione in un sistema tecnico specifico.

La tecnologia è un fenomeno transitivo, nel senso che permette una transizione verso altro, tracciando l'evoluzione di un comportamento.

Secondo la definizione che Karlin e Pelegrin (*Dictionnaire de la Préhistoire*, Leroi-Gourhan ed. 1988), la tecnologia preistorica cerca di riconoscere i processi di acquisizione, utilizzo e consumo dei diversi materiali e prodotti naturali da parte di un gruppo, sia che si siano conservati nel record archeologico, sia che ne restino solo tracce indirette. Questo tipo di analisi sottende due livelli di indagine: un'“economia delle materie prime” o modo di gestione delle stesse, dedotta sulla base della selezione dei materiali utilizzati e un'“economia

del *débitage*”, che si interessa della destinazione dei prodotti finiti e della loro trasformazione (Perlès 1991).

Nell’esecuzione dell’atto tecnico volto alla trasformazione della materia prima in prodotto finito, si codifica e applica quella che Leroi-Gourhan (1943) definisce *chaîne opératoire*, termine che designa la successione effettivamente realizzata di tutti i gesti e le tappe che rendono possibile la metamorfosi da materiale grezzo a strumento. Che questo processo sia metamorfico, ci è suggerito dall’osservazione che non è possibile ridurre la complessità di questa catena di operazioni alla semplice ripetizione di gesti elementari e fissi, concatenati in una sequenza, dal momento che, via via, si impone il rispetto di una successione di forme di riferimento, cioè proiezioni di stati possibili della materia e la combinazione di azioni elementari di volta in volta possibili e sostenibili.

Nella combinazione di questi gesti, oltre alla meccanica della frattura delle rocce dure, occorre tenere presenti alcuni parametri fondamentali, quali il gesto, l’angolo, la relazione tra la forza del colpo e il punto di impatto; ignorare uno solo di questi parametri, comporta la mancata realizzazione dell’obiettivo. Prima di entrare nel dettaglio di questi argomenti, occorre ripercorrere, seppure brevemente, l’evoluzione tecnica del comportamento umano, a partire dalle prime testimonianze materiali che ne sono state ritrovate.

2.2 Evoluzione del comportamento tecnico umano

I criteri fondanti della definizione di umanità sono la stazione eretta abituale, la faccia corta e la mano libera durante la locomozione: quest’ultimo criterio presenta due corollari importanti.

Il primo comporta, per *Homo*, l'assenza di armi e strumenti naturali come unghie, zanne etc.; il secondo prevede la loro sostituzione con strumenti e armi amovibili, ottenuti mediante sequenze acquisite per apprendimento. Possiamo quindi individuare l'inizio della vita di uno strumento nella ricerca della materia prima adatta alla sua realizzazione e la sua fine nell'abbandono che segue il suo utilizzo sino ad esaurimento, secondo lo schema delineato da Geneste (1985).

FASE 0	FASE 1	FASE 2	FASE 3	FASE 4	FASE 5
Acquisizione e scelta della materia prima	Preparazione del blocco in vista della fase 2: débitage o aménagement immediato; fase caratterizzata dal distaccamento di schegge corticali o d'entame.	Débitage dei prodotti grezzi (schegge, lame, punte...) SOTTOFASI: a): preparazione del piano di percussione e ravvivamenti; b): débitage; c): rimessa in forma del nucleo; d): abbandono del nucleo.	Façonnage e ritocco degli strumenti sui supporti ottenuti nella fase 2.	Utilizzo: utilizzo, ravvivamento, riciclaggio, trasformazione.	Abbandono: abbandono, frattura, usura.

Fig.1: fasi della catena operativa secondo Geneste (1985: modificato).

Lo strumento è la manifestazione prima e quasi biologica della “speciazione etnica”, sia di per sé, sia per la sua associazione con il

linguaggio: faccia e mano sono così strettamente associate nell'evoluzione cerebrale che possiamo affermare che lo strumento per la mano e il linguaggio per la faccia siano due poli di uno stesso dispositivo, secondo la linea teorica tracciata da Leroi-Gourhan (1964).

Secondo Karlin e Pelegrin (*Dictionnaire de la Préhistoire*, Leroi-Gourhan eds.1988) per strumento si intendono tutti gli “oggetti tramite i quali l'uomo interviene sulla materia prolungando la sua mano al fine di specializzarla in funzione di obiettivi tecnici da realizzare.”

Lo strumento può comporsi di uno o più elementi; si definisce strumento composto quando la composizione gli conferisce proprietà particolari, come articolazione mobile o trasformazione della forza esercitata.

Sotto il termine “strumento” sono compresi:

- oggetti o elementi intenzionalmente fabbricati per *façonnage*, ritocco o politura;
- oggetti naturali, come percussori;
- oggetti “*bruts*” derivanti dal *débitage*.

L'operazione di frazionamento di rocce dure (o operazione di taglio), sia tramite la tecnica di percussione, sia per pressione, ha per finalità la produzione di supporti e strumenti.

Le operazioni di taglio, eventualmente associate tra loro, sono di tre tipi:

1. *façonnage*, che consiste nel taglio di un blocco o di un frammento di roccia dura tramite stacchi successivi al fine di abbozzare una forma (bifacciale, foglia di lauro, *hachereau*..)
2. *débitage*, operazione caratterizzata dalla produzione di schegge, lame e o lamelle destinate all'uso, a partire da un blocco o frammento di roccia chiamato nucleo, spesso precedentemente *façonné* per dargli una forma particolare prima della fase di *débitage* propriamente detta. Questa messa in forma preparatoria consente di ottenere prodotti di dimensioni predeterminate; nel corso del *débitage*, un certo numero di stacchi sono

funzionali al mantenimento delle convessità atte al taglio o alla preparazione di stacchi successivi. Questi distacchi, chiamati *déchets de débitage*, sono caratteristici del metodo adottato.

3. ritocco, che consiste nella modifica di un supporto al fine di realizzare, compiere o ravvivare uno strumento.

A queste tre operazioni sono spesso associati gesti la cui finalità non è immediata, ma preparatoria al seguito del lavoro; tali distacchi sono definiti come funzionali al mantenimento delle convessità atte al prosieguo dell'attività di taglio o come ripreparazioni del nucleo per consentire la prosecuzione della scheggiatura; tali gesti consentono, inoltre, di risalire al metodo di scheggiatura utilizzato e anche di individuare momenti e fasi precise della *chaîne opératoire*.

Per *chaîne opératoire* o catena operativa, si intende un'attività di fabbricazione di strumenti avente le seguenti caratteristiche:

- diverse fasi, marcate da cambiamenti nelle operazioni tecniche eseguite dallo scheggiatore (sgrossatura, messa in forma preparatoria del nucleo, *débitage*, preparazione dei distacchi successivi, rimessa in forma del nucleo e mantenimento delle convessità adatte al *débitage*..) e/o cambiamenti nella tecnica adottata (percussione diretta al percussore duro o tenero, percussione indiretta, percussione al percussore organico, pressione..);
- il risultato della catena operativa, è un prodotto finito che ha caratteristiche che non dipendono dalla materia prima utilizzata per ottenerlo.
- Infine, la catena operativa richiede una complessa organizzazione di stacchi interdipendenti per quanto riguarda le loro caratteristiche geometriche, sia tra di loro (stacchi predeterminati), sia tra i loro negativi (stacchi predeterminanti).

Per una trattazione esaustiva del concetto di predeterminazione, si rimanda alla monografia di Boëda (1986).

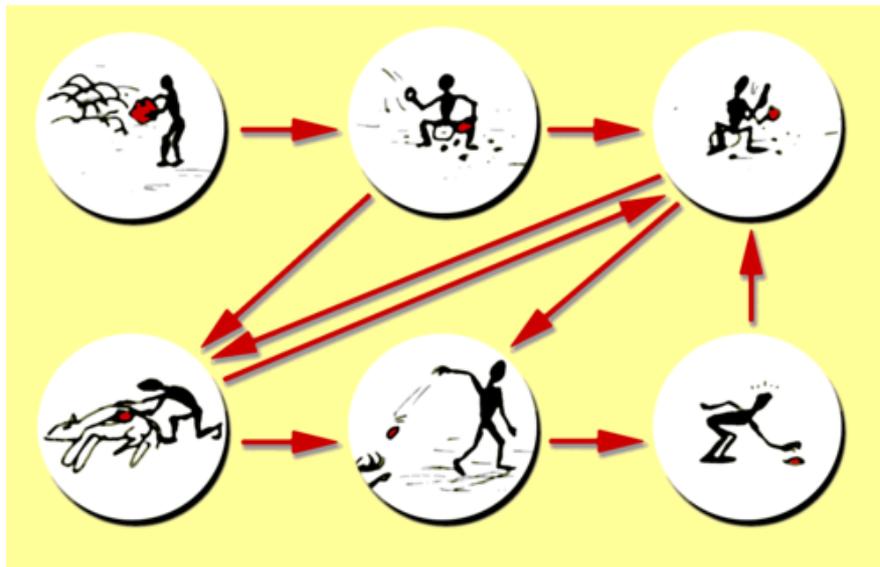


Fig.2: schema della *chaîne opératoire* secondo Leroi-Gourhan (1964, modificato).

La successione dei gesti tecnici successivi secondo posizioni e ordine determinati dallo scheggiatore in una catena operativa, costituiscono il metodo di scheggiatura. La ricostruzione della catena operativa avviene mediante la sperimentazione e i rimontaggi del materiale trovato *in situ*, e mostra l'organizzazione (talvolta molto complessa) della successione e organizzazione degli stacchi. L'analisi delle intenzioni che sottendono questi gesti e questi stadi, tenendo conto delle restrizioni e degli obblighi tecnici derivanti dalla materia prima, permettono di riconoscere lo schema operativo concettuale prevalente al momento dell'esecuzione e creazione di questa industria e, eventualmente, una tipocronologia riconducibile a un Modo definito.

Per industria si intende l'insieme delle tecniche e delle attività tramite le quali un gruppo umano trasforma la materia prima per ottenerne

strumenti; per metonimia, si intende anche la collezione degli oggetti risultanti da queste attività.

Nello studio della *chaîne opératoire* della fabbricazione di strumenti, occorre includere oggetti finiti, scarti di fabbricazione, strutture archeologiche a loro associate ed eventuali rimontaggi. Uno studio concepito in questo modo, permette di suddividere la catena operativa in stadi o tappe, costituite da una serie di gesti derivanti da una stessa tecnica o da una stessa finalità. Questo permette di dedurre gli schemi operativi concettuali che sottendono tutte le attività tecniche le cui tracce strutturano lo spazio archeologico.

L'archeologia sperimentale, associata all'interpretazione e alla sintesi di queste informazioni, tenuto conto degli impedimenti dell'ambiente e dei materiali, permette di distinguere le scelte tecniche specifiche e tradizionali di un gruppo preistorico e, di conseguenza, di avvicinarsi alla sua cultura materiale ed economia. Tramite l'insieme di questi dati e analisi, è possibile cercare di comprendere il senso della stabilità, evoluzione e i cambiamenti che avvengono all'interno di un sistema tecnico (Inizan et al. 1995).

Tre sono le variabili che sottendono e concorrono alla creazione di uno strumento: il concetto, il metodo e la tecnica.

Il concetto sottende l'operazione, è ciò che ne costituisce la base teorica, ciò che applico prima di iniziare la creazione dello strumento. Il concetto semplice che appare comunque innegabilmente sottendere qualunque catena operativa, è quello del concatenare distacchi partendo da un diedro non ottuso.

Il metodo è l'applicazione di uno schema concettuale preliminare, socialmente acquisito, stabile nel corso del tempo (nel momento, però, in cui tale schema raggiunge la non perfezionabilità concettuale e di applicazione pratica), identificabile e rintracciabile nel prodotto materiale

derivante dalla sua applicazione. Il metodo dà luogo a un processo tecnico, costituito da una molteplicità di *chaînes opératoires*, che sono il tramite tra la materia e il supporto.

La tecnica afferisce alla sfera del “come” ottengo lo strumento desiderato, mediante quali strumenti, secondo la capacità meta-strumentale definita de Leroi-Gourhan, secondo il quale l’uomo è in grado di costruire strumenti per ottenere altri strumenti (Leroi-Gourhan 1964).

Secondo quanto delineato sinora, risulta chiaro che non è possibile ridurre la complessità, teorica e pratica, di una catena operativa alla semplice ripetizione di gesti elementari e fissi, concatenati in una sequenza, dal momento che, via via, si impone il rispetto di una successione di forme di riferimento, cioè proiezioni di stati possibili della materia e la combinazione di azioni elementari di volta in volta possibili e sostenibili.

Leroi-Gourhan (1964) sottolineava che occorre considerare lo strumentario litico come relitto di un ventaglio di possibilità sicuramente più ampio, ma di cui non ci è rimasta traccia perché presumibilmente costruito con materie prime deperibili, quali legno o osso. Questa precisazione introduce alcune considerazioni riguardo l’antichità del comportamento tecnico umano e le sue origini.

Le prime industrie di Kada Gona (Etiopia), datate a 2.6 Mya (Semaw 2000; Semaw et al. 2006) insieme a quelle del sito di Lokalalei 2C (bacino del Turkana, Kenia), datate a 2.3 Mya (Roche et al. 1999; Delagnes, Roche 2005), sono considerate la prima testimonianza dell’attività tecnologica.

La paternità di queste industrie rimane controversa, dal momento che non esiste nessuna relazione stratigrafica tra il resto umano e quello industriale.

È stato più volte ipotizzato che queste industrie siano riferibili ad *Australopithecus* (*garhi* – come ipotizzato da Semaw (2000) o *aethiopicus*) e, sinora, nessun dato evidente può escludere definitivamente questa ipotesi, primariamente tracciata da Dart (1958, 1960) che ipotizzò anche l'esistenza di una cultura osteodontocheratica tra le Australopithecine di cui non sarebbe rimasta traccia per ovvi motivi di conservazione.

Per le industrie di Lokalalei 2C, più che per quelle di Kada Gona, risulta evidente l'esistenza di un débitage organizzato, con completa padronanza delle strutture e della pianificazione tecnica (Delagnes, Roche 2005). L'obiettivo tecnico che accomuna queste industrie sembra essere la ricerca di margini taglienti, probabilmente utilizzati nel processamento delle carcasse e, quindi, volti all'accesso a migliori risorse alimentari (Semaw 2000).

Queste prime industrie dimostrano un'innegabile evidenza di frattura intenzionale, che sottende una conoscenza empirica e la comprensione della meccanica della frattura concoidale. Ciò che, al contrario, risulta difficile da sostenere, è che queste evidenze rappresentino l'"infanzia della tecnologia", così come è difficile identificare, sebbene sia lecito ipotizzare, che pietre modificate fossero utilizzate già prima di 2.6 Mya. L'esistenza di uno stadio di sviluppo o gestazione tecnologica pre-Olduvaiano mette in discussione la definizione stessa di questo modo: se esso fosse configurabile come paradigma unico, la sua unicità comporterebbe anche un'unica specie responsabile della sua creazione. Questo paradigma sembra scardinato dal fatto che sembra improbabile che gruppi di ominidi differenti possano aver condiviso le medesime tecniche e tradizione culturali per oltre un milione di anni in territori distanti tra loro, sebbene sia lecito supporre una trasmissione della conoscenza interna al gruppo.

Occorre comunque sottolineare che, sebbene il gesto di scheggiatura sia uno, è pur sempre vero che esistono molteplici vie per combinare le sequenze di queste azioni elementari e che queste combinazioni si traducono in sequenze diverse di scheggiatura e individualizzano e caratterizzano le abilità peculiari di un gruppo o di un singolo.



Fig. 3: chopper core, Kada Gona, Etiopia.



Fig. 4: strumento su scheggia, Kada Gona, Etiopia.



Fig.5: rimontaggio, Kada Gona, Etiopia (Immagini: courtesy of Sileshi Semaw).

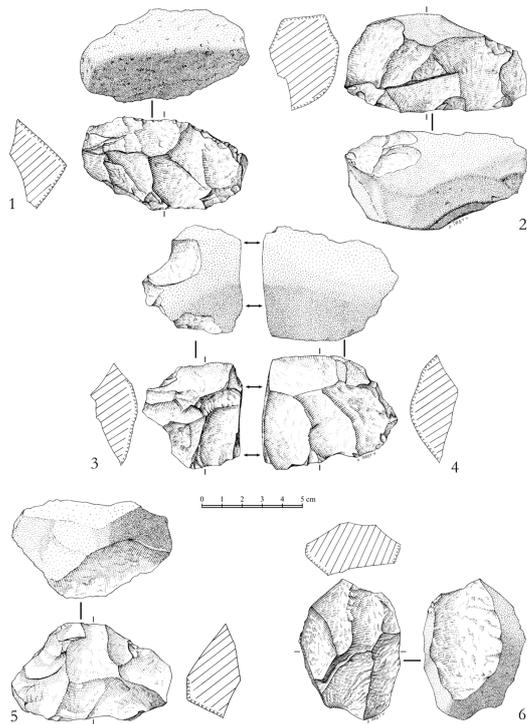


Fig.6: nuclei, Lokalalei 2C, Kenia, Delagnes, Roche 2005.

2.3 La scheggiatura come attività motoria intenzionale e ideazionale

Il rispetto “tecnico” dei principi sin qui descritti porta, via via, alla nascita della tecnologia, percorrendo la strada della “*knowledge*” e del

know-how. *Know-how* (o *savoir-faire*) e *knowledge* (o *connaissance*), come sottolineato da Pelegrin (1991) sono due fenomeni strettamente legati alla materia, ma anche profondamente differenti tra loro.

La conoscenza, invece, è un fatto “mentale”, puramente intellettuale, se vogliamo, è dichiarativa e socialmente trasmessa; comporta l’esistenza di rappresentazioni mentali di forme di riferimento e la codifica di un registro di modalità di azione, cioè di gesti associati al loro risultato pratico. Costituisce, perciò una memoria procedurale, che comporta una memorizzazione di forme e di azioni elementari, probabilmente acquisibile tramite semplice osservazione.

La tecnica è strettamente fisica, implicita in quanto legata alle restrizioni imposte dalla materia, esperienziale e appresa tramite la sua applicazione costante: si configura, quindi, come un saper fare “motorio”, perché prevede la programmazione e progettazione di gesti, configurabili a loro volta come operazioni intuitive condotte sulla base dei parametri sensoriali, propriocettivi e fisici, legati allo scheggiatore, i primi, alla materia, i secondi.

Questi due aspetti mettono in evidenza come il *débitage* sia un’attività ideomotoria, perché sottende un periodo di apprendimento, che coinvolge capacità psicomotorie il cui sviluppo può essere rintracciato nel corso di tutta l’evoluzione umana e che comporta il riconoscimento di diversi livelli di specializzazione, sia in chiave sincronica, cioè all’interno di uno stesso gruppo, sia in chiave diacronica, cioè nel corso del Paleolitico.

Il comportamento tecnico, secondo quanto appena delineato, presenta tre componenti principali:

- una componente innata, confermata anche dalle ricerche primatologiche, che testimoniano dell’esistenza dell’azione percussiva anche presso i primati, sebbene questi comportamenti rappresentino quello che sembra essere un semplice “martellare”;

- una componente acquisita, cioè un comportamento appreso per imitazione;
- una componente concettuale di codifica dell'atto tecnico che determina la possibilità di un grado di libertà individuale che comporta una standardizzazione del gesto, più che della forma, in una stereotipizzazione che si limita al modulo, ma non interferisce sul risultato finale o, almeno, non è immediatamente visibile.

La connotazione del comportamento “scheggiatura” come ideomotorio, ci rimanda a quanto evidenziato nel primo capitolo di questa trattazione. L'atto dello scheggiare rientrava, per averlo sempre visto, nel repertorio motorio degli apprendisti scheggiatori: come sappiamo, le evidenze sperimentali hanno sottolineato il ruolo del sistema motorio non solo nell'esecuzione dell'azione, ma anche nella sua comprensione, secondo l'osservazione che la trasformazione visuomotoria consente l'accesso all'informazione cognitiva (Rizzolatti et al. 1988), perché permette la trasformazione di un'informazione visiva in un atto motorio.

La specializzazione manuale degli uomini preistorici si sarebbe, secondo Pelegrin e Texier (2004), sviluppata in modo parallelo alla comprensione e al controllo dei parametri del *débitage*, permettendo quello che secondo Kuhn (2004) rappresenta la transizione dalla semplice estensione di denti e artigli alla cultura materiale.

Nel corso del prossimo capitolo saranno dettagliate le evidenze che ci permettono di parlare della nascita di una nuova disciplina, che coniuga il dato archeologico con l'evidenza neurofisiologica.

*Faust: “Non nell’imperturbabilità
cerco la mia salvezza.
So che il brivido è il meglio dell’umanità.
E per quanto il mondo cerchi di avvelenargli quell’istante,
l’uomo, quando è commosso, ha il senso profondo del prodigio”.*
*Mefistofele: “E allora inabissati!
Fuggi da ciò che è foggato verso i regni indefiniti delle forme possibili”.*
Johann Wolfgang von Goethe, Faust

CAPITOLO 3: NEUROSCIENZE E PREISTORIA. NEUROARCHEOLOGIA

Alcune scoperte nel campo delle neuroscienze, hanno evidenziato come le aree motorie giochino un ruolo non solo motorio, ma anche cognitivo, evidenziando attivazioni motorie per atti sia immaginati che visti (Buccino et al. 2001; Cross et al. 2006, 2009; Calvo Merino et al. 2005, 2006).

Sulla base delle osservazioni sperimentali condotte sui primati non umani (Fadiga et al. 1995; Rizzolatti et al. 2001; Rizzolatti, Craighero 2004) possiamo ipotizzare che il sistema mirror per il riconoscimento dell’azione fosse già presente nell’antenato comune tra primati non umani e *Homo*.

Le implicazioni funzionali del sistema *mirror* per il riconoscimento dell’azione manuale sono state espone nel primo capitolo del presente lavoro. Secondo quanto ipotizzato da Fadiga e collaboratori (Fadiga et al. 2007), lo step intermedio tra la rappresentazione di azioni e il linguaggio

articolato, potrebbe essere rappresentato dall'apparizione del *tool-making* – *tool-use*.

Quello che verrà dettagliato qui di seguito, sono le possibili inferenze tra le potenzialità e le implicazioni funzionali di questo sistema e la ricerca preistorica, secondo la prospettiva offerta dalle nuove frontiere su cui si sta affacciando la ricerca archeologica.

3.1 Neuroarcheologia: una nuova disciplina?

Con il termine “neuroarcheologia”, coniato da sir Colin Renfrew (2005) si intende quella nascente branca dell'archeologia che si interessa sia ai processi cognitivi e alle linee di sviluppo neurale che hanno accompagnato e intessuto la storia dell'evoluzione umana fin dall'apparizione del genere *Homo*, sia alla manifestazione archeologica di questi processi, cioè alla loro evidenza materiale ipotizzabile ed eventualmente rintracciabile in contesti archeologici.

In un record archeologico riferibile alla preistoria queste manifestazioni sono riconducibili a un limitato campione di materiali, tra i quali spicca, per ovvi motivi di conservazione, come già ricordato nel secondo capitolo di questo lavoro, il registro litico, fenomeno e testimonianza del progredire e dell'evolversi delle capacità umane in termini di manifestazioni tecniche e di progressione delle capacità cognitive e manuali. L'apparizione della tecnologia, per quanto concettualmente semplice come osservabile per l'Olduvaiano, marca indelebilmente la presenza del fatto umano (inteso come presenza umana concretamente rintracciabile in contesto archeologico) e consente di seguirne le linee

evolutive. Come già sottolineato da Binford (1962), infatti, lo strumento è il risultato statico di un processo dinamico.

L'equazione comportamento – architettura funzionale cerebrale è, però, insostenibile sia dal punto di vista teorico che pratico, anche perché l'evoluzione biologica non corrisponde pedissequamente all'evoluzione culturale, essendo possibile ipotizzare che un comportamento sia aristotelicamente più della somma delle sue parti.

3.2 Stato dell'arte

In questo ambito, esistono alcuni studi di riferimento volti a determinare e comprendere quale sia il substrato neurale del tool-making, mediante il raffronto di dati provenienti da diversi ambiti disciplinari, quali l'archeologia preistorica e le neuroscienze. Questo perché un oggetto o uno strumento derivano da un gesto, che a sua volta è il prodotto dell'attività umana, la quale dipende dalle soggiacenti capacità cognitive.

Gli studi cui si fa riferimento sono quelli di Stout (Stout *et al.* 2000, 2007; 2008) con la collaborazione di Toth e Schick.

La prima pubblicazione risale al 2000 e consiste in uno studio pilota, volto a testare ed esplorare i limiti e le potenzialità di questo tipo di approccio.

È stata testata una tecnica sperimentale di neuroimmagine, in questo caso la Tomografia a Emissione di Positroni (PET), in un ambito di applicazione completamente nuovo per esaminare quale sia il rapporto tra débitage e attivazioni cerebrali e identificare ed esaminare le regioni cerebrali durante l'attività sperimentale di *tool-making*. Gli autori,

inoltre, dichiarano di voler condurre questo tipo di studio avvalendosi, oltre che della PET, anche della fMRI, ma, a tutt'oggi, quest'ultima tecnica di neuroimmagine non risulta ancora essere stata testata dagli autori, se non nel corso del primo esperimento, quando è stata co-registrata insieme alla PET ad integrazione e potenziamento dei dati già acquisiti.

Prima di procedere con il dettaglio di tali esperimenti, è bene ricordare cosa s'intende per *débitage*. Il *débitage* è la produzione di schegge o lame organizzata in modo che le caratteristiche geometriche del nucleo possano essere ristabilite successivamente al distacco di ogni singolo supporto (scheggia) o siano conservate fino all'esaurimento del nucleo stesso, cosa che avviene con i cosiddetti metodi ricorrenti, che costituiscono la produzione standardizzata di supporti predeterminati aventi medesime caratteristiche, definite tramite il distacco precedente di schegge predeterminanti atte a tracciare, delimitare e definire la morfologia della scheggia predeterminata. Le schegge, con caratteristiche e forma parzialmente o totalmente predeterminata, sono il prodotto finale e richiesto del *débitage*, mentre il nucleo da cui sono state staccate rappresenta la fase finale della catena operativa, il suo scarto (Inizan *et al.* 1995).

L'esperimento precedentemente accennato, si è avvalso di un solo soggetto (N.T.), con notevole esperienza di *débitage*, destro e senza problemi neurologici; ogni task è ripetuto 3 volte per un totale di 9 ripetizioni. Compito finale del soggetto, era la riproduzione di manufatti litici sperimentali, riferibili al cosiddetto Modo 1 o Olduvaiano. La scelta dell'industria da riprodurre in via sperimentale è caduta sul Modo 1 in quanto esso è concettualmente e tecnologicamente semplice, ma richiede abilità visuomotorie, di coordinazione e la comprensione intuitiva (e la

padronanza) della meccanica della frattura concoide, al fine di sfruttare tutte le potenzialità offerte dal nucleo.

Sono testate tre differenti condizioni sperimentali, quali:

- una condizione di controllo (*resting state*), durante la quale al soggetto veniva sottoposto a uno stimolo visivo (un'immagine statica di un ciottolo sferico), senza che gli fosse chiesto di compiere o immaginare alcuna azione in relazione ad esso;
- una condizione definita di "*mental imagery*", durante la quale il soggetto, tenendo in mano un nucleo di selce parzialmente scheggiato, doveva immaginare di scheggiarlo con un percussore;
- una fase di vero e proprio *knapping*, durante la quale il soggetto doveva staccare, mediante percussore duro, alcune schegge da un nucleo.

Per quanto riguarda il "*knapping control subtraction*" (condizione di controllo), i risultati hanno evidenziato attivazioni nel lobo superiore parietale, nel giro pre e post-centrale attorno al solco centrale di entrambi gli emisferi cerebrali, negli emisferi cerebellari destro e sinistro, nel verme cerebellare collocato in mezzo ai due emisferi, e nel giro fusiforme destro del lobo temporale inferiore destro. Sono state riscontrate anche attivazioni anche nella corteccia primaria motoria e sensoriale, nel parietale superiore e nel neocortice, associato alle funzioni di "alto livello" e nelle strutture sottocorticali, associate con l'apprendimento e il controllo motorio. Un simile *pattern* di attivazioni è stato osservato durante la condizione di "*mental imagery*". Risulta statisticamente maggiore l'attivazione dell'emisfero sinistro, forse a causa della predominante dominanza manuale destra dei soggetti in esame.

Il *pattern* delle attivazioni derivanti dal *knapping* (aree somatosensoriale e motoria primaria attorno al giro centrale, aree cerebellari, regioni neocorticali sensorimotorie e associative dell'emisfero sinistro) riflette ciò la situazione attesa per un compito motorio complesso, che richiedesse un coordinamento tra visione e azione e condotto in uno spazio extra-personale, benché, al riguardo, si possa obiettare che la scheggiatura è un'azione condotta, al contrario, in uno spazio peri-personale.

La successive pubblicazioni di Stout e collaboratori, sempre condotte avvalendosi della PET, mirano ad approfondire ulteriormente le premesse teoriche e i risultati preliminari derivanti dal primo studio. La pubblicazione del 2007 (Stout, Chaminade 2007), prende in considerazione un campione di 6 soggetti, a dominanza manuale destra, senza nessuna precedente esperienza di *tool-making*, sottoposti a tre *tasks*:

- condizione di controllo: i soggetti devono compiere una percussione mediante percussore duro su nuclei precedentemente scelti da un campione, ma senza produrre schegge;
- *tool-making pre-practice* (*task* eseguito il giorno dopo): previa spiegazione dei parametri in gioco nel corso della scheggiatura, ai soggetti è stato chiesto di mettere in atto la percussione, con il fine di produrre un "filo", cioè schegge aventi un margine tagliente, a riproduzione di quello che potrebbe essere stato l'obiettivo iniziale delle prime industrie litiche, riferibili al cosiddetto Modo 1;
- *tool-making post-practice*: ad ogni soggetto, scegliendo la materia prima come nella prima fase e senza ulteriori istruzioni o dimostrazioni pratiche da parte degli sperimentatori, è stato

chiesto di praticare un'ora di *tool-making*, ogni giorno per quattro settimane.

I manufatti prodotti dai soggetti sono stati analizzati dal punto di vista tecno-tipologico e morfologico e dal punto di vista statistico (questo perché industrie riferibili ad uno stesso complesso, oltre ad essere caratterizzate da alcuni tipi di strumenti, presentano rapporti quantitativi dei vari tipi o gruppi, visualizzati attraverso diagrammi e poligoni di frequenza, pressoché costanti), tenendo conto del fatto che sono stati prodotti a differenti stadi di esperienza e con materiali aventi diversa risposta alla frattura.

Le attivazioni osservate sono state localizzate nella parte rostrale del solco intraparietale e nella parte ventrale della corteccia premotoria dell'emisfero sinistro, aree omologhe a quelle che supportano la prensione e l'utilizzo di oggetti nelle scimmie (Petrides *et al.* 2005). I *clusters* di maggiore attivazione sono stati registrati durante l'attività di *tool-making* e sono situati bilateralmente alla giunzione del solco intraparietale e postcentrale, regione omologa alla intraparietale anteriore della scimmia per il suo coinvolgimento nel *grasping* visivo guidato e nel *transfer* delle informazioni visuo-tattili. L'attivazione riscontrata durante il *tool-making* è stata localizzata nella corteccia premotoria ventrale nella parte anteriore sinistra dell'area 6 di Brodmann, al margine dell'area 44, cioè, come già sottolineato nei capitoli precedenti, nella regione identificata come omologa all'area F5 del macaco (Rizzolatti *et al.* 1998; Petrides *et al.* 2005).

L'attivazione della corteccia premotoria ventrale e della parte rostrale del solco intraparietale durante il *tool-making* sono state associate al meccanismo corticale che opera le trasformazioni sensorimotorie per la manipolazione degli oggetti (Rizzolatti *et al.* 1998).

I *clusters* di attivazione situati bilateralmente nella porzione dorsale del solco intraparietale forniscono ulteriori evidenze a supporto dell'ipotesi che, nel corso dell'evoluzione umana, si sia sviluppato un vasto reticolo di regioni corticali coinvolte nella capacità umana di produrre e utilizzare strumenti.

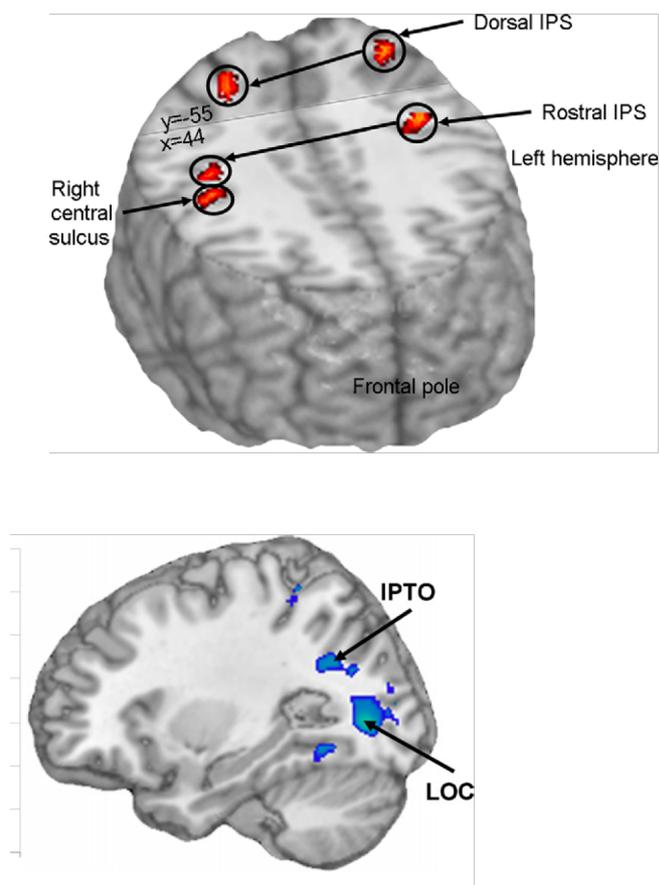


Fig.1: *clusters* di attivazione nel corso del *tool-making* (Stout et al. 2000).

Lo sviluppo di queste regioni in chiave filogenetica è stato interpretato come riflesso dell'accresciuta esigenza di analisi, orientamento e

manipolazione della forma tridimensionale del nucleo durante la scheggiatura, in funzione anche dell'accresciuta complessità tecnologica delle industrie prodotte da *Homo*.

Il distacco di schegge da un nucleo crea i presupposti per i distacchi successivi e produce un cambiamento nella morfologia del nucleo stesso: le specializzazioni per l'analisi visuo-motoria situate nelle regioni parietali posteriori dell'emisfero sinistro significano, per il *toolmaker*, migliore capacità di individuare e creare angoli favorevoli di *débitage* e implicano una maggiore resa della materia prima, sfruttata, quindi, al meglio delle sue potenzialità. Questo significa che il *toolmaker*, grazie alla riduzione progressiva delle difficoltà tecniche legate all'esecuzione motoria e all'analisi visuo-motoria del nucleo, interagisce con la materia in maniera più vantaggiosa, ricavandone una produzione migliore in termini tecnici, quantitativi e qualitativi.

Studi successivi (Stout *et al.* 2008) hanno evidenziato analoghe ulteriori attivazioni in corteccia premotoria ventrale, nella parte rostrale del solco intraparietale, in corteccia occipitale, nei circuiti parietofrontali di entrambi gli emisferi e nell'omologo dell'area di Broca nell'emisfero destro.

Quest'ultimo studio ha visto l'utilizzazione di tre soggetti, esperti nel *tool-making*, a cui sono stati sottoposti tre compiti:

- condizione di controllo: semplice percussione di due pietre, non mirata all'ottenimento di una scheggia;
- *débitage* Olduvaiano: semplice produzione di una scheggia senza istruzioni aggiuntive;
- *débitage* Acheuleano: produzione di uno o più bifacciali.

La discussione dei risultati, oltre a riportare le attivazioni sopra enunciate, sottolinea che l'Acheuleano (*facies* culturale caratterizzata dalla produzione di strumenti bifacciali e riferibile alle fasi finali del Paleolitico inferiore e a quelle iniziali del Paleolitico medio) richiede maggior coordinazione visuomotoria e gerarchica ed evidenzia un incremento di attivazioni cerebrali sia tra Modo 1 (Olduvaiano) e Modo 2 (Acheuleano), che tra soggetti esperti e non esperti, questo sulla base delle conclusioni riportate nei precedenti studi.

3.3 Discussione

L'incremento nelle attivazioni sottolineato dagli autori, probabilmente prevedibile anche senza l'uso di tecniche di neuroimmagine, apre comunque prospettive interessanti.

Gli autori sottolineano la significativa mancanza di attivazioni del lobulo parietale inferiore dell'emisfero sinistro, legato alla rappresentazione degli oggetti di uso quotidiano (Johnson-Frey 2003a; 2003b; 2004), ritenendo che non sia particolarmente saliente per l'Olduvaiano.

Dal punto di vista funzionale, gli strumenti litici non sono, per noi, oggetti di uso quotidiano, quindi tale mancata attivazione risulta pienamente giustificabile dal punto di vista comportamentale, senza dover ricorrere a spiegazioni neurofisiologiche. Riteniamo sia particolarmente importante sottolineare quest'ultimo punto, in virtù del fatto che gli strumenti litici sono del tutto fuori dalla nostra memoria collettiva: per un archeologo preistorico possono essere considerati oggetti familiari, dal momento che la sperimentazione e i ritrovamenti archeologici li rendono tali, ma nemmeno in questo caso saranno

strumenti di uso quotidiano, perché l'evoluzione tecnologica umana ha determinato altre forme e sviluppato altre soluzioni maggiormente vantaggiose per rispondere ai bisogni per cui questi strumenti erano concepiti.

Nella sua opera, Leroi-Gourhan (1943; 1945) sottolinea come anche dal punto di vista etnografico, si assista a una evoluzione della forma, concomitante a un sostanziale immobilismo della sostanza. Questo significa che, per principio generale e non assoluto, ogni bisogno generalmente soddisfatto mantiene i suoi mezzi: una scheggia di selce a margine tagliente soddisfa il bisogno di tagliare e costituisce un fondo tecnico stabile nell'analisi di un'industria litica (schegge a margine tranciante sono presenti in ogni *facies* culturale paleolitica). Il coltello moderno condivide con la scheggia preistorica un margine attivo tagliente, ma ne muta la forma, a testimonianza che il bisogno resta soddisfatto a fronte di un mutamento morfologico dello strumento che lo soddisfa.

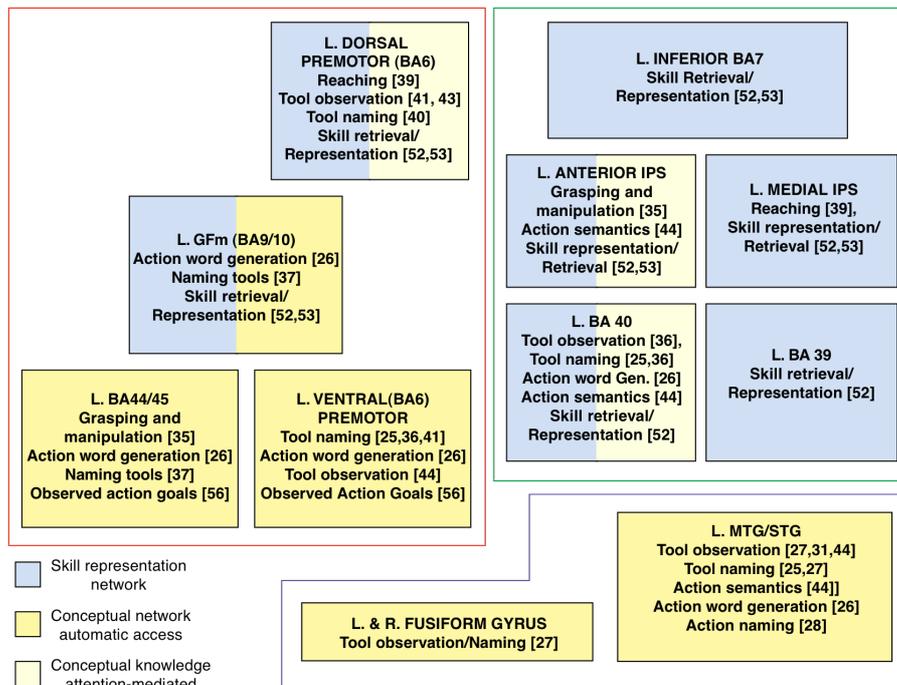


Fig.2: Aree dell'emisfero cerebrale sinistro di cui si ipotizza il coinvolgimento nel tool-use. Johnson-Frey 2004

Gli interrogativi che rimangono aperti, per fare il punto della situazione e tracciare un piano teorico-pratico da seguire, sono numerosi e di difficile inquadramento e risoluzione.

Rimane, per esempio, irrisolta la questione del come e tramite quale meccanismo si sia evoluta e sia stata trasmessa la tecnologia (Toth, Schick 1991; Ohnuma *et al.* 1997); cioè se sia stata la capacità di produrre e utilizzare strumenti a coadiuvare lo sviluppo del linguaggio articolato, oppure se, al contrario, sia stata la capacità linguistica a favorire l'evoluzione della tecnologia. Posto che si adotti la prima prospettiva, resta il dubbio del come questo sia stato possibile. Le ipotesi

al vaglio oscillano tra l'idea che le due modalità di apprendimento (verbale e non verbale) siano analoghe e abbiano lo stesso peso in termini di efficacia, oppure, che, al contrario, una sia più vantaggiosa dell'altra. La definizione della modalità di apprendimento più favorevole potrebbe far luce sugli interrogativi sopra delineati, in quanto si potrebbe ipotizzare, nel caso avessero lo stesso peso informativo, un'evoluzione concomitante e concorrente delle catene operative linguistica e tecnologica.

Un altro interessante interrogativo, che rimane tuttora irrisolto riguarda la rivoluzione culturale apportata dal *tool-making* all'evoluzione umana, chiedendosi se ad essa abbia corrisposto o meno un'analogia rivoluzione delle capacità cognitive oppure se, al contrario, questa rivoluzione culturale sia stata possibile dall'applicazione in un nuovo contesto di capacità preesistenti nei primati non umani nostri progenitori, da ricercarsi nelle origini premotorie dell'area di Broca.

Questa questione è connessa anche all'interrogativo che riguarda quali potrebbero essere i meccanismi neurali coinvolti nell'invenzione di nuovi strumenti, secondo la definizione di "scivolamento tecnologico" data da de Beaune (2004), cioè il trasferimento di un medesimo gesto (la percussione) da un materiale all'altro (*in primis*, materiali eduli, come le noci, in seguito pietra e materiali deperibili come legno o osso). Ne consegue, dunque, l'applicazione di un gesto conosciuto ad un materiale nuovo (la selce). Ciò che è nuovo, nella nostra opinione, non è solo la relazione stabilita tra gesto e materiale, ma le implicazioni comportamentali e adattive che questa nuova relazione pone in essere.

Secondo l'ipotesi formulata da diversi autori (de Beaune 2004; Mora, de la Torre 2005; Goren Inbar et al. 2002) la nascita della tecnologia litica, legata allo sfruttamento del principio della frattura concoidale, sarebbe,

dunque, da attribuirsi a questo “scivolamento tecnologico”. La presenza di una notevole quantità di sferoidi, subsferoidi e poliedri trovati nei siti riferibili a *Early Stone Age* (ESA) e *Middle Stone Age* (MSA) africana e l’osservazione etnologica dell’utilizzo di questi strumenti da parte dei primati (Gibson, Ingold 1991; McGrew et al. 2003; Berthelet, Chavaillon 1993; Goodall 1964) hanno portato gli autori a formulare l’ipotesi che sia gli strumenti che le azioni ad essi connesse, siano precedenti (in senso filotecnico) all’azione della frattura della pietra, non altrimenti ottenibile se non in presenza di percussori e della padronanza dell’attività percussiva, inizialmente volta alla rottura di noci e frutta a guscio duro, come attestato anche per il sito di Gesher Benot Ya'aqov in Israele (Goren Inbar et al. 2002). Simili comportamenti percussivi, risultano legati, quindi, all’ottenimento e processamento del cibo, qualunque sia la sua natura (noci, frutta a guscio duro, ossa per l’estrazione del midollo).

In una recente pubblicazione Pelegrin (2005) sottolinea, tuttavia, come questi due comportamenti (l’azione di frattura delle noci e il *débitage*) comportino due meccanismi di frattura completamente differenti: pur tenendo presente le differenze esistenti tra le due azioni, appare comunque innegabile che entrambe siano legate dalla comune azione percussiva, seppur con gli opportuni distinguo.

Questi rilevati rilanciano, ancora una volta, la discussa paternità delle prime industrie litiche e riaprono il dibattito circa la natura della loro apparizione, che vede la comunità scientifica divisa tra coloro che la ritengono improvvisa (Semaw et al. 2000, 2006; Toth et al. 2006) e coloro che, al contrario, ipotizzano un lungo periodo di gestazione e progressiva padronanza dei principi tecnici che occorrono in essa (Panger et al. 2002; de Beaune et al. 2004; Carbonell et al. 2007; White et al. 2009), quest’ultima tesi condivisa dallo scrivente, anche sulla base delle

evidenze neurofisiologiche esposte nel corso del primo capitolo di questo lavoro.

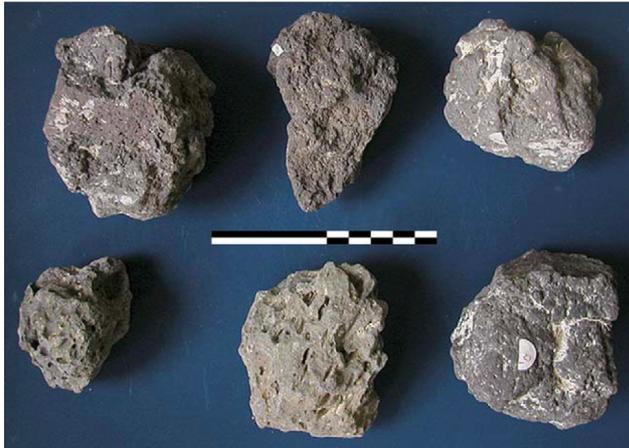


Fig. 3: materiale litico non modificato in basalto. Olduvai Bed I, Tanzania. Mora, de la Torre 2005

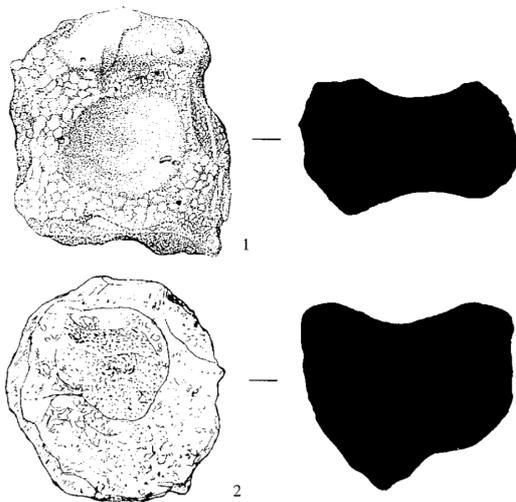


Fig. 4: confronto tra strumentario umano e di NHP. 1: percussore in basalto Monogaga Forest, Costa d'Avorio, e (2) percussore da Olduvai, Tanzania, 1.74 Mya. de Beaune 2004.

Secondo Leroi-Gourhan (1994) è possibile percepire l'ambiente tecnico solo attraverso gli oggetti che ne derivano e la sua evoluzione è percepita solo tramite esperienze isolate, parziali e interpretabili. Esistono, tuttavia, casi di immobilità che testimoniano dell'inerzia e della sopravvivenza di alcune forme: secondo l'interpretazione di Leroi-Gourhan, in linea di principio generale e non assoluto, ogni bisogno normalmente soddisfatto, tende a conservare i suoi mezzi. Queste sopravvivenze tecniche, quindi, formano un fondo stabile all'interno dell'ambiente tecnico, prestandosi, dal punto di vista teorico, alla spiegazione di quanto osservato dagli autori precedentemente citati.

A queste osservazioni di carattere archeologico, si aggiungono i dati derivanti da un recente studio (Peeters et al. 2009) che, mediante fMRI hanno evidenziato nell'uomo l'attivazione specifica del settore rostrale del lobulo parietale inferiore sinistro (IPL) all'osservazione dell'utilizzo dei *tools* (aSMG: parte anteriore del giro sopramarginale sinistro (*tool-action specific region*), attivazione riscontrata nella scimmia.

Per aSMG non c'è nessuna evidenza diretta di proprietà motorie, anche se risulta la sua attivazione durante la preparazione e la simulazione dell'utilizzo di *tools*; l'attivazione di aSMG è stata interpretata come codifica delle azioni compiute tramite uno strumento in termini di relazione causale astratta tra l'uso intenzionale del *tool* e i risultati ottenibili tramite questo utilizzo. Secondo gli autori, questo rappresenterebbe un “*evolutionary cognitive jump*”, determinato da un aumento del repertorio motorio umano e, quindi, della capacità dell'uomo di interagire con l'ambiente.

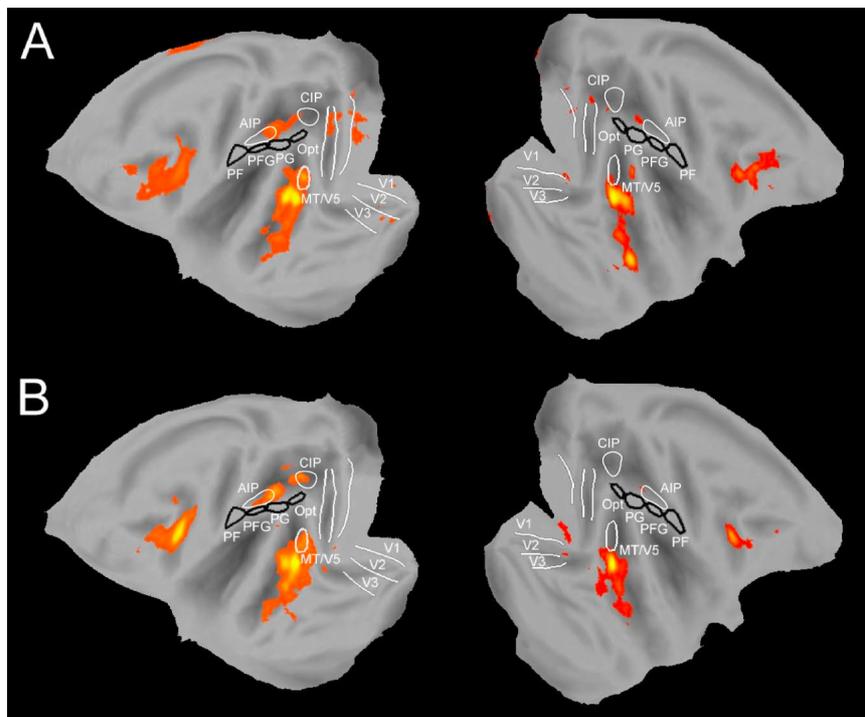


Fig. 5: clusters di attivazione all'osservazione di azioni della mano nella scimmia. Peeters et al. 2009

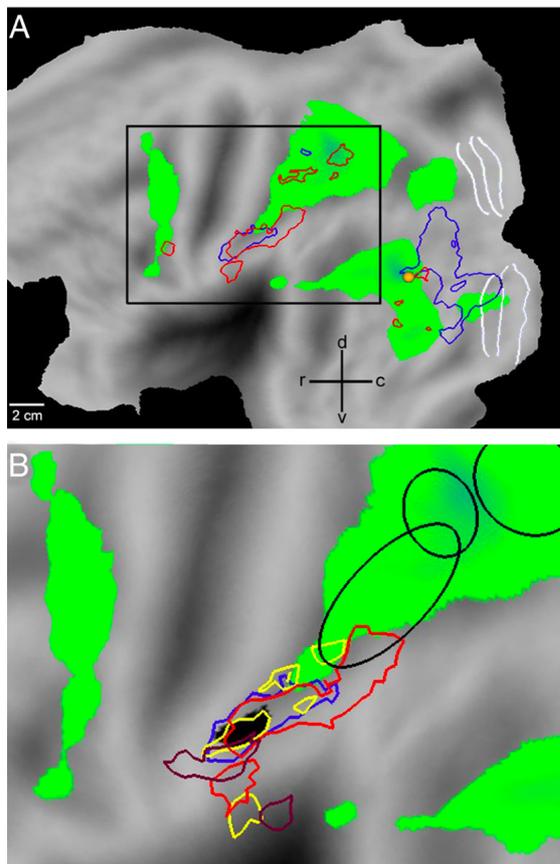


Fig. 6: *aSMG interactions site* Peeters et al. 2009.

A corollario di quanto sinora esposto, vogliamo ricordare la natura eminentemente culturale del comportamento *tool-making*. Sebbene numerosi esperimenti di scheggiatura siano stati condotti sui primati, a partire dal famoso Kanzi, risulta tuttavia evidente la differenza nei risultati ottenuti, come illustrato in figura 7. L'analisi del materiale litico prodotto da Kanzi non mostra un'efficace padronanza dei principi tecnici del *débitage*, sebbene l'opinione degli autori non concordi con questa affermazione. Kanzi riproduce, con alterni risultati, la tecnica di ottenimento del *tool* e il suo utilizzo, sebbene questa attività non sia mai

intenzionale, ma sempre volta all'ottenimento di un *reward* in cibo. Kanzi, quindi, imita l'azione e non il "comportamento" scheggiatura senza che questa imitazione sottenda una comprensione della finalità del comportamento stesso, limitata, nel suo caso specifico, solo al momento corrente e solo in vista dell'ottenimento del cibo.

Rizzolatti e Arbib (1998) nella formulazione della "*Mirror System Hypothesis*", partono dal presupposto che la corrispondenza in termini di codifica neurale tra osservazione ed esecuzione di movimenti della mano nella scimmia sia da considerarsi il presupposto necessario affinché si crei il requisito della parità tra emittente e ricevente e che questo meccanismo fosse già presente nell'antenato comune tra uomo e scimmia. Arbib (2000), in particolare, focalizza l'attenzione sulla capacità di imitazione, possibile sulla base della parità stabilita grazie al riconoscimento dell'azione manuale, e sui meccanismi di acquisizione che la supportano, sottolineandone l'importanza per l'emergenza di *Homo sapiens*. L'imitazione richiede la capacità di scomporre un compito complesso in azioni semplici, coordinandole e raccordandole in schemi che si approssimano al compito che si vuole imitare. Ciò che differenzia l'uomo dai primati umani è che questi ultimi sono in grado di imitare nuove sequenze brevi solo dopo un'esposizione prolungata, mentre l'uomo può acquisire nuove sequenze in una singola sessione, in particolare se queste si presentano semplici e relativamente familiari. Alla luce di quanto esposto, i risultati ottenuti da Kanzi non risultano affatto sorprendenti, perché, parafrasando il già citato Pelegrin (1991), risulta evidente che ciò che manca nell'attuazione è il riconoscimento dell'azione stessa: mancando il riconoscimento dell'azione, manca la sua comprensione e, infine, la possibilità della sua replica.

Rimane comunque plausibile l'ipotesi che l'origine del *tool-making* sia da ricercarsi nel comportamento percussivo osservabile nei primati umani e non umani, così come il loro utilizzo di strumenti, sebbene, nell'opinione dello scrivente, nulla autorizzi a parlare di vere e proprie tradizioni culturali come, al contrario, attestato per *Homo*, considerata anche la scarsa capacità di diffusione a grande distanza riscontrata per quelle che taluni autori definiscono “*chimp cultures*” (Boesch et al. 2003, 2009). Le inferenze possibili tra questi comportamenti e l'origine della tecnologia, quindi, possono essere limitate alla nascita del cosiddetto Modo 1 o Olduvaiano. Per concludere, vogliamo sottolineare che ci sembra inverosimile cercare di realizzare in via ontogenetica un processo che è filogenetico e la cui evoluzione abbraccia milioni di anni.

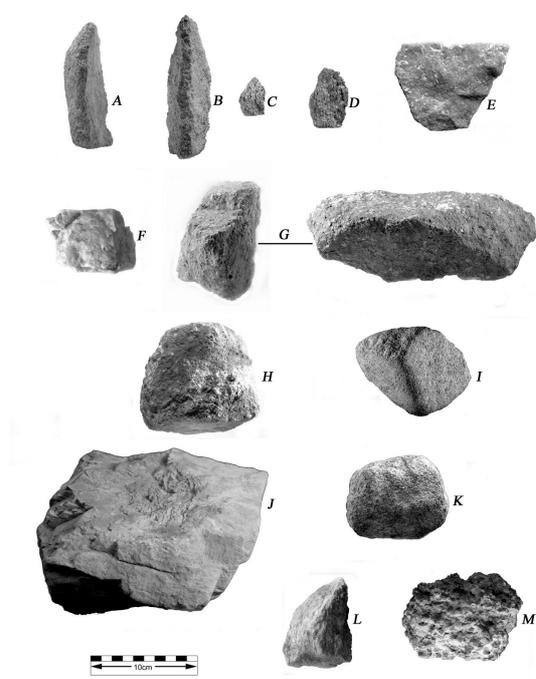


Fig. 7: strumenti ottenuti mediante scheggiatura da Kanzi, (*Pan paniscus*) Savage-Rumbaugh et al. 2000

Il protocollo sperimentale elaborato in questa trattazione, grazie all'apporto della sperimentazione nel campo delle neuroimmagini, ha cercato di apportare ulteriori elementi di riflessione in questa complessa materia, come sarà illustrato nel prossimo capitolo, interrogandosi, nello specifico, sulle proprietà motorie dei tools e sulla dinamica temporale del loro riconoscimento, questione che sappiamo essere fondamentale alla comprensione.

*Trenta raggi convergono nel mozzo,
ma è il vuoto del mozzo l'essenziale della ruota.*

Lao Tze

CAPITOLO 4: ESPERIMENTI

4.1 Premesse teoriche

In accordo con il concetto di *affordance* codificato da Gibson (1979) percepiamo gli oggetti coerentemente con l'uso che ne facciamo: quando osserviamo un oggetto, automaticamente ne selezioniamo alcune caratteristiche che possiamo utilizzare per interagire con esso. Le *affordances*, quindi, sono le opportunità pratiche che l'oggetto offre al nostro sistema motorio per interagire con esso. Se pensiamo a una tazzina, le *affordances* visive offerte disponibili al nostro sistema motorio sono il manico, il corpo centrale e la parte superiore. Da questa considerazione origina l'ipotesi che noi utilizziamo il sistema motorio per comprendere come interagire con gli oggetti. L'osservazione di oggetti, quindi, attiva automaticamente le componenti dell'azione permessa da essi, anche senza implicita intenzione di agire (Craighero et al., 1996; Tucker, Ellis 2004; De' Sperati, Stucchi, 1997; Grèzes et al., 2003).

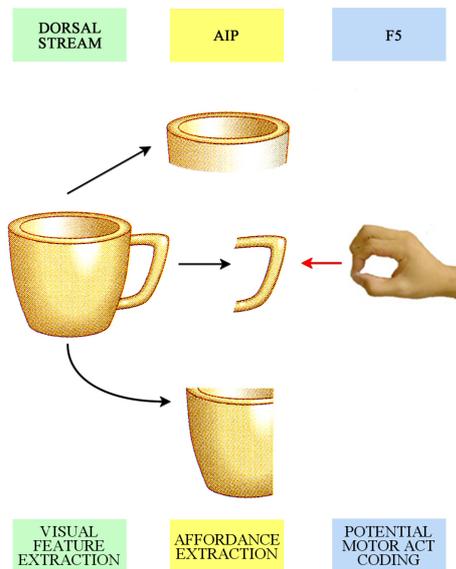


Figura 1. In figura la rappresentazione schematica dei passaggi alla base della trasformazione di un oggetto (la tazza) in un atto motorio di afferramento. I centri neurali coinvolti nel processo sono indicati nella parte superiore della figura mentre le operazioni eseguite da essi sono riassunte nella parte inferiore.

Scopo degli esperimenti realizzati è quello di investigare la relazione tra oggetti afferrabili e piani motori ad essi associati, secondo l'ipotesi che la visione di oggetti afferrabili evochi automaticamente piani motori rispetto alla visione di oggetti non afferrabili.

Gli esperimenti sono stati realizzati mediante registrazione dell'attività elettrica cerebrale o elettroencefalogramma (EEG), una tecnica che permette di captare, attraverso degli elettrodi posti sullo scalpo, l'attività cerebrale legata all'elaborazione di particolari stimoli sensoriali (tattili, visivi, uditivi, etc). Il vantaggio di questa tecnica è che permette di monitorare l'attività del cervello successiva alla presentazione di uno stimolo, millisecondo per millisecondo dopo la presentazione di esso, indagando tutto il processo di elaborazione degli stimoli, con una risoluzione temporale molto elevata.

Lo studio ha previsto due distinte fasi. Nella prima fase gli stimoli utilizzati sono stati delle fotografie di *tools*, (forbici, penna etc.), di oggetti non afferrabili, (grattacieli, elicottero etc.), e scene naturali, (nuvole, cascate etc.) utilizzati come condizioni di controllo. Nella seconda, gli stimoli erano rappresentati da disegni: la scelta di modificare gli stimoli era legata alla necessità di utilizzare un set di stimoli validato e le cui componenti visive caratteristiche fisiche fossero omogenee (luminanza, frequenza, etc) e in cui le immagini utilizzate come condizione di controllo fossero oggetti afferrabili, ma senza scopo funzionale. In entrambe le fasi, gli stimoli sono stati presentati attraverso un monitor, utilizzando E-Prime, un software utilizzato per la generazione di paradigmi sperimentali (<http://www.pstnet.com/eprime.cfm>).

L'obiettivo, nello specifico, è dimostrare la presenza, ed in particolar modo la dinamica temporale, di distinti *pattern* di attivazione cerebrale legati all'osservazione di oggetti afferrabili (ed utilizzabili per uno scopo, come ad esempio martelli o penne) rispetto ad oggetti non afferrabili e a paesaggi naturali. Nella seconda fase dell'esperimento, si è voluto investigare secondo quale *timing* temporale i *tools* si differenziassero rispetto ad oggetti semplicemente afferrabili e senza utilizzo funzionale. In particolar modo ci si aspetta che le modulazioni del segnale elettroencefalografico siano attribuibili al circuito di aree fronto-parietali coinvolte nell'esecuzione dei gesti di afferramento di tali oggetti. Nello specifico, si è voluto studiare se e quando l'osservazione di oggetti afferrabili (strumenti) rispetto ad oggetti non afferrabili e a scene naturali evochi *pattern* distinti di attivazione a carico del circuito fronto-parietale responsabile dell'esecuzione dei movimenti che sarebbero necessari ad eseguire tali gesti di prensione.

4.2 L'elettroencefalografia

L'elettroencefalografia registra l'attività cerebrale, cioè il potenziale bioelettrico generato dalla materia grigia della corteccia cerebrale, in forma di segnale derivante dalla somma del flusso di corrente extracellulare generata dall'attività di un elevato numero di neuroni, in particolare neuroni corticali piramidali.

Tramite EEG si misura quindi la differenza di potenziale elettrico tra un elettrodo attivo e un elettrodo neutro, che funziona come riferimento ed è solitamente collocato ad una certa distanza dal primo, o sullo scalpo (riferimento cefalico) o in altri distretti corporei (mastoidi, lobi delle orecchie, dorso delle mani, cioè riferimenti non cefalici) ritenuti elettricamente inerti o comunque non dotati di attività elettrica propria.

Il contributo elettrico di ciascun neurone corticale è limitato, poiché il segnale deve attraversare diversi strati di tessuto non neurale, incluse le meningi, le ossa del cranio e la cute, prima di raggiungere gli elettrodi: ne consegue che la possibilità di registrare un segnale EEG abbastanza ampio da poter essere rilevato è legata all'attivazione simultanea e sincronizzata di un numero notevole di neuroni, in grado cioè di generare un campo elettrico sufficientemente intenso.

L'attività spontanea del cervello, registrata in modo continuo, si presenta sotto forma di onde di diversa frequenza; a questa attività si aggiungono frequenze distinte legate al compito specifico (sensoriale, motorio o cognitivo) in cui il soggetto è coinvolto durante la registrazione. Dal confronto tra l'attività spontanea e la sua variazione durante l'attività indotta dallo stimolo, è possibile individuare in tempo reale le aree di maggiore attività elettrica. L'EEG, infatti, presenta un'elevata risoluzione temporale (nell'ordine del millisecondo, pari a quella della registrazione intracorticale), mentre la risoluzione spaziale rappresenta il limite

maggiore di questo metodo: gli elettrodi, infatti, rilevano esclusivamente la corrente che arriva alla superficie cranica e solo tramite algoritmi di ricostruzione della provenienza del segnale è possibile individuare in maniera sommaria i foci da cui essa è più probabilmente prodotta (analisi della sorgente).

4.2.1 Caratteristiche del segnale

I tracciati EEG presentano un'attività di fondo generalizzata, poiché sono sempre presenti piccole fluttuazioni di voltaggio solitamente di poche decine di microvolt (μV) del tutto spontanee. Questa attività spontanea può essere rivelatrice di diversi stati mentali (attenzione, concentrazione etc.), di diversi livelli di coscienza (sonno, livelli del coma etc.) o di alcuni disturbi patologici (epilessia, tumori cerebrali etc.).

I ritmi EEG sono strettamente correlati con le proprietà spettrali del segnale: particolari forme d'onda, infatti, possono essere buoni indicatori di patologie o lesioni o semplicemente dello stato di rilassamento del soggetto. L'assenza di attività spontanea è un indice di morte cerebrale, cioè di irreversibile compromissione di tessuti e circuiti neurali.

I ritmi EEG sono spesso correlati a particolari stati comportamentali (quali i livelli di attenzione, il sonno e la veglia) e patologici (coma) e sono categorizzati sulla base dell'intervallo di frequenze entro cui variano. I ritmi delta (δ) sono piuttosto lenti e di grande ampiezza, inferiori a 4 Hz, e sono un elemento caratteristico di sonno profondo, di condizioni patologiche come il coma o forme tumorali. I ritmi teta (θ) ruotano attorno ai 3-7 Hz e si registrano durante alcuni stati di sonno in cui risultano di maggiore ampiezza. I ritmi alfa (α) sono di circa 8-13 Hz, sono associati con stati di veglia rilassata e si registrano meglio dai lobi

parietali ed occipitali, la parte posteriore del cervello. La desincronizzazione del ritmo α , cioè la diminuzione dell'ampiezza delle onde, sarebbe correlata ad una maggiore disponibilità delle reti corticali all'input sensoriale o al comando motorio. I ritmi beta (β) e gamma (γ) comprendono tutte le frequenze maggiori di 14 Hz (14-30 Hz e >30 Hz rispettivamente) e sono indicativi di una corteccia attivata; si osservano di norma a livello delle aree frontali, ma si possono registrare anche da altre regioni corticali; durante l'attività mentale intensa hanno l'ampiezza minima.

Tipo di ritmo	Frequenza Hz	Ampiezza (μ V)	Stati mentali, livelli di coscienza
δ	0,5-3	20-200	Condizioni patologiche
θ	3-7	5-100	Sonno profondo
α	8-13	10-200	Rilassamento mentale
β	14-30	1-20	Attenzione, concentrazione, aree corticali attivate
γ	>30	1-20	Attenzione, concentrazione, aree corticali attivate

Fig. 2: tabella riassuntiva dei principali ritmi cerebrali, loro frequenza e ampiezza e stati mentali associati.

In generale, i ritmi ad alta frequenza e bassa ampiezza sono associati a stati di vigilanza e di veglia, o agli stadi del sonno in cui si sogna (sonno R.E.M.). I ritmi a bassa frequenza e grande ampiezza sono associati a stati del sonno in cui non si sogna (sonno non R.E.M. o E.K.G.), o a uno stato patologico (coma), poiché quando la corteccia è fortemente

impegnata nell'elaborazione delle informazioni, siano esse generate da input sensoriali o da processi interni, il livello di attività dei neuroni corticali è relativamente alto, ma anche non sincronizzato su ampie zone della corteccia. In altre parole, ciascun neurone, o piccoli gruppi di neuroni, è implicato in differenti compiti cognitivi; la scarica non sempre è simultanea e questo porta ad una bassa sincronia, così che l'ampiezza dell'EEG risulta bassa, e le onde beta sono dominanti. Al contrario, durante il sonno profondo, i neuroni corticali non sono implicati nell'elaborazione delle informazioni ed un grosso numero di essi è ritmicamente eccitato da un input comune, lento e fasico. In questo caso la sincronia è alta, così che l'ampiezza dell'EEG risulta anch'essa alta.

4.2.2 Registrazione EEG

La registrazione del tracciato elettroencefalografico può essere unipolare o bipolare: nel primo caso, vengono registrate le variazioni di potenziale fra una regione corticale ed un punto qualsiasi del corpo distante dalla corteccia cerebrale; nel secondo caso, invece, viene rilevata la differenza di potenziale elettrico tra un elettrodo attivo e uno di riferimento. Nella registrazione unipolare tutti gli elettrodi sono riferiti ad uno che può essere elettricamente neutro (tipo il naso) o anche no (quindi non necessariamente distante dal cranio) in bipolare ogni elettrodo è riferito ad un altro (in genere elettricamente attivo).

L'EEG registra l'attività elettrica spontanea, cioè non dovuta a un particolare evento, ma può registrare anche una variazione del potenziale elettrico generata in risposta ad uno stimolo esterno (visivo, uditivo, somoestesico etc.), detto potenziale evocato (*evoked potential*, EP). Per potenziale evocato si intende una stimolazione esterna, cui il cervello risponde con un'onda specifica, caratterizzata da una particolare latenza,

ampiezza e polarità. Questa attività, registrata sullo scalpo, riflette i processi nervosi, sensoriali, motori e cognitivi correlati allo stimolo. I potenziali evocati sono costituiti da forme d'onda caratterizzate da una serie di deflessioni positive o negative, definite componenti. Le componenti dei potenziali evocati sono considerate come potenziali postsinaptici (PPS) inibitori o eccitatori, generati sincronicamente in una popolazione di neuroni sufficiente perché sia possibile registrare in superficie. Queste componenti possono essere di breve, media e lunga latenza. In base alla loro latenza, possiamo quindi definire le componenti dei potenziali evento-correlati come la manifestazione dell'attività nervosa associata a degli stadi specifici della trasmissione ed elaborazione dell'informazione nel sistema nervoso centrale. Uno specifico potenziale evocato compare ad intervalli di tempo approssimativamente costanti rispetto alla presentazione dello stimolo: poiché l'ampiezza di ogni singola risposta è piccola rispetto alle fluttuazioni dell'intero tracciato EEG, da questo viene estratta la risposta media di una serie di risposte singole (*averaging*). Le variazioni di potenziale sincronizzate con lo stimolo (e quindi relative alla sua elaborazione) si sommano a condizione che siano in fase, mentre quelle desincronizzate con lo stimolo si elidono.

I potenziali evocati evento-correlati (*event-related potentials* o ERP) dipendono dal contenuto informativo dello stimolo o evento. C'è una stretta relazione temporale tra la stimolazione e la risposta allo stimolo stesso: l'ERP risulta da una sincronizzazione delle oscillazioni di fondo rispetto all'evento di interesse; questa relazione temporale è stabile e ripetibile nel caso vengano effettuate più stimolazioni. La sincronizzazione e l'aumento di potenza possono interessare solo alcune bande di frequenza, ma, generalmente, negli ERP interessano l'intero spettro da 4-6 Hz a 60-70 Hz.

4.3 Esperimenti: *toolness* ovvero, quando un oggetto diventa afferrabile per il cervello?

4.3.1 Ipotesi sperimentale

È stato ipotizzato (Fadiga et al. 2007) che lo step intermedio tra la rappresentazione di azioni e l'apparizione del linguaggio articolato potrebbe essere l'apparizione del *tool-making/tool-use*. Partendo da questo assunto, abbiamo concentrato la nostra indagine sul quando, dove e come nel cervello un oggetto osservato acquisisce proprietà motorie (*toolness*). L'ipotesi oggetto di verifica è se la presentazione breve di oggetti afferrabili (*tools*) evochi automaticamente piani motori rispetto alla visione di oggetti non afferrabili o scene naturali (o oggetti afferrabili, ma senza utilizzo funzionale, cioè non *tools*).

Come detto, in accordo con Gibson (1979), percepiamo gli oggetti in accordo col modo in cui li utilizziamo (concetto di *affordance*).

Evidenze comportamentali sull'uomo (*affordance compatibility effect* (Tucker, Ellis 2001, 2004) mostrano tempi di reazione più veloci per coerenza tra oggetti afferrabili orientati in maniera congruente rispetto alla mano usata per rispondere allo stimolo, rispetto ad oggetti orientati in modo scomodo per la prensione. Gli oggetti presentati visivamente evocano automaticamente le componenti dell'azione che permettono anche senza esplicita intenzione di agire (Craighero et al. 1996).

A livello neurale questo effetto può essere spiegato dall'attività dei neuroni canonici in F5 e nel solco intraparietale di AIP della corteccia cerebrale delle scimmie (Murata et al. 1997; Sakata et al. 1995; Rizzolatti et al. 1998), un circuito che trasforma le proprietà intrinseche

dell'oggetto in movimenti della mano appropriati per interagire con esso (Jannerod 1995).

Nell'uomo la risonanza magnetica funzionale (fMRI) ha evidenziato che gli oggetti afferrabili attivano le aree parietali e premotorie (Grezes et al. 2003), nello specifico la corteccia premotoria sinistra nella sua porzione sia ventrale che dorsale (Grafton et al. 1997; Chao, Martin 2000), il giro fusiforme bilaterale e medio temporale (Chao et al. 1999). La risoluzione temporale dell'fMRI non consente, però, di ottenere informazioni particolarmente accurate circa le dinamiche temporali con cui si verificano queste attivazioni. La scelta di utilizzare la tecnica dell'EEG si è confermata, dunque, ottimale, proprio grazie alla sua elevata risoluzione temporale.

4.3.2 Partecipanti

All'esperimento hanno preso parte 13 soggetti (7 maschi e 6 femmine, età media: 26 anni), tutti a dominanza manuale destra secondo l'Edinburgh Handedness Inventory (Oldfield, 1971), che hanno acconsentito a partecipare all'esperimento tramite la firma di un appropriato consenso informato (**Allegato 2**). E' stato accertato che i soggetti non assumessero farmaci neuroattivi al momento della registrazione né nel corso dei sei mesi precedenti. Nessuno dei soggetti risultava affetto da patologie del sistema nervoso centrale, non aveva mai sofferto di crisi epilettiche, anche minori, o di crisi convulsive in genere, anche in età infantile. La sperimentazione si è svolta presso l'Istituto Italiano di Tecnologia (IIT) di Genova ed è stata autorizzata dal comitato etico locale, previa presentazione del protocollo sperimentale (**Allegato 1**).

4.3.3 Materiali e metodi

Il segnale elettroencefalografico è stato registrato da 64 elettrodi posizionati su una cuffia elastica secondo il sistema di riferimento 10-10 e amplificato da un amplificatore Brain Amp MRplus (<http://www.brainproducts.com/productdetails.php?id=6&tab=5>). Il segnale è stato campionato a 5000 Hz e filtrato tra 0.1-100 Hz. L'elettrodo di riferimento era FCz e le impedenze di tutte gli elettrodi sono state tenute sotto i 5 KOhm.

Gli stimoli visivi sono stati presentati attraverso il software E-Prime. L'analisi della sorgente del segnale è stata effettuata tramite il software sLORETA (Pascual-Marqui 2002; <http://www.uzh.ch/keyinst/loreta.htm>), utilizzato per elaborare la distribuzione corticale tridimensionale della densità di corrente, sulla base della distribuzione del potenziale elettrico registrato sullo scalpo.

Il segnale elettroencefalografico è stato poi filtrato off-line tra 0.5-40 Hz, ri-referenziato sulla media di tutti gli elettrodi, segmentato in finestre temporali di 650 ms successivi alla presentazione degli stimoli visivi e la cui ampiezza è stata misurata rispetto ad un periodo di *baseline* (100 ms prima della comparsa dello stimolo visivo). Dal tracciato sono state eliminate le finestre temporali (o epoche) contaminate da artefatti.

Per artefatto si intende un qualsiasi potenziale non di origine cerebrale che, inscrivendosi sul normale tracciato EEG, modifica distorce o annulla l'attività elettrica.

Ogni sessione sperimentale ha previsto la partecipazione del soggetto per un periodo di circa due ore. Nel corso della prima fase, che ha richiesto circa 40 minuti, sono stati preparati gli strumenti di registrazione:

montaggio della cuffia su cui sono posizionati gli elettrodi di registrazione, pulizia della cute del soggetto al fine consentire una miglior registrazione dell'attività elettroencefalografica, abbassamento delle impedenze. Il tempo rimanente è stato invece impiegato per la registrazione dell'attività elettroencefalografica durante la presentazione degli stimoli visivi. Ai soggetti era possibile interrompere l'esperimento in qualsiasi momento, su richiesta del soggetto stesso e/o a giudizio dello sperimentatore.



Fig.3: setup sperimentale. Posizione del soggetto durante la registrazione del tracciato EEG.

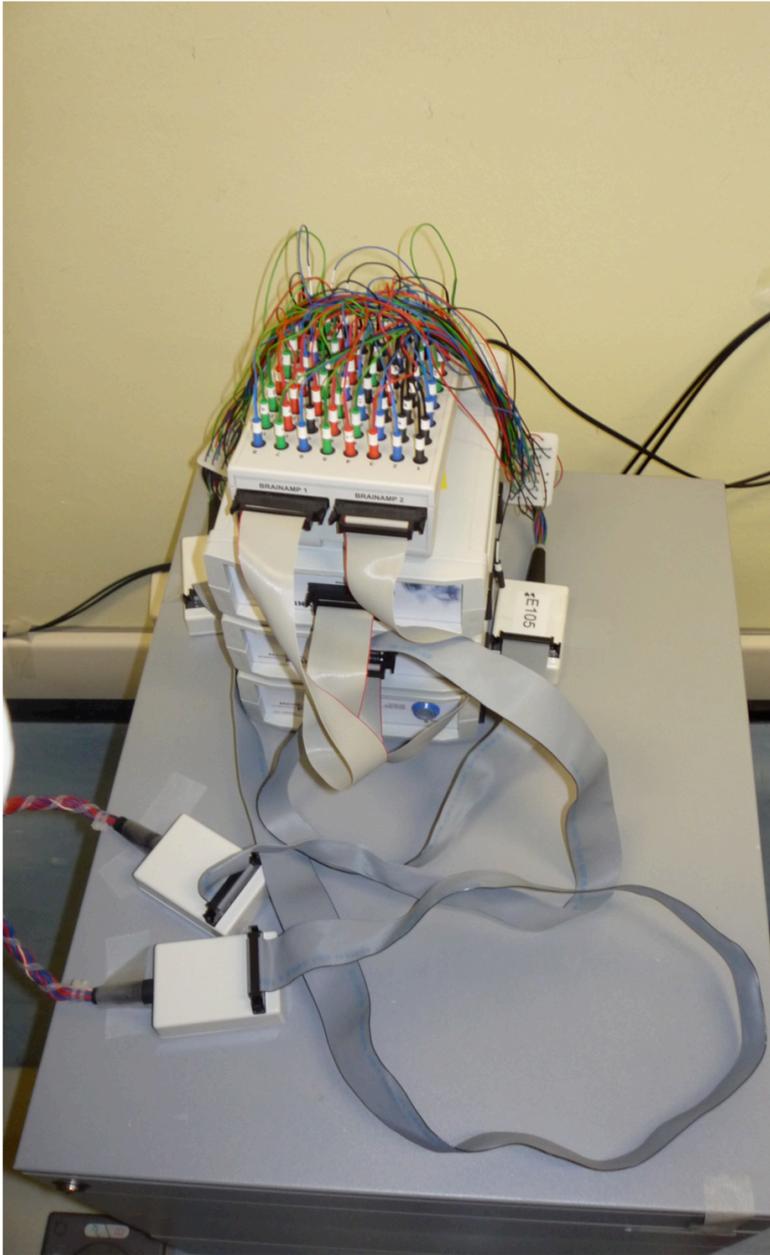


Fig. 4: amplificatori del segnale EEG



Fig. 5: setup sperimentale. Posizione del soggetto durante la registrazione del tracciato EEG.

4.3.4 Procedura sperimentale

L'attività EEG è stata registrata durante la presentazione di 3 condizioni, ciascuna composta di 20 diversi stimoli (immagini):

- oggetti afferrabili con utilizzo funzionale (tools, come martello, cacciavite, penna, mouse etc.);
- oggetti non afferrabili (come case, grattacieli, treni etc.);
- scene naturali (come montagne, cascate, mare etc.).

L'esperimento era composto da 5 blocchi composti ciascuno da 60 immagini presentate in ordine randomizzato (20 per ciascuna condizione) più alcune immagini ripetute per ogni condizione in ogni blocco. Di conseguenza, per ciascuna condizione sperimentale sono state presentate

100 immagini, più un numero variabile di stimoli ripetuti (da 3 a 5 per ogni blocco), che non sono stati presi in considerazione ai fini dell'analisi.

Il compito dei soggetti era quello di prestare attenzione alle immagini e di premere con il dito indice sinistro un tasto sulla tastiera (g) ogni volta che un'immagine era ripetuta due volte consecutive, questo per poter essere certi che i soggetti prestassero attenzione alle immagini, senza suggerire loro di focalizzare l'attenzione esplicitamente sulle proprietà afferrabili degli oggetti/immagini presentati.

La struttura del trial era così composta:

Schermo bianco con punto di fissazione al centro: durata 500 ms

Schermo grigio: durata 100 ms

Immagine: durata 100 ms

Schermo grigio: durata 1000 ms

Per le immagini ripetute, il trial era il medesimo, con l'aggiunta di un feedback: dopo la presentazione dell'immagine ripetuta, sullo schermo appariva la frase "*correct response*" (tasto g della tastiera) o "*no response detected*" nel caso in cui il soggetto non avesse premuto il tasto.

La durata di questa schermata è stata fissata in 2000 ms.

La scelta di presentare gli stimoli per un tempo molto breve è stata determinata dalla volontà di limitare il processamento del contenuto semantico associato alle caratteristiche motorie del tool.

Tra la presentazione di un'immagine e l'altra, veniva presentata (per la durata di 100 ms) un'immagine *scramble* (ottenuta mediante il software Matlab) al fine di pulire le persistenze retiniche derivanti dalla presentazione tachistoscopica delle immagini.

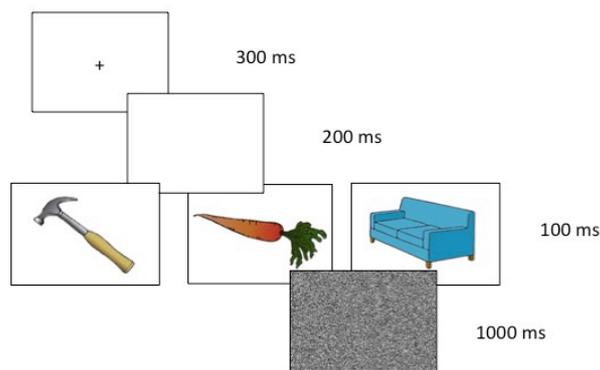


Fig.6: struttura del trial

4.3.5 Risultati e Discussione

I *tools* si differenziano dagli oggetti semplicemente afferrabili molto presto (tra 100 e 150 ms dopo la presentazione dello stimolo): possiamo quindi affermare che *tools* e oggetti afferrabili iniziano ad acquisire proprietà motorie a uno stadio molto precoce del processamento dell'informazione visiva. La localizzazione della sorgente del segnale EEG registrata sullo scalpo a 150 ms dalla presentazione dello stimolo, mostra che questa differenza è mediata dall'attivazione delle aree motorie del giro frontale inferiore sinistro (Handy 2004). I potenziali evocati mostrano un'attivazione tipica registrata dalle regioni posteriori del cranio; ogni picco rappresenta una fase ulteriore nel processamento dell'informazione.

Gli oggetti afferrabili si differenziano dalle altre due condizioni a uno stadio più tardivo (150 ms). La maggior ampiezza registrata in P1 potrebbe rappresentare un aumento sensoriale specifico per i *tools* e

questa facilitazione potrebbe favorire la percezione visiva delle caratteristiche *action-related* dei *tools*. Inoltre, un'elevata attività legata ai *tools* potrebbe essere mediata dalle aree motorie: il giro frontale medio destro e giro frontale inferiore sinistro (*tools* vs oggetti afferrabili), giro frontale medio sinistro (afferrabili vs non-afferrabili) che faciliterebbero la programmazione di parametri *action-related* rispetto ai *tools*.

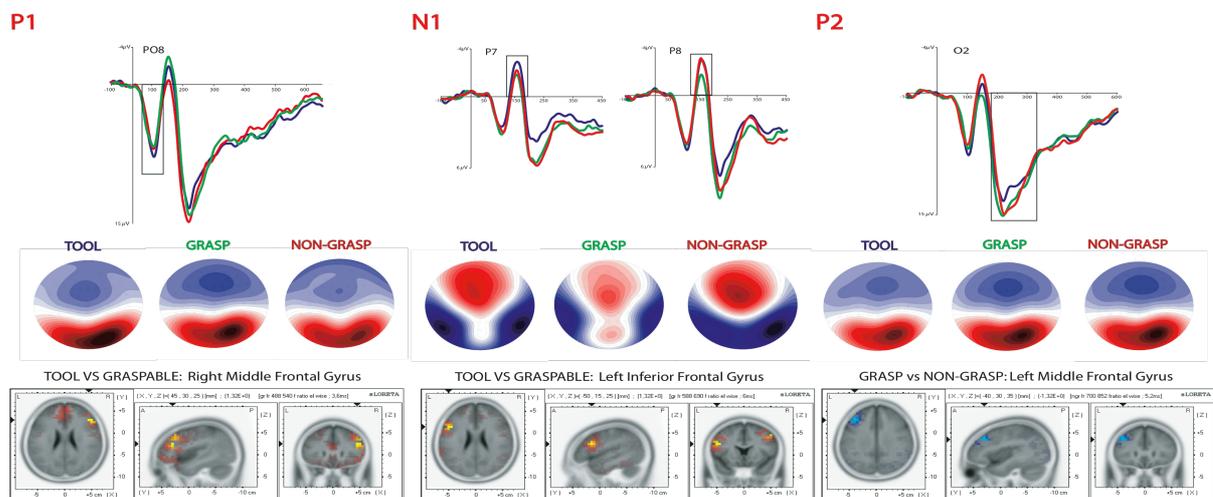
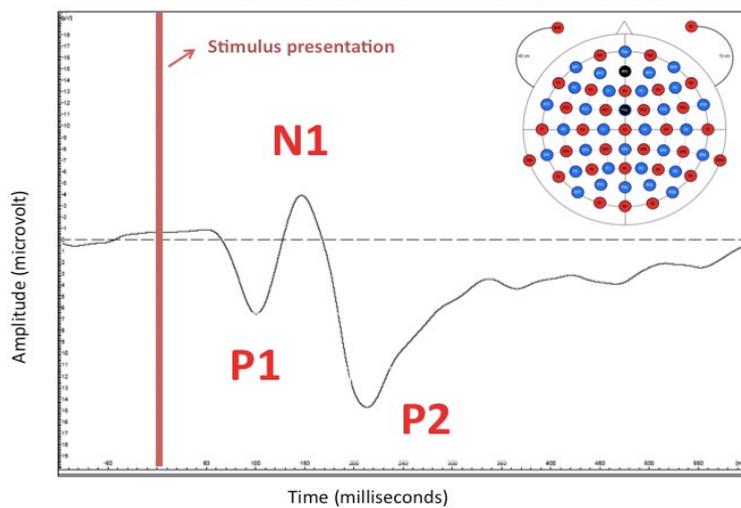


Fig 7: Componenti P1, N1 e P2 e differenza di attivazione tra le condizioni.

4.3.6. Motor expertise

Recenti studi di risonanza magnetica funzionale (fMRI) (Calvo Merino et al. 2005; 2006; Cross et al. 2006; 2009) hanno avuto come scopo quello di indagare il rapporto tra l'osservazione dell'azione e l'acquisizione di abilità motorie, in particolare, se esista un *action-observation network* (AON) capace di facilitare questa acquisizione. L'interrogativo alla base dei recenti studi di cui sopra è se l'osservazione di un'azione compiuta da terzi attivi nel nostro cervello la simulazione dell'azione stessa e se questa percezione sia modulata dall'esperienza e dal repertorio motorio proprio dell'osservatore.

In un primo studio è stata esaminata l'intensità di attivazione del sistema specchio in ballerini di danza classica, in insegnanti di Capoeira ed in persone che non avevano mai danzato. L'ipotesi alla base dell'esperimento era quella di stabilire se le aree cerebrali di pertinenza del sistema-specchio si attivavano in maniera diversa secondo l'esperienza nella danza dei vari individui. I risultati hanno mostrato che l'osservazione di passi di Capoeira attiva il sistema dei neuroni specchio maggiormente negli insegnanti di Capoeira che nei ballerini classici e nei principianti. Viceversa, l'attivazione nei ballerini classici era maggiore quando osservavano un balletto classico rispetto alla Capoeira. La visione di movimenti per cui i soggetti possedevano un'abilità specifica, ha evidenziato attivazioni bilaterali nella corteccia premotoria e nel solco intraparietale, nel lobulo parietale superiore destro e nel solco temporale superiore sinistro, rispetto alla visione di movimenti che non rientravano nel repertorio motorio dell'osservatore, anche se a questi comparabili dal punto di vista cinematografico.

Questo ha portato a concludere che il sistema mirror integra le azioni osservate condotte da parte di terzi con il repertorio motorio personale dell'osservatore, e più questo è sviluppato più il sistema diventa efficace e suggerisce che il nostro cervello comprende l'azione in termini di simulazione motoria.

I soggetti facenti parte del gruppo di esperti mostravano un'attivazione maggiore per i movimenti specifici dello stile da essi stessi praticato, mentre i soggetti non esperti di controllo non mostravano nessuna attivazione specifica rispetto agli stimoli presentati. Questa differenza ha portato ad affermare che l'interazione dipende dalle abilità motorie acquisite e non dalle caratteristiche visive dello stimolo presentato e che la risposta cerebrale alla visione di un'azione è influenzata dalle abilità motorie acquisite dall'osservatore.

Riguardo al tipo di rappresentazione motoria comportata dall'azione osservata, l'effetto significativo legato all'*expertise* ha suggerito che il sistema *mirror* codifica schemi di azioni complete, non limitandosi semplicemente alla codifica del movimento singolo, in accordo da quanto suggerito da studi precedenti (Fadiga et al. 1995; Buccino et al. 2001; Rizzolatti et al. 2001) che evidenziano l'omologia tra attivazioni di gruppi di muscoli in osservazione ed in esecuzione.

Si può affermare, quindi, che il sistema mirror sia sensibile a livelli più astratti di organizzazione dell'azione e che questa attivazione sia legata alle abilità motorie apprese.

Secondo Sakai et al. 2002, l'attivazione della corteccia premotoria (PMC) sarebbe associata all'acquisizione e all'apprendimento di nuove azioni e quindi, PMC codificherebbe piani di azione dettagliati legati a movimenti complessi: le osservazioni condotte in questi studi, portano ad

affermare che questi piani di azioni sarebbero coinvolti anche nell'osservazione di azioni.

Come già sottolineato, la diversità cinematica tra i movimenti analizzati non apporta alcun contributo alla significatività dei risultati e le differenze osservate tra i due gruppi di soggetti esperti non sono di natura puramente percettiva, dal momento che nelle aree classicamente associate all'apprendimento percettivo (corteccia occipitale e temporale inferiore, Gauthier et al. 2000) non è stato rilevato nessun effetto di *expertise*.

Risultati sperimentali (Vandenberghe et al. 1996) hanno dimostrato che l'abilità motoria modula un'attività nelle aree medio temporali, attività che probabilmente riflette una categorizzazione semantica. Questo processo sarebbe, secondo gli autori, parallelo ed indipendente rispetto alla simulazione motoria condotta dal sistema *mirror*.

L'interrogativo che gli sperimentatori si sono posti successivamente è che i risultati evidenziati nel corso dell'esperimento potrebbero dipendere dalla familiarità visiva rispetto alle azioni osservate piuttosto che l'abilità motoria necessaria al loro svolgimento. Questo però, non sembra possibile per diversi ordini di motivi: innanzitutto questo effetto è stato osservato all'interno del circuito *mirror* in aree classicamente considerate motorie, come la corteccia premotoria sinistra, inoltre, nessuna attivazione è stata riscontrata nel giro fusiforme, area classicamente coinvolta nella familiarità visiva e nell'apprendimento percettivo (Gauthier et al. 1999).

In uno studio successivo, ci si è chiesti se la differenza nell'attivazione nei tre gruppi dipendesse dal fatto che gli insegnanti di Capoeira avessero una maggiore esperienza visiva di questa danza o se, invece, l'attivazione dipendesse dalla loro conoscenza motoria dei vari passi richiesti. Nella Capoeira alcuni passi sono eseguiti sia da maschi sia da femmine, mentre

altri sono eseguiti solo da ballerini o da ballerine. Partendo da quest'osservazione sono stati presentati, durante un esperimento di fMRI filmati di passi di danza eseguiti da ballerine e da ballerini. I risultati hanno mostrato che il sistema specchio si attivava di più quando i ballerini osservavano passi di danza eseguiti da individui dello stesso sesso. È quindi la conoscenza motoria e non l'esperienza visiva che rappresenta il fattore principale responsabile dell'attivazione del sistema-specchio.

Studi precedenti condotti sui primati (Jannerod et al. 1995; Rizzolatti et al. 1998) hanno evidenziato che i movimenti di ciascuna parte del corpo sono codificati in modo parallelo e indipendenti in diversi circuiti parieto-frontali che favoriscono rappresentazioni motorie somatotopicamente organizzate per effettori diversi: esiste, cioè, una corrispondenza somatotopica diretta tra lo stimolo visivo e la parte del corpo o il movimento ad essa corrispondente. Una simile organizzazione somatotopica è stata riscontrata nell'uomo (Buccino et al. 2001).

Le conclusioni tracciate da questi studi, suggeriscono che il *network* di aree motorie coinvolte nella preparazione ed esecuzione di azioni siano attivate anche dall'osservazione delle stesse e che tale attivazione sia maggiore quando il soggetto possiede specifiche rappresentazioni motorie dell'azione osservata.

Le regioni parietali e premotorie facenti parte del sistema *mirror*, inoltre, non risponderebbero semplicemente alla cinematica dei movimenti osservati, ma trasformerebbero questi input visivi in capacità motorie specifiche dell'osservatore.

Allo scopo di approfondire i risultati di questi studi, in un ulteriore esperimento è stata esaminata, settimana per settimana, la relazione tra

l'apprendimento di passi di danza e l'intensità dell'attivazione del sistema-specchio. I risultati hanno mostrato che mano a mano che i ballerini imparavano i passi di danza vi era un incremento dell'attivazione del loro sistema-specchio e che questo correlava con le capacità da parte dei ballerini di eseguirli (Cross et al. 2009).

I gruppi di soggetti (esperti e non esperti) degli esperimenti presentati, vedevano gli stessi stimoli, ma il coinvolgimento del sistema specchio era differente se l'azione osservata faceva o meno parte del loro repertorio motorio.

Il sistema specchio codifica dunque gli atti motori compiuti da altri su quelli propri del patrimonio motorio dell'osservatore, e più questo è sviluppato più il sistema diventa efficace. Ma che cosa accade quando ad osservare azioni manuali sono persone che non hanno né mani né braccia? Ci dobbiamo aspettare un'assenza di attivazione del sistema specchio, in quanto l'osservatore manca del programma motorio per le azioni manuali, oppure dobbiamo aspettarci un'attivazione di un programma motorio analogo della bocca o del piede che permette di capire lo scopo dell'atto motorio osservato? Per rispondere a interrogativi simili è stato condotto un esperimento di fMRI in cui a due individui aplosici nati senza braccia e mani sono stati presentati filmati di atti motori eseguiti con la mano. I risultati dello studio hanno messo in luce un'attivazione del circuito specchio parieto-frontale dimostrando che atti motori che non appartengono al repertorio motorio di un dato individuo in termini di effettori, sono riconosciuti dall'osservatore grazie al fatto che lo scopo dell'atto motorio osservato, recluta programmi motori analoghi eseguiti da altri effettori (bocca, piede) (Gazzola et al. 2007).

4.3.6 Un'*expertise* possibile anche per la fabbricazione di *tools*?

Sulla base dei dati sperimentali fin qui riassunti e sulla base dell'evidenza sperimentale riportata in questo lavoro, ci siamo chiesti se fosse possibile riscontrare un simile effetto di *expertise* anche per quanto riguarda il riconoscimento dei *tools* in soggetti esperti e non esperti di *tool-making*. L'ipotesi sperimentale è quella di mostrare ai soggetti *tool* vs non *tools*, prima con un paradigma solo comportamentale, cioè che non prevede l'utilizzo di metodi elettrofisiologici di registrazione, ma che comporta la registrazione di variabili come tempi di reazione e accuratezza nel *task* specifico richiesto ai soggetti, e successivamente, mediante l'utilizzo della Stimolazione Magnetica Transcranica, una tecnica di stimolazione elettromagnetica del tessuto cerebrale, basata sul principio dell'induzione elettromagnetica.

Gli stimoli presentati saranno dei disegni di *tool* preistorici comparati con gli stessi disegni, ma modificati in modo tale da renderli implausibili (per un osservatore esperto) come *tools*. La modifica cui questi disegni sono stati sottoposti, rendendoli implausibili come *tools*, automaticamente ne annulla le proprietà motorie, rendendoli al massimo oggetti afferrabili; dai dati riportati nel paragrafo precedente, sappiamo che la differenziazione tra *tools* ed oggetti semplicemente afferrabili, ma privi di scopo funzionale, avviene molto presto (100-150 ms dalla presentazione dello stimolo) e che questa precoce differenziazione è associata a un'attivazione localizzata nell'IFG (giro frontale inferiore) sinistro, cioè in un'area motoria e che fa parte del circuito *mirror* nell'uomo.

I risultati attesi sono che i soggetti esperti si dimostrino, nel comportamentale, più veloci e più accurati nel discriminare tra *tool* e *non-tool*. Il risultato atteso con l'utilizzo della TMS darà quello di

equiparare la *performance* degli esperti con quella dei non esperti stimolando la corteccia motoria primaria (M1).

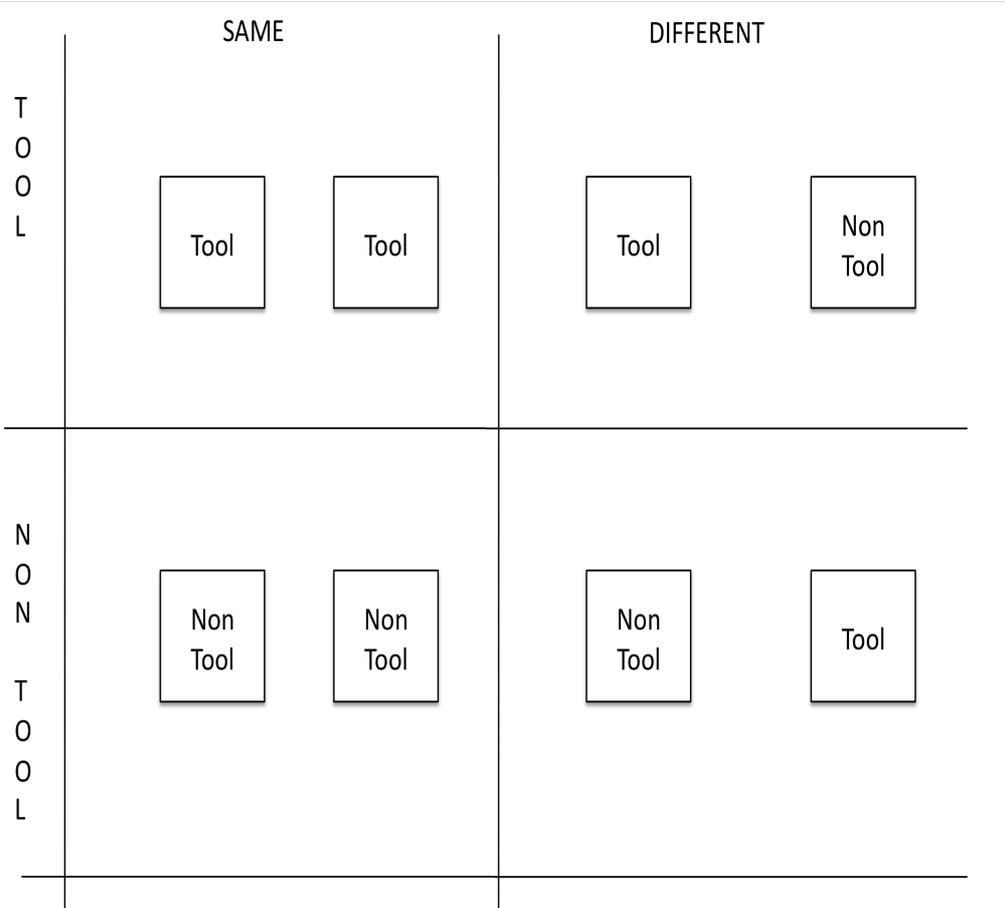


Fig. 8 Disegno sperimentale dell'esperimento 1.

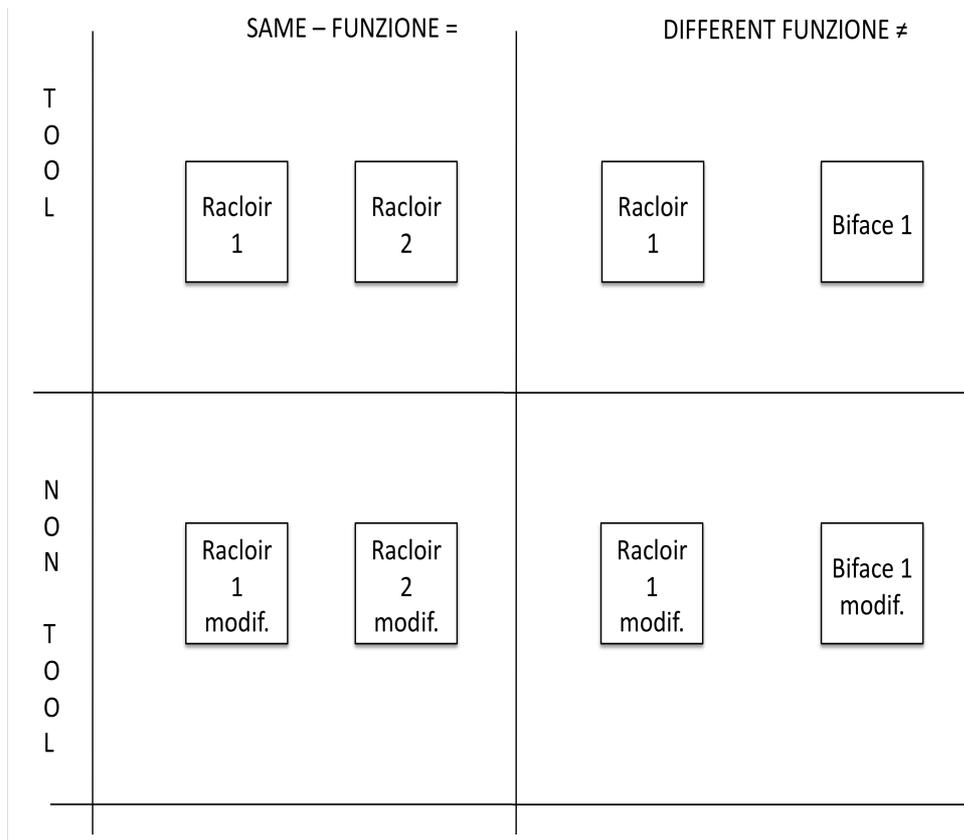


Fig. 9 Disegno sperimentale esperimento 2.

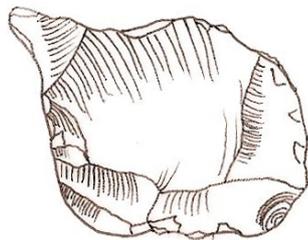


Fig. 10: tool

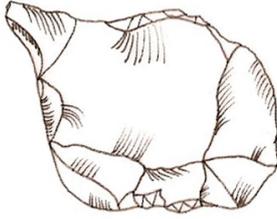


Fig. 11: il medesimo *tool* rappresentato in Fig.10, modificato in modo tale da risultare implausibile (cioè *non-tool*).

L'esistenza di rappresentazioni motorie dell'azione è un dato accertato in letteratura (Jannerod 1994; Jannerod, Decety 1995; Fadiga et al. 1995; Rizzolatti et al. 1996; Rizzolatti, Arbib 1998; Schubotz, von Cramon 2002).

Come già riportato nel capitolo 1, sappiamo che il sistema *mirror* che nell'uomo comprende anche l'area di Broca, contiene rappresentazioni di azioni della mano e che serve per riconoscerle.

"C'è una parola per designare ogni oggetto, e il viaggiatore scopre, stupefatto, che la storia degli uomini è in definitiva la storia di quegli oggetti e delle parole che li indicano e dei nessi esistenti fra gli uni e le altre, più i loro usi e disusi, il come, il fine per cui, il dove e il chi li ha prodotti. La storia così narrata non si ingombra di nomi, è la storia degli atti materiali, del pensiero che li determina, degli atti che determinano il pensiero."

José Saramago "Viaggio in Portogallo"

CONCLUSIONI

L'intuizione di Liberman (1967; 1985; 1991; 2000) secondo la quale i costituenti ultimi dello speech non sono i suoni, ma i gesti articolatori che li rendono possibili, ci permette di inserire lo *speech processing* nel più generale contesto del riconoscimento dell'azione.

Come enunciato nell'introduzione, l'ipotesi teorica da cui questo lavoro origina è che la produzione tecnologica preistorica dell'uomo e la sua capacità linguistica, classicamente associata all'area di Broca, possiedano un substrato neurale comune individuabile nel coinvolgimento del sistema motorio nei processi cognitivi (Fadiga, Craighero 2006, 2007; Rizzolatti, Arbib 1998).

In questo lavoro la produzione tecnologica dell'uomo, a partire dalla sua prima apparizione certa nel record archeologico intorno ai 2.6 Mya (Semaw 2000), è stata interpretata come manifestazione materiale di un atto motorio laddove per "atto motorio" si intende un movimento avente

uno scopo, cioè finalizzato. La produzione di uno strumento e la catena operativa necessaria alla sua produzione comportano l'esecuzione di numerosi atti motori.

I dati neurofisiologici esposti nel primo capitolo evidenziano come l'area di Broca, oltre alle sue classiche funzioni, sia coinvolta anche durante l'osservazione e l'esecuzione di azioni. Questi dati supportano l'ipotesi che quest'area possa rappresentare uno snodo centrale per il collegamento tra linguaggio, movimento e processi sensorimotori (Fadiga, Craighero 2006). Pertanto, il sistema motorio, classicamente associato solo alla mera esecuzione delle azioni, è coinvolto anche nella loro comprensione e, più in generale, nei processi cognitivi. Questo coinvolgimento, così come la comprensione immediata dell'azione, è possibile grazie al sistema *mirror* che, nell'uomo, comprende anche l'area di Broca.

Il sistema *mirror* permette la creazione di una rappresentazione interna dell'azione, non necessariamente vincolata alla sua esecuzione, ed integra le azioni osservate con il repertorio motorio dell'osservatore, come evidenziato dagli studi sull'*expertise* motoria (Calvo Merino et al. 2005, 2006; Cross et al. 2006, 2009, Gazzola et al. 2007). Tali studi, inoltre, evidenziano come sia la conoscenza motoria e non l'osservazione visiva il fattore principale di attivazione del sistema *mirror*; più vasto è il repertorio motorio dell'osservatore e più la codifica offerta dal sistema *mirror* è efficace.

Questa integrazione tra azione osservata e repertorio motorio dell'osservatore, suggerisce che il nostro cervello comprende le azioni in termini di simulazione motoria: la visione dell'azione simula la sua esecuzione e questa simulazione ne permette la comprensione.

L'omologia riscontrata tra gruppi di muscoli in osservazione ed esecuzione indica che il sistema *mirror* non risponde ai singoli movimenti delle dita, ma all'atto motorio, (Fadiga et al. 1995; Buccino et al. 2001; Rizzolatti et al. 2001) codificato a livello della corteccia premotoria, e l'attivazione della corteccia parietale codifica l'azione grazie alla sua organizzazione in catena. cioè è sensibile a livelli più astratti di organizzazione, non a un effettore specifico.

Oltre al riconoscimento dell'azione, il sistema *mirror* gioca un ruolo fondamentale nell'apprendimento di azioni che non fanno parte del nostro repertorio motorio: gli atti motori osservati vengono imitati, diventando, così, copie motorie dell'azione osservata ed entrando a far parte del nostro vocabolario motorio.

I risultati degli esperimenti di elettrofisiologia esposti nel capitolo 4 di questo lavoro, dimostrano che il *tool*, in quanto oggetto avente una funzione, viene precocemente riconosciuto e identificato come tale dal nostro cervello, tra 100 e 150 ms dalla presentazione dello stimolo, e immediatamente differenziato da oggetti ugualmente afferrabili, ma privi di scopo funzionale. La localizzazione della sorgente del segnale EEG nella porzione sinistra del giro frontale inferiore (IFG), cioè in un'area motoria e facente parte del circuito specchio, ci conferma che il *tool* acquisisce precocemente proprietà motorie. La maggior ampiezza assunta dalla componente P1 del segnale elettroencefalografico può dipendere da un aumento sensoriale specifico per i *tools* e questa facilitazione potrebbe favorire la percezione delle caratteristiche *action-related* dei *tools*.

Quando il primo scheggiatore ha iniziato ad utilizzare la sua mano come strumento e ha dato il via alla fabbricazione di altri strumenti, ha di certo

incrementato il suo vocabolario motorio. Forse solo una voce del dizionario, chissà. Un piccolo passo per l'uomo, un grande passo per l'umanità, avrebbero detto milioni di anni dopo altri uomini, da altri pianeti.

BIBLIOGRAFIA

- Aiello, L.C, Wheeler, P. 1995. The expensive-tissue hypothesis: the brain and the digestive system in human and primate evolution. *Curr Anthropol* 36:199-221.
- Berthelet, A., Chavaillon, J. (eds.) 1993. *The Use of Tools by Human and Non-human Primates*. Symposia of the Fyssen Foundation. Oxford: Clarendon Press.
- Binford, L. R. 1962. *Archaeology as Anthropology*. *American Antiquity* 28:217-225.
- Binkofski, F., Buccino, G., Posse, S., Seitz, R.J., Rizzolatti, G. & Freund, H.-J. 1999. A fronto-parietal circuit for object manipulation in man: evidence from an fMRI study. *Eur. J. Neurosci.*, II, 3276-286.
- Boe, L.-J., Heim, J.L., Honda, K., Maeda, S. 2002. The potential Neandertal vowel space was as large as that of modern humans. *Journal of Phonetics* 30:465-484.
- Boe, L.-J., Heim, J.L., Honda, K., Maeda, S., Badin, P., Abry, C. 2007. The vocal tract of newborn humans and Neanderthals: Acoustic capabilities and consequences for the debate on the origin of language. A reply to Lieberman (2007). *Journal of Phonetics* 35:564-581.

- Boeda, E. 1994. Le concept Levallois : variabilité des méthodes. Vol. 9. Monographie du CRA. Paris: CNRS éditions.
- Boesch, C. 2003. Is Culture a Golden Barrier Between Human and Chimpanzee? *Evolutionary Anthropology* 12:82-91.
- Boesch, C., Head, J., Robbins, M.M. 2009. Complex tool sets for honey extraction among chimpanzees in Loango National Park, Gabon. *Journal of Human Evolution* in press.
- Boule, M. 1913 L'Homme fossile de La Chapelle-aux-Saints. *Annales de Paléontologie Humaine*. Paris: Masson.
- Boule, M. 1921 Les hommes fossiles. *Eléments de Paléontologie Humaine*. Paris: Masson.
- Bruno, G. 1590 *Lo spaccio della bestia trionfante*, Ed. Rizzoli 1985
- Buccino, G., Binkofski, F., Fadiga, L., Fogassi, L., Gallese, V., Seitz, R.J., Zilles, K., Rizzolatti, G., Freund, H-J. 2001. Action observation activates premotor and parietal areas in a somatotopic manner: an fMRI study. *European Journal of Neuroscience* 13:400-404.
- Buccino, G., Vogt, S., Ritzl, A., Fink, G.R., Zilles, K., Freund, H-J., Rizzolatti, G. 2004. Neural Circuits Underlying Imitation Learning of Hand Actions: An Event-Related fMRI Study. *Neuron* 42:323-334.
- Buccino, G., Riggio, L., Melli, G., Binkofski, F., Gallese, V., Rizzolatti, G. 2005. Listening to action-related sentences modulates the activity of the motor system: A combined TMS and behavioral study. *Cognitive Brain Research* 24 (3):355-363.

- Calvo-Merino, B., Grèzes, J., Glaser, D.E., Passingham, R.E., Haggard, P. 2005. Action Observation and Acquired Motor Skills: An fMRI Study with Expert Dancers. *Cerebral Cortex* 15:1243-1249.
- Calvo-Merino, B., Grèzes, J., Glaser, D.E., Passingham, R.E., Haggard, P. 2006. Seeing or Doing? Influence of Visual and Motor Familiarity in Action Observation. *Current Biology* 16:1905-1910.
- Calvo-Merino, B., Grèzes, J., Glaser, D.E., Passingham, R.E., Haggard, P. . 2006. Seeing or Doing? Influence of Visual and Motor Familiarity in Action Observation - Erratum. *Current Biology* 16:1905-1910.
- Carbonell, E., Mosquera M., Rodriguez X.P. 2007. The emergence of technology: A cultural step or long-term evolution? *C. R. Palevol.* 6:231-233.
- Carey, D.P., Coleman, R.J., Della Sala, S. 1997. Magnetic Misreaching. *Cortex* 33: 639-652
- Chao, L. L., Haxby, J.V., Martin, A. 1999. Attribute-based neural substrates in temporal cortex for perceiving and knowing about objects. *Nature Neuroscience* 2:913-919.
- Chao, L. L., Martin, A. 2000. Representation of Manipulable Man-Made Objects in the Dorsal Stream. *Neuroimage* 12:478-484.
- Corballis, M. C. 1991. *The Lopsided Ape. Evolution of the Generative Mind.* New York, Oxford: Oxford University Press.
- Corballis, M.C. 1992. On the evolution of language and generativity. *Cognition* 44 (3): 197-226.

- Corballis, M. C. 2003. From mouth to hand: gesture, speech, and the evolution of right-handedness. *Behavioral and Brain Sciences* 26:199-208.
- Craighero, L., Fadiga, L., Rizzolatti, G., Umiltà, C. 1998. Visuomotor Priming. *Visual Cognition* 5:109-125.
- Craighero, L., Fadiga, L., Rizzolatti, G., Umiltà, C. 1999. Action for Perception A Motor—Visual Attentional Effect. *Journal of Experimental Psychology Human Perception and Performance* 25:1673-1692.
- Craighero, L., Fadiga, L., Umiltà, C.A., Rizzolatti, G. 1996. Evidence for visuomotor priming effect. *Neuroreport*, 8, 347-349.
- Cross, E. S., de C. Hamilton, A.F., Grafton, S.T. 2006. Building a motor simulation de novo: Observation of dance by dancers. *NeuroImage* 31:1257-1267.
- Cross, E. S., de C. Hamilton, A.F., Kraemer, D. J.M., Kelley, W.M., Grafton, S.T. 2009. Dissociable substrates for body motion and physical experience in the human action observation network. *European Journal of Neuroscience* in press.
- Dart, R. A. 1958. Bone Tools and Porcupine Gnawing. *American Anthropologist, New Series* 60:715-724.
- Dart, R. A. 1960. The Bone Tool-Manufacturing Ability of *Australopithecus Prometheus*. *American Anthropologist, New Series* 62:134-143.
- Darwin, C. 1871 *L'origine dell'uomo e la selezione sessuale*, Ed. Newton&Compton 2007
- de Beaune, S. A. 2004. The Invention of Technology. *Prehistory and Cognition. Current Anthropology* 45:139-162.

- de la Torre, I., Mora, R. 2005. Unmodified lithic material at Olduvai Bed I: manuports or ecofacts? *Journal of Archaeological Science* 32:273-285.
- de Saussure, F. 1916 *Cours de linguistique générale*. Editions Payot, Paris
- de' Sperati, C., Stucchi, N. 1997. Recognizing the motion of a graspable object is guided by handedness. *NeuroReport* 8:2761-2765.
- Decety, J., Grèzes, J. . 1999. Neural mechanisms subserving the perception of human actions. *Trends in Cognitive Science* 3:172-178.
- Dehaene, S., Duhamel, J-R., Hauser, M.K., Rizzolatti, G. (eds.). 2005. "From monkey brain to human brain." *Fyssen Foundation Symposium, St-Germain-en-Laye, 2005*, pp. 419.
- Delagnes, A., Roche, H. 2005. Late Pliocene hominid knapping skills: The case of Lokalalei 2C, West Turkana, Kenya. *Journal of Human Evolution* 48:435-472.
- Desmond Clark, J., Beyene, Y., WoldeGabriel, G., Hart, W.K., Renne, P.R., Gilbert, H., Defleur, A., Suwa, G., Katoh, S., Ludwig, K.R., Boisserie, J-R., Asfaw, B., White, T.D. 2003. Stratigraphic, chronological and behavioural contexts of Pleistocene *Homo sapiens* from Middle Awash, Ethiopia. *Nature* 423:747-752
- di Pellegrino, G., Fadiga, L., Fogassi, L., Gallese, V., Rizzolatti, G. 1992. Understanding motor events: a neurophysiological study. *Experimental Brain Research* 91:176-180.
- Diels, H., Krantz, W. (eds) 1951 *Die Fragmente der Vorsokratiker*

- Diez-Martin, F., Sanchez, P., Dominguez-Rodrigo, M., Mabulla, A., Barba, R. 2009. Were Olduvai Hominins making butchering tools or battering tools? Analysis of a recently excavated lithic assemblage from BK (Bed II, Olduvai Gorge, Tanzania). *Journal of Anthropological Archaeology* in press.
- Engels, F. 1876 Parte avuta dal lavoro nel processo di umanizzazione della scimmia. In: Mayer, G. Friedrich Engels, PBE, Torino, 1969
- Fadiga L., Fogassi L., Pavesi G., Rizzolatti G. 1995. Motor facilitation during action observation: a magnetic stimulation study. *Journal of Neurophysiology*, 73(6), 2608-2611.
- Fadiga, L., Buccino, G., Craighero, L., Fogassi, L., Gallese, V., Pavesi, G. 1999. Corticospinal excitability is specifically modulated by motor imagery: a magnetic stimulation study. *Neuropsychologia* 37:147-158.
- Fadiga, L., Fogassi, L., Gallese, V., Rizzolatti, G. 2000. Visuomotor neurons: ambiguity of the discharge or 'motor' perception? *International Journal of Psychophysiology* 35:165-177.
- Fadiga, L., Craighero, L., Buccino, G., Rizzolatti, G. 2002. Speech listening specifically modulates the excitability of tongue muscles: a TMS study. *European Journal of Neuroscience* 15:399-402.
- Fadiga, L., Craighero, L. 2003. New insights on sensorimotor integration: From hand action to speech perception. *Brain and Cognition* 53:514-524.
- Fadiga, L., Craighero, L. 2006. Hand actions and speech representation in Broca's area. *Cortex* 42:486-490.

- Fadiga, L., Roy, A.C., Fazio, P., Craighero, L. 2007. "From hand actions to speech: evidence and speculations," in *Attention and performance*. Edited by P. Haggard, Rossetti, Y., Kawato M.
- Falk, D. 1975 Comparative anatomy of the larynx in man and the chimpanzee: implications for language in Neanderthal, *American Journal of Physical Anthropology*, 43 (1), 123–132.
- Falk, D., Gibson, K. R. 2001. *Evolutionary Anatomy of the Primate Cerebral Cortex*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Falk, D. 2004. Prelinguistic evolution in early hominins: Whence motherese? *Behavioral and Brain Sciences* 27:491–541.
- Fogassi, L., Gallese, V., Buccino, G., Craighero, L., Fadiga, L., Rizzolatti, G. 2001. Cortical mechanism for the visual guidance of hand grasping movements in the monkey. A reversible inactivation study. *Brain* 124:571-586.
- Fogassi, L., Ferrari, P.F., Gesierich, B., Rozzi, S., Chersi, F., Rizzolatti, G. 2005. Parietal Lobe: From Action Organization to Intention Understanding. *Science* 308:662-667.
- Freud, S. 1899 *L'interpretazione dei sogni*, Newton&Compton 1999
- Gallese, V., Fadiga, L., Fogassi, L., Rizzolatti, G. 1996. Action recognition in the premotor cortex. *Brain* 119:593-609.
- Gangitano, M., Mottaghy, F.M., Pascual-Leon, A. 2004. Modulation of premotor mirror neuron activity during observation of unpredictable grasping movements. *European Journal of Neuroscience* 20:2193-2202.
- Gauthier, I., Tarr, M.J., Anderson, A.W., Skudlarski, P., Gore, J.C. 1999. Activation of the middle fusiform 'face area' increases

with expertise in recognizing novel objects. *Nature* 2 (6): 568-573.

- Gauthier, I., Skudlarski, P., Gore, J.C., Anderson, A.W. 2000. Expertise for cars and birds recruits brain areas involved in face recognition. *Nat. Neurosci* 3 191–197.
- Gazzaniga, M. S. 2000. *The new cognitive neurosciences.* . The MIT Press. Cambridge: Bradford Book.
- Gazzola, V., van der Worp, H., Mulder, T., Wicker, B., Rizzolatti, G., Keysers, C. 2007. Aplasic Born without Hands Mirror the Goal of Action with Their Feet. *Current Biology* 17(14): 1235-1240
- Geneste, M. 1985. *Analyse lithique d'industries mousteriennes du Périgord: une approche technologique du comportement des groupes humains au Paléolithique moyen.* Ph.D., Université de Bordeaux I.
- Gibson, J.J. 1979. *The Ecological Approach to the Visual Perception of Pictures.* *Leonardo*, 11 (3): 227-235.
- Gibson, K. R., Ingold, T. 1993. *Tools, language and cognition in human evolution.* Cambridge: Cambridge University Press.
- Goodall, J. 1964. Tool-using and aimed throwing in a community of free-living chimpanzees. *Nature*, 201:1264-1266.
- Goren-Inbar, N., Sharon, G., Kislev, M.E. 2002. Nuts, nut cracking, and pitted stones at Gesher Benot Ya‘aqov, Israel. *PNAS* 99:2455-2460.
- Grafton, S.T., Fadiga, L., Michael A. Arbib, M.A., Rizzolatti, G. 1997. Premotor Cortex Activation during Observation and Naming of Familiar Tools. *NeuroImage* 6, 231–236.
- Grèzes J, Costes N, Decety J. 1998. Top-down effect of strategy on the perception of human biological motion: a PET

investigation. *Cogn. Neuropsychol.* 15:553–82

- Grèzes, J., Tucker, M., Armony, J.L., Ellis, R., Passingham, R.E. 2003. Objects automatically potentiate action: an fMRI study of implicit processing. *Eur. J. Neurosci.* 17: 2735-2740
- Handy, T. C., Grafton, S.T., Shroff, N.M., Ketay, S., Gazzaniga, M.S. 2003. Graspable objects grab attention when the potential for action is recognized. *Nature Neuroscience* 6:421-427
- Handy, T.C. (ed.) 2004. *Event-Related Potentials: A Method Handbook*. The MIT Press.
- Heim, J-L., Boë L-J., Abry, C. 2002. La parole à la portée du conduit vocal de l'homme de Neandertal. *Nouvelles recherches, nouvelles*. *C.R.Palévol.* 1: 129-134.
- Heim, J.-L., Boë, L.J. 2005. "Les capacités phonatoires des hommes de Néandertal. Un essai de reconstitution des potentialités vocaliques.," in *Comportements des hommes du Paléolithique moyen et supérieur en Europe. Territoires et milieux*. Edited by D. Vialou, Renault-Miskovsky, J., Patou-Mathis, M., pp. 243-249. Liège: ERAUL 111.
- Henke, W., Tattersall, I., Hardt T. 2007. *Handbook of Paleoanthropology*. Vol. 1-3. Berlin, Haidelberg, New York Springer-Verlag.
- Holloway, R.L. 1969. Culture: A Human Domain. *Current Anthropology* 10 (4): 395-412.
- Holloway, R. L. 1981. Exploring the Dorsal Surface of Hominoid Brain Endocasts by Stereoplotter and Discriminant Analysis. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B* 1981 292, 155-166
- Holloway, R. L. 1983. Human paleontological evidence relevant to language behaviour. *Human Neurobiology* 2: 105-114.

- Holloway, R. L., Broadfield, D.C., Yuan, M.S. 2004. The Human Fossil Record. Volume III. Brain Endocasts and the Paleoneurological Evidence: Wiley-Liss.
- Iacoboni, M., Molnar.Szakacs, I., Gallese, V., Buccino, G., Mazziotta, J.C., Rizzolatti, G. 2005. Grasping the Intentions of Others with One's Own Mirror Neuron System. PLoS Biology:1-33.
- Iacoboni, M., Woods, R. P., Brass, M., Bekkering, H., Mazziotta J. C., Rizzolatti, G. 1999. Cortical mechanisms of human imitation. Science 286. 2526-2528.
- Inizan, M.-L., Reduron, M., Roche, H., Tixier, J. 1995. Technologie de la pierre taillée. Vol. 4. Préhistoire de la Pierre Taillée. Paris: CREP.
- Inoue, K., Kawashima, R., Sugiura, M., Ogawa, A., Schormann, T., Zilles, K., Fukuda, H. 2001. Activation in the Ipsilateral Posterior Parietal Cortex during Tool Use: A PET Study. Neuroimage 14:1469-1475.
- Jarvelainen, J., Schumann, M., Hari, R. 2004. Activation of the human primary motor cortex during observation of tool use. Neuroimage 23:187-192.
- Jeannerod M. 1994. The hand and the object: the role of posterior parietal cortex in forming motor representations. Can J Physiol Pharmacol. 72(5):535-41.
- Jeannerod M, Decety J. 1995. Mental motor imagery: a window into the representational stages of action. Curr Opin Neurobiol. 5(6):727-32.
- Jeannerod, M., Arbib, M.A., Rizzolatti, G., Sakata, H. 1995. Grasping objects: the cortical mechanisms of visuomotor transformation. Trends Neuroscience 18:314-320.

- Johnson-Frey, S. H. 2003. What's So Special about Human Tool Use? *Neuron* 39:201-204.
- Johnson-Frey, S. H. 2004. The neural bases of complex tool use in humans. *TRENDS in Cognitive Sciences* 8:71-78.
- Kanwisher, N. 2000. Domain specificity in face perception. *Nature* 3 (8): 759-763.
- Kimura D. 1993. Neuromotor mechanisms in human communication. Oxford University Press; Oxford.
- Kohler, E., Keysers, C., Umiltà, M.A., Fogassi, L., Gallese, V., Rizzolatti, G. 2002. Hearing Sounds, Understanding Actions: Action Representation in Mirror Neurons. *Science* 297:846-848.
- Kuhn, S.L. 2004. Evolutionary perspectives on technology and technological change. *World Archeology* 36 (4): 561-570.
- Laitman, J.T., Heimbuch, R.C., Crelin, E.S 1979. The basicranium of fossil hominids as an indicator of their upper respiratory systems. *Am. J. Phys. Anthropol.* 51:15-34.
- Laitman, J.T., Reidenberg, J.S. 1988. Advances in understanding the relationship between the skull base and larynx with comments on the origins of speech. *Human Evolution* 3: 99-109.
- Laitman, J.T., Reidenberg, J.S., Gannon, P.J. 1992. Fossil skulls and hominid vocal tracts: New approaches to charting the evolution of human speech. In (J. Wind et al eds) *Language Origin: A Multidisciplinary Approach*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 395-407.
- Leroi-Gourhan, A. 1943. *Evolution et techniques. L'homme et la matière*. Paris: Albin Michel.
- Leroi-Gourhan, A. 1945. *Evolution et techniques. Milieu et techniques*. Paris: Albin Michel.

- Leroi-Gourhan, A. 1964. Le geste et la parole I. Technique et langage. Paris: Albin Michel.
- Leroi-Gourhan, A. 1965. Le geste et la parole II. La mémoire et les rythmes. Paris: Albin Michel.
- Leroi-Gourhan, A. 1988. Dictionnaire de la préhistoire. Paris, Presses Universitaires de France.
- Liberman, A. M., Cooper, F.S., Shankweiler, D.P., Studdert-Kennedy, M. 1967. Perception of the speech code. *Psychological Review* 74:431-461.
- Liberman, A. M., Mattingly, I.G. 1985. The motor theory of speech perception revised. *Cognition* 21:1-36.
- Liberman, A.M., Wahlen, D.H. 2000. On the relation of speech to language. *Trends in Cognitive Science* 4 (5): 187-196.
- Lieberman, P., 1988 On human speech, syntax and language. *Human Evolution*, 3: 3- 18
- Lieberman, P., 1992 On the evolution of human language. In Hawkins, J.A., Murray, G.M. (eds) *The Evolution of Human Languages*. Perseus Publishing.
- Lieberman, D. E. 2002. On the Nature and Evolution of the Neural Bases of Human Language. *Yearbook of Physical Anthropology* 45:36-62.
- Lieberman, D. E., McCarty, R.C. 1999. The ontogeny of cranial base angulation in humans and chimpanzees and its implications for reconstructing pharyngeal dimensions. *Journal of Human Evolution* 36:487-517.
- Lieberman, D.E., McBratney, B.M., Kravits, G., 2002. The evolution and development of cranial form in *Homo sapiens*. *PNAS* 99: 1134-1139

- Lieberman, P. 2002. On the Nature and Evolution of the Neural Bases of Human Language. *Yearbook of Physical Anthropology* 45:36-62.
- Lieberman, P. 2007. The Evolution of Human Speech. Its Anatomical and Neural Bases. *Current Anthropology* 48:39-66.
- Lieberman, P., Crelin, E.S. 1971. On the Speech of Neanderthal Man. *Linguistic Inquiry* 11:203-222.
- Logothetis, N. K., Peled, S., Pauls, J. 1998. Development and application of fMRI for visual studies in monkeys. *Soc. Neurosci.* 24.
- Luppino G., Rizzolatti G. 2001. The organization of the frontal motor cortex. *News Physiol. Sci.* 15:219-224.
- MacNeilage, P. F. 1998. The frame/content theory of evolution of speech production. *Behavioral and Brain Sciences*, 21:499-511.
- Maeda F, Kleiner-Fisman G, Pascual-Leone A. 2002. Motor facilitation while observing hand actions: specificity of the effect and role of observer's orientation. *J. Neurophysiol.* 87:1329–35
- Malafouris, L., Renfrew, C. 2005. Steps to a neuroarchaeology of mind: Bridging the gap between neural and cultural plasticity. The University of Exeter Department of Archaeology - School of Geography, Archaeology and Earth Resources
- Mauss, M. 1924. Essai sur le don. Forme et raison de l'échange dans les sociétés primitives. *Année Sociologique* seconde série, 1923-1924:106.
- McGrew, W. C., Baldwin, P.J., Marchant, L.F., Pruetz, J.D., Scott, S.E., Tutin, C.E.G. 2003. Ethoarchaeology and Elementary Technology of Unhabituated Wild Chimpanzees at Assirik, Senegal, West Africa. *PaleoAnthropology* 5:1-20.

- Mora, R., de la Torre, I. 2005. Percussion tools in Olduvai Beds I and II (Tanzania): Implications for early human activities. *Journal of Anthropological Archaeology* 24:179-192.
- Murata A., Fadiga L., Fogassi L., Gallese V., Raos V., Rizzolatti G. 1997. Object representation in the ventral premotor cortex (area F5) of the monkey. *Journal of Neurophysiology*, 78, 2226-2230.
- Ohnuma, K., Aoki, K., Akazawa, T. 1997. Transmission of tool-making through verbal and non-verbal communication: preliminary experiments in Levallois flake production. *Anthropol Sci.* 105(3):159–68.
- Oldfield, R.C., 1971. The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia* 9 (1): 97-113.
- Papathanassiou, D., Etard, O., Mellet, E., Zago, L., Mazoyer, B., Tzourio-Mazoyer, N. 2000. A common language network for comprehension and production: A contribution to the definition of language epicenters with PET, *Neuroimage* 11:347–357.
- Pascual-Marqui, R.D. 2002 *Methods & Findings in Experimental & Clinical Pharmacology*. 24D:5-12.
- Peeters, R., Simone, L., Nelissen, K., Fabbri-Destro, M., Vanduffel, W., Rizzolatti, G., Orban, G.A. 2009. The Representation of Tool Use in Humans and Monkeys. Common and Uniquely Human Features. *The Journal of Neuroscience* 29(37):11523–11539 • 11523
- Pelegrin, J. 1991. Les savoir-faire : une très longue histoire. *Terrain* 16:106-113.
- Pelegrin, J. 1993. "A framework of analysing prehistoric stone tool manufacture and a tentative application to some early stone industry.," in *The Use of Tools by Human and Non-human*

- Primates. Symposia of the Fyssen Foundation. Edited by A. Berthelet, Chavaillon, J., pp. 302-314. Oxford: Clarendon Press.
- Pelegrin, J., Texier, P-J. 2004. Les techniques de taille de la pierre préhistorique. La tribologie. Dossier d'archéologie 290:26-33.
 - Perlès, C. 1991. "Economie des matières premières et économie de débitage: deux conceptions opposées?" 25 ans d'études technologique en Préhistoire, XI Rencontres Internationales d'Archéologie et d'Histoire d'Antibes, Juan-Les-Pins., 1991, pp. 35-45.
 - Petrides, M., Cadoret, G., Mackey, S. 2005. Orofacial somatomotor responses in the macaque monkey homologue of Broca's area. *Nature* 435:1235-1238.
 - Pigeot, N. 1991. Réflexions sur l'histoire technique de l'homme : de l'évolution cognitive à l'évolution culturelle. *Paléo* 3:167-200.
 - Rizzolatti G., Fadiga L., Matelli M., Bettinardi V., Paulesu E., Perani D., Fazio F. 1996. Localization of grasp representations in human by PET: 1. Observation versus execution. *Experimental Brain Research*, 111, 246-252.
 - Rizzolatti G., Fadiga L., Gallese V., Fogassi L. 1996. Premotor cortex and the recognition of motor actions. *Cognitive Brain Research*, 3, 131-141.
 - Rizzolatti, G., Arbib, M.A. 1998. Language within our grasp. *Trends Neuroscience* 21:188-194.
 - Rizzolatti, G., Luppino, G. 2000. The Organization of the Frontal Motor Cortex. *News Physiol. Sci.* 15:219-224.
 - Rizzolatti, G., Fogassi, L., Gallese, V. 2001. Neurophysiological mechanisms underlying the understanding and imitation of action. *Nature Neuroscience* 2:664-670.

- Rizzolatti, G., Luppino, G. 2001. The Cortical Motor System. *Neuron* 31:889-901.
- Rizzolatti, G., Craighero, L. 2004. The Mirror-Neuron System. *Annu. Rev. Neurosci.* 27:169-192.
- Rizzolatti G, Buccino G. 2005. The mirror neuron system and its role in imitation and language. In Dehaene, S., Duhamel, J.-R., Hauser, M.D., Rizzolatti, G., *From monkey brain to human brain* , The MIT Press, Cambridge, Mass: 213-233.
- Roche, H., Delagnes, A., Brugal, J-P., Feibel, C., Kibunjia, M., Mourrel, V., Texier, P-J. 1999. Early hominid stone tool production and technical skill 2.34 Myr ago in West Turkana, Kenya. *Nature* 399:57-60.
- Roux, V., Bril, B. 2005. Stone knapping: the necessary conditions for a uniquely hominin behaviour. McDonald Institute Monographs. Cambridge: McDonald Institute for Archaeological Research.
- Sakata, T., Murata, A., Mine, K., 1995. Neural Mechanisms of Visual Guidance of Hand Action in the Parietal Cortex of Monkey. *Cerebral Cortex* 5:429-438.
- Schick, K. D., Toth, N., Garufi, G., Savage-Rumbaugh, E.S., Rumbaugh, D., Sevcik, R. 1999. Continuing Investigations into the Stone Tool-making and Tool-using Capabilities of a Bonobo (*Pan Paniscus*). *Journal of Archaeological Science* 26:821-832.
- Schubotz, R. I., von Cramon, Y. 2002. Predicting Perceptual Events Activates Corresponding Motor Schemes in Lateral Premotor Cortex: An fMRI Study. *Neuroimage* 15:787-796.
- Schwartz, J.H., Tattersall, I. 2002. *The Human Fossil Record. Terminology and Craniodental Morphology of genus Homo. I. Europe.* Wiley Publisher.

- Semaw, S. 2000. The World's Oldest Stone Artefacts from Gona, Ethiopia: Their Implications for Understanding Stone Technology and Patterns of Human Evolution Between 2.6-1.5 Million Years Ago. *Journal of Archaeological Science* 27:1197-1214.
- Semaw, S., Rogers, M.J., Quade, J., Renne, P.R., Butler, R.F., Dominguez-Rodrigo, M., Stout, D., Hart, W.S., Pickering, T., Simpson, S.W. 2003. 2.6-Million-year-old stone tools and associated bones from OGS-6 and OGS-7, Gona, Afar, Ethiopia. *Journal of Human Evolution* 45:169–177.
- Semaw, S., Simpson, S.W., Quade, J., Renne, P.R., Butler, R.F., McIntosh, W.C., Levin, N., Dominguez-Rodrigo, M., Rogers, M.J. 2005. Early Pliocene hominids from Gona, Ethiopia. *Nature* 433:301-305.
- Stout, D., Chaminade, T. 2007. The evolutionary neuroscience of tool making. *Neuropsychologia* 45:1091-1100.
- Stout, D., Toth, N., Schick, K., Chaminade, T. 2008. Neural correlates of Early Stone Age toolmaking: technology, language and cognition in human evolution. *Phil. Trans. R. Soc. B* 14:1-11.
- Stout, D., Toth, N., Schick, K., Stout, J., Hutchins, G. 2000. Stone Tool-Making and Brain Activation: Position Emission Tomography (PET) Studies. *Journal of Archaeological Science* 27:1215–1223.
- Tanaka, J.W., Taylor, M. 1991. Object categories and expertise: is the basic level in the eye of the beholder?, *Cognitive Psychology* 23 (3): 457–482.
- Tobias, P.V. 1975. Brain evolution in the hominoidea. *Primate functional morphology and evolution*, ed. Russell H. Tuttle. Mouton.

- Tobias, P.V. 1987. The brain of Homo habilis: A new level of organization in cerebral evolution. *Journal of Human Evolution* 16:741-761.
- Tobias, P. V. 1991. "The emergence of spoken language in hominid evolution.,"n *Cultural Beginnings Approaches To Understanding Early Hominid Life-Ways in the African Savannah*. Edited by J. D. Clark, pp. 67-78. Bonn: Habelt.
- Trinkaus, E., Shipman, P. 1993. *The Neandertals. Changing the image of mankind*. New York: Alfred A. Knopf.
- Tucker, M., Ellis, R. 2001. The potentiation of grasp types during visual object categorization. *Visual Cognition* 8 (6): 769-800.
- Umiltà, M. A., Kohler, E., Gallese, V., Fogassi, L., Fadiga, L., Keysers, C., Rizzolatti, G. 2001. I Know What You Are Doing: A Neurophysiological Study. *Neuron* 31.
- Vandenberghe R, Dupont P, De Bruyn B, Bormans G, Michiels J, Mortelmans L, Orban GA 1996. The influence of stimulus location on the brain activation pattern in detection and orientation discrimination. *Brain* 119:1263–1276.
- Weiner, S., Addadi, L. 1997. Design strategies in mineralized biological materials. *J. Mater. Chem.*, 7, 689-702 (1997).
- White, T. D., Asfaw, B., DeGusta, D., Gilbert, H., Richards, G.D., Suwa, G., Clark Howell, F. 2003. Pleistocene Homo sapiens from Middle Awash, Ethiopia. *Nature* 423:742-747.
- White, T. D., Suwa, G., Hart, W.K., Walters, R.C., WoldeGabriel, G., de Heinzelin, J., Clark, J.D., Asfaw, B., Vrba, E. 1993. New discoveries of Australopithecus at Maka in Ethiopia. *Nature* 366:261-265.
- Wittgenstein, L. 1921 *Tractatus logico philosophicus*. Conte, A.G. (trad.) Paravia, Torino 1989

- Zani, A., Proverbio, A. (eds.) 2002. The cognitive electrophysiology of mind and brain. Academic Press.

INDICE

RINGRAZIAMENTI.....	2
INTRODUZIONE	5
CAPITOLO 1: IL SISTEMA MOTORIO E LA COMPrensIONE DELL'AZIONE	17
1.1 Implicazioni funzionali dell'area di Broca	17
1.2 Il sistema dei neuroni <i>mirror</i> nella scimmia	23
1.3 Il sistema <i>mirror</i> nell'uomo	27
1.4 Il sistema <i>mirror</i> e il linguaggio	30
1.5 Evoluzione del linguaggio ed evoluzione umana	33
CAPITOLO 2: L'UOMO E LA MATERIA	36
2.1 Parametri tecnici su cui si fonda il frazionamento delle rocce dure.....	38
2.2 Evoluzione del comportamento tecnico umano	40
2.3 La scheggiatura come attività motoria intenzionale e ideazionale	49
CAPITOLO 3: NEUROSCIENZE E PREISTORIA. NEUROARCHEOLOGIA	52
3.1 Neuroarcheologia: una nuova disciplina?	53
3.2 Stato dell'arte	54
3.3 Discussione	61
CAPITOLO 4: ESPERIMENTI.....	73
4.1 Premesse teoriche	73
4.2 L'elettroencefalografia.....	76
4.2.1 Caratteristiche del segnale.....	77
4.2.2 Registrazione EEG.....	79
4.3 Esperimenti: <i>toolness</i> ovvero, quando un oggetto diventa afferrabile per il cervello?.....	81
4.3.1 Ipotesi sperimentale	81
4.3.2 Partecipanti	82
4.3.3 Materiali e metodi	83
INDICE.....	123