

800 Hz), gli stimoli visivi erano rappresentati da un disco bianco e luminoso, mentre gli stimoli tattili erano impulsi elettrici innocui e non dolorosi, applicati al dito indice della mano destra.

L'attività multimodale delle corteccie primarie, dunque, non è limitata agli stimoli in qualche modo collegati alla modalità sensoriale di riferimento di ciascuna corteccia (come nel caso degli stimoli visivi con suono implicito impiegati da Meyer e colleghi), ma sembra essere generalizzabile a un qualunque tipo di stimolazione.

Per comprendere meglio fino a che punto le corteccie primarie sono in grado di distinguere stimoli di modalità differenti, in un secondo esperimento, Liang et al. [2013a] verificarono la capacità della corteccia uditiva primaria di distinguere due stimoli tattili applicati a due dita differenti della mano destra (indice e mignolo) e due stimoli visivi presentati in porzioni diverse del campo visivo destro (superiore e inferiore). È importante sottolineare che, fatta eccezione per la porzione di spazio in cui erano presentati, i due stimoli tattili e i due stimoli visivi erano identici in tutto e per tutto: i due stimoli tattili, cioè, erano impulsi elettrici di identica intensità e della medesima durata in ms; i due stimoli visivi avevano lo stesso grado di luminanza e venivano presentati per un tempo identico in ms.

È interessante osservare che A1 presenta *pattern* di attivazione significativamente diversi per ciascuno stimolo, dimostrando di poter distinguere efficacemente stimoli tattili applicati a due dita differenti e stimoli visivi presentati in porzioni differenti del campo visivo.

2.3 La multimodalità dei *neuroni specchio*

Questo tipo di multimodalità, per cui V1, A1 e S1 (la corteccia somatosensoriale primaria) sono in grado di elaborare stimoli di diverse modalità sensoriali, può essere esteso anche alla corteccia motoria primaria (M1).

I neuroni specchio (*mirror neurons*), scoperti dal gruppo di ricerca di Giacomo Rizzolatti all'inizio degli anni Novanta, rappresentano una popolazione di cellule in grado di attivarsi sia per l'esecuzione di un movimento specifico che per l'osservazione del medesimo movimento svolto da altri [ad es. Fadiga et al. 1995, Rizzolatti et al. 1996, Gallese et al. 1996, Rizzolatti e Arbib 1998, Umiltà et al. 2001, Ferrari et al. 2003, Iacoboni et al. 2005, Keysers e Gazzola 2010]. Un sottogruppo di questi neuroni presenta proprietà diverse, attivandosi in concomitanza con l'esecuzione di un certo movimento, l'osservazione del medesimo movimento svolto da altri e in seguito all'ascolto del rumore prodotto dal movimento stesso quando è eseguito da altri [Kohler et al. 2002]. I neuroni specchio, dunque, si possono considerare a pieno titolo multimodali.

Di norma questi neuroni vengono rintracciati al di fuori di M1, ma recentemente Vigneswaran et al. [2013] hanno dimostrato la loro presenza all'interno della corteccia motoria primaria delle scimmie.

Questo risultato sembrerebbe suggerire che la multimodalità rappresenti una proprietà molto comune e diffusa a tutte le cortecce primarie.

Il fatto che i neuroni specchio possano considerarsi come un esempio particolare di multimodalità li pone al centro del dibattito teorico contemporaneo presente in neurofisiologia e in filosofia (si veda in riferimento a questi temi il contributo di

Eleonora Severini in questa stessa rivista – n° 5, Gennaio 2012). In primo luogo, la scoperta di questi neuroni, alla fine degli anni Novanta del secolo scorso, segna uno dei punti di svolta dell'indagine neurofisiologica. L'attenzione verso i neuroni specchio testimonia, infatti, il passaggio ad una neurofisiologia che si basa sul presupposto che una stessa popolazione di neuroni possa svolgere più di una funzione e che, di conseguenza, osserva l'effetto degli stimoli in interazione. In secondo luogo, i neuroni specchio [come Rizzolatti e colleghi, ad es. Rizzolatti, Sinigaglia 2006, Caggiano et al. 2012, Cattaneo et al. 2013], attivandosi sia per azioni eseguite che osservate, sembrerebbero dare origine a una conoscenza automatica (in termini motori) delle azioni per cui si attivano.

Quest'ultima ipotesi interpretativa è fondamentale per due ragioni:

- suggerisce che la rappresentazione mentale di una specifica azione si sviluppi all'interno della corteccia motoria e non in aree associative di livello superiore;
- traccia un legame diretto fra conoscenza sensoriale/motoria e rappresentazioni mentali.

La comprensione dell'atto motorio che il circuito dei neuroni specchio fornisce è di natura completamente automatica e, in questo senso, costituirebbe un meccanismo di conoscenza alternativo (del tutto sensoriale) a quello cognitivo classico [ad es. Gallese, Lakoff 2005]. In altre parole, i neuroni specchio potrebbero costituire una prova sperimentale dell'*embodiment* (ossia del radicamento esperienziale dei concetti). [Id.; § 4.1].

In ambito filosofico, la posizione presentata da Gallese e Lakoff è stata spesso criticata perché considerata riduzionista [per un'analisi più specificatamente filosofica del

dibattito, si rimanda al contributo di Severini; si veda anche Paternoster 2002]. A questo proposito, è importante sottolineare che i neuroni specchio possono certamente rappresentare un meccanismo di conoscenza, ma altrettanto certamente non sono l'unico [per una breve rassegna delle obiezioni al riduzionismo si veda Di Francesco 2002, Paternoster 2002].

Al di là della convergenza interdisciplinare prodotta dalle riflessioni sul significato funzionale del sistema specchio, è interessante notare come, da un punto di vista neurofisiologico, la scoperta dei neuroni specchio, così come le riflessioni di Damasio riguardo alla compenetrazione profonda di meccanismi e strutture fra ragione ed emotività [Damasio 1994] siano completamente in linea con il paradigma teorico prevalente, caratterizzato da una maggiore attenzione verso la multimodalità, sia a livello di macro-aree, che a livello della singola cellula.

2.4 Neuroni multimodali e integrazione multisensoriale

La possibilità di una specifica area di rispondere a stimoli di modalità sensoriali differenti deriva sostanzialmente da due fattori:

- la presenza di gruppi di neuroni differenti, ciascuno di essi sensibile a una sola tipologia di input sensoriale, diversa da quella di un altro gruppo (i neuroni non sono multimodali, ma l'area corticale in cui sono inseriti lo è nel complesso perché, al suo interno, si trovano popolazioni di neuroni che rispondono a stimoli sensoriali differenti);
- la presenza di neuroni multimodali, ossia di neuroni in grado di rispondere a tipologie di stimoli differenti [cfr. ad es. Driver e Noesselt 2008].

I neuroni multimodali possono essere rintracciati in innumerevoli aree, corticali e sottocorticali [cfr. ad es. Ghazanfar e Schroeder 2006, Stein e Stanford 2008, Olcese et al. 2013]. Il gruppo più numeroso è rappresentato dai neuroni bimodali: cellule multisensoriali, in grado di attivarsi in risposta a input di due tipologie differenti (ad es. acustico e visivo, o visivo e somatosensoriale).

Olcese et al. [2013], in uno studio applicato a modelli animali, hanno osservato che, all'interno delle aree multimodali, i neuroni unisensoriali sono per la maggior parte organizzati in *cluster*: la probabilità che accanto a un neurone unisensoriale si trovi un altro neurone unisensoriale è significativamente superiore al caso (cioè non è *random*). Al contrario, i neuroni bimodali hanno una distribuzione diffusa (la probabilità che accanto a un neurone bimodale si trovi un altro neurone bimodale è pari al caso) e, infatti, popolazioni di neuroni bimodali possono essere rintracciate nella stragrande maggioranza delle aree corticali e sottocorticali, comprese le corteccie primarie [cfr. ad es. Vigneswaran et al. 2013].

La combinazione dell'informazione proveniente da differenti input sensoriali viene definita *integrazione multisensoriale* [ad es. Stein e Stanford 2008]. A livello cellulare, l'integrazione multisensoriale (contrapposta all'interazione multisensoriale o crossmodale di cui invece si parlerà nel paragrafo 3) rappresenta la differenza fra la risposta combinata (in termini di *spikes* elettrici) di un neurone multisensoriale in seguito a una stimolazione bimodale (ad es. acustica + visiva) e la risposta che si ottiene quando lo stesso neurone viene stimolato da una sola modalità alla volta (ad es. acustica o visiva).

La risposta di un neurone multisensoriale in seguito all'integrazione di due input sensoriali differenti può essere di tre tipi [Stein e Stanford 2008]:

1. *superadditiva*: in seguito alla stimolazione combinata (acustica (a)+visiva (v)), la risposta del neurone multisensoriale risulta superiore alla somma delle due risposte ottenute dalla stimolazione unisensoriale – $risposta(a+v) > risposta(a) + risposta(v)$; si parla anche di *multisensory enhancement*;
2. *additiva*: in seguito alla stimolazione combinata (a+v), la risposta del neurone multisensoriale risulta uguale alla somma delle due risposte ottenute dalla stimolazione unisensoriale – $risposta(a+v) = risposta(a) + risposta(v)$;
3. *subadditiva*: in seguito alla stimolazione combinata (a+v), la risposta del neurone multisensoriale risulta inferiore alla somma delle due risposte ottenute dalla stimolazione unisensoriale – $risposta(a+v) < risposta(a) + risposta(v)$ [cfr. Stein e Stanford 2008].

La risposta superadditiva (*multisensory enhancement*) è considerata l'esempio tipico di integrazione multisensoriale. Si tratta di un fenomeno estremamente vantaggioso, in quanto permette di riconoscere più facilmente gli eventi sensoriali. Nel caso in cui l'integrazione multisensoriale sia superadditiva, infatti, la soglia di percezione degli stimoli si abbassa [si veda ad es. Driver e Noesselt 2008]. Inoltre, in corrispondenza di *multisensory enhancement*, gli input sensoriali vengono percepiti più velocemente; si osserva, cioè, un abbassamento delle latenze di risposta [si veda ad es. Rowland et al. 2007].

Da un punto di vista evolutivo, d'altra parte, non stupisce che il nostro sistema nervoso sia più sensibile agli eventi sensoriali che coinvolgono più di una modalità

contemporaneamente, in quanto, soprattutto in *setting* naturali, gli eventi sono tipicamente multisensoriali [Stein e Stanford 2008].

Soltanto recentemente è stato possibile dimostrare che l'integrazione multisensoriale, ottenuta tramite una stimolazione bimodale, sia sostanzialmente differente dalla integrazione unisensoriale, ossia la risposta di un neurone unimodale in corrispondenza di due stimoli appartenenti alla medesima modalità (ad esempio due stimoli visivi, v_1+v_2). Alvarado et al. [2007] hanno misurato la risposta, nel caso di integrazione unisensoriale (v_1+v_2), di neuroni del collicolo superiore. La risposta che si ottiene dalla stimolazione unisensoriale combinata è per la maggior parte subadditiva: risposta (v_1+v_2) < risposta (v_1) + risposta (v_2). In altre parole, non si osserva *multisensory enhancement*. Al contrario, nella maggioranza dei neuroni bimodali esaminati nel collicolo superiore, la risposta in seguito a stimolazione combinata multisensoriale risulta superadditiva, dimostrando così una differenza significativa fra l'integrazione multisensoriale e unisensoriale [ib.].

Gli eventi multisensoriali, dunque, sembrano presentare un chiaro vantaggio, in termini di processamento, rispetto agli input puramente unisensoriali. Fino a pochi anni fa, tuttavia, si era convinti che soltanto i neuroni bimodali o trimodali potessero modulare la loro attività in base all'elaborazione di stimoli multisensoriali [ad es. Stein e Meredith 1993, Driver e Noesselt 2008], mentre si riteneva che i neuroni unimodali fossero pressoché insensibili alla presenza di input sensoriale combinato (ad esempio visivo + acustico). Ma uno studio recente ha messo in dubbio questa ipotesi. Allman et al. [2009] hanno registrato *in vivo* l'attività di alcuni neuroni all'interno della corteccia visiva del gatto (più specificatamente nella corteccia visiva soprasilviana posterolaterale laterale –

PLLS). Il paradigma sperimentale prevedeva l'utilizzo di stimoli visivi (una linea luminosa in movimento) e stimoli acustici (50 ms di *white noise*). Per prima cosa, i ricercatori verificarono le proprietà dei neuroni di cui riuscirono a registrare l'attività (circa 250 cellule). Soltanto il venti per cento dei neuroni sensoriali esaminati risultò multimodale, cioè in grado di rispondere sia a stimoli visivi che uditivi. Per il resto, la popolazione di neuroni osservata si dimostrò sostanzialmente unimodale (cioè rispondeva soltanto a stimoli visivi).

In un secondo momento, Allman e colleghi misurarono l'attività dei neuroni unimodali visivi in corrispondenza di uno stimolo visivo soltanto e di una stimolazione combinata (visiva + acustica). Sorprendentemente, l'ottanta per cento dei neuroni unimodali osservati mostrava una attivazione significativamente più grande in corrispondenza di una stimolazione combinata, rispetto ai *trial* sperimentali in cui erano stati presentati soltanto stimoli visivi. Questo risultato è estremamente importante in quanto dimostra che anche l'attività di neuroni puramente unisensoriali (bisogna ricordare che i neuroni presi in considerazione da Allman et. al [2009] non rispondevano agli stimoli acustici e dunque non possono essere definiti multimodali) è significativamente modulata dalla contemporanea occorrenza di stimoli di altre modalità sensoriali. Lo studio di Allman et al. [2009], insieme a lavori svolti su altre specie [come quello di Bizley et al. 2007, basato sulla *mutual information*], ci permette di reinterpretare il concetto di neurone unisensoriale. Di fatto, la multisensorialità sembrerebbe avere una influenza chiave sull'elaborazione degli stimoli, con effetti diffusi perfino alle aree sensoriali primarie e ai neuroni puramente unimodali.

3. INTERAZIONI CROSSMODALI E ILLUSIONI PERCETTIVE

Se da un punto di vista neurofisiologico, le connessioni fra le diverse aree sensoriali (anche primarie) sono largamente diffuse e l'attività di gran parte dei neuroni è profondamente modulata dalla multisensorialità dell'input, da un punto di vista psicofisico, in letteratura sono riportati innumerevoli esempi di interazioni fra diverse modalità sensoriali a livello percettivo [ad es. Calvert et al. 2004].

Alcune di queste interazioni possono dare origine ad illusioni percettive, come nel caso del *ventriloquism effect*: quando uno stimolo uditivo e uno stimolo visivo, provenienti da due sorgenti spaziali differenti, sono presentati contemporaneamente, i soggetti tendono a ritenere che lo stimolo uditivo provenga dalla stessa posizione (*location*) dello stimolo visivo [*visual capture of sound*, ad es. Thurlow e Rosenthal 1976 e per uno studio più recente, Magosso et al. 2012].

Di seguito verrà proposta una breve rassegna⁸ delle interazioni cross-modali più note, suddivise in base alle modalità sensoriali di riferimento.

3.1 Interazioni fra visione e udito

Le interazioni fra stimoli visivi ed uditivi sono forse quelle più frequentemente riportate dalla letteratura di ambito psicofisico [per una *review* sull'argomento si veda Marks 2004]. Per citare alcuni esempi, la presentazione contemporanea di stimoli visivi e uditivi è in grado di abbassare la soglia percettiva degli stimoli uditivi [Lovelace et al. 2003]. In uno studio simile, Odgaard et al. [2004] hanno dimostrato che i partecipanti

⁸ Gli studi di psicofisica sulle interazioni cross-modali hanno una tradizione secolare, fra psicologia e neurofisiologia. Per questo motivo, la rassegna che propongo deve essere considerata come una piccola presentazione di alcuni studi selezionati sull'argomento, senza alcuna pretesa di esaustività.

all'esperimento giudicavano gli stimoli uditivi (50 ms di *white noise*) come più intensi nel caso in cui fossero combinati con una stimolazione visiva.

Le interazioni riportate fra stimoli visivi e uditivi sembrano essere reciproche. Esistono, infatti, molti studi in cui sono gli stimoli uditivi a influenzare l'elaborazione di input visivi [ad es. Frassinetti et al. 2002, Jaekl e Harris 2007, Oruc et al. 2008, Burr et al. 2009].

Non tutte le interazioni cross-modali fra visione e udito, tuttavia, possono considerarsi simmetriche. L'*effetto Colavita*, per esempio (chiamato con il nome dello studioso che lo scoprì nei primi anni Settanta), è la dimostrazione di una dominanza della visione sull'udito, nel caso in cui si applichi uno specifico paradigma sperimentale. Nell'esperimento originale [Colavita 1974], i partecipanti dovevano riconoscere gli stimoli a cui venivano sottoposti (visivi o uditivi) il più velocemente possibile. Il paradigma era formato da una maggioranza di *trial* unimodali, in cui veniva presentato un singolo stimolo (visivo o uditivo). In alcuni *trial*, infine, all'insaputa dei partecipanti all'esperimento, venivano presentati uno stimolo visivo e uno uditivo contemporaneamente (*trial* bimodali). In questo tipo di paradigma, i soggetti tendono a non accorgersi della presenza degli stimoli uditivi nei *trial* bimodali.

Molti studiosi, nei decenni successivi, hanno cercato di replicare i risultati di Colavita, provando anche a proporre delle spiegazioni per questo effetto. Il gruppo di ricerca di Charles Spence ha recentemente proposto alcune interpretazioni. Koppen e Spence [2007], per prima cosa, hanno dimostrato che l'*effetto Colavita* (e dunque anche la supposta dominanza visiva sugli stimoli uditivi) viene drasticamente ridimensionato, correggendo alcuni parametri dell'esperimento iniziale, che di fatto davano origine a dei

bias sperimentali. Semplicemente facendo in modo che i *trial* bimodali avessero, per esempio, la stessa probabilità di occorrenza (cioè fossero altrettanto frequenti) dei *trial* unimodali, la dominanza visiva nei *trial* a stimolazione combinata risultava fortemente diminuita [ib., si veda anche Spence 2009]. Seppure con meno evidenza, però, la presenza dell'*effetto Colavita* viene confermata anche da studi più recenti.

Secondo Spence [2009], la chiave per interpretare la dominanza della visione sull'elaborazione degli stimoli uditivi nel paradigma di Colavita sta in uno studio realizzato nel 2007 da Sinnett e colleghi. Sinnett et al. [2007] hanno dimostrato che la presenza di una stimolazione combinata visiva + uditiva modifica i tempi di risposta dei partecipanti, in un paradigma in cui si chiede ai soggetti di rispondere il più velocemente possibile alla presentazione di uno stimolo (sia esso visivo o uditivo). In particolare, quando si osservano i tempi di risposta dei soggetti si nota che, in media, nei *trial* unimodali, i partecipanti rispondono più velocemente agli stimoli uditivi che a quelli visivi. Nei *trial* bimodali, i tempi di risposta risultano maggiori rispetto a quelli evocati dalla sola stimolazione uditiva e minori rispetto a quelli evocati dalla sola stimolazione visiva [ib.].

Questo risultato è molto importante in quanto suggerisce che gli stimoli uditivi siano in grado di velocizzare il riconoscimento di stimoli visivi presentati contemporaneamente ad essi; al contrario, gli stimoli visivi sembrano rallentare il riconoscimento di stimoli uditivi ad essi combinati.

Spence [2009] ritiene che sia proprio questa speciale (e asimmetrica) interazione cross-modale a spiegare l'*effetto Colavita*. La facilitazione che gli stimoli uditivi producono

sul riconoscimento degli stimoli visivi, abbassando i tempi di risposta, potrebbe infatti essere l'origine della "dominanza" visiva osservata nei paradigmi Colavita.

3.2 Interazioni fra tatto e udito

Come per la visione, gli stimoli tattili (ovvero somatosensoriali non nocivi) sono in grado di modulare l'elaborazione di stimoli uditivi concomitanti. Gillmeister e Eimer [2007] hanno dimostrato che la presentazione simultanea di stimoli somatosensoriali e uditivi abbassa la soglia percettiva dei partecipanti, rispetto a quando gli stimoli uditivi sono presentati in isolamento. Nel caso di trial bimodali (uditivi e somatosensoriali), inoltre, i soggetti considerano gli stimoli uditivi come più intensi, rispetto a trial unimodali in cui sia impiegata la medesima stimolazione uditiva, ma in isolamento [Schürmann et al. 2004].

Caclin et al. [2002] hanno mostrato che la stimolazione somatosensoriale è in grado di influenzare la localizzazione di un suono (*tactile capture of sound*). Nell'esperimento, ai partecipanti veniva richiesto di indicare la provenienza (a destra o a sinistra della testa) di alcuni suoni. In alcuni trial, ai suoni (*target* dell'esperimento) veniva abbinata la stimolazione somatosensoriale del dorso della mano. In alcuni casi, la stimolazione somatosensoriale era congruente con la provenienza dello stimolo uditivo (ad es. destra, mano destra), mentre in altri risultava incongruente (ad es. destra, mano sinistra). I risultati mostrano che la presenza di una stimolazione somatosensoriale incongruente è in grado di influenzare significativamente il giudizio sulla provenienza del suono *target* [Caclin et al. 2002].

Gli stimoli somatosensoriali, tuttavia, non sembrano essere altrettanto facilmente influenzabili dagli stimoli uditivi (si veda ad es. Oruc et al. 2008). Mentre l'elaborazione degli stimoli uditivi sembra essere molto facilmente influenzabile da input di altre modalità sensoriali (ad es. visivi o somatosensoriali, come dimostrato anche dall'*effetto Colavita*), gli stimoli uditivi sembrerebbero “distrattori” scarsamente potenti (ad es. Soto-Faraco et al. 2004, Oruc et al. 2008).⁹

L'asimmetria di alcune interazioni cross-modali è un fattore importante che è possibile mettere in relazione anche ad aspetti più tipicamente *top down* dell'elaborazione sensoriale. Ronga et al. [2012a] hanno mostrato che le sinestesie linguistiche più comuni – le espressioni che abbinano termini di sfere sensoriali differenti, come ad es. *colori caldi, profumo dolce* – sono costruite in base allo schema delle interazioni cross-modali più efficaci. Le metafore sinestesiche, dunque, non sono prodotte casualmente, ma riflettono i *pattern* di abbinamento dell'esperienza sensoriale. Nelle sinestesie linguistiche, è estremamente raro trovare termini che si riferiscano alla modalità uditiva in posizione di modificatori (cioè fondamentalmente attributi, come ad es. *?sapore tintinnante*), un aspetto che riflette pienamente la scarsa efficacia degli stimoli uditivi come “distrattori” (vedi sopra).

Al contrario, le sinestesie composte da una testa (principalmente sostantivi) uditiva che viene modificata da un termine proveniente da una sfera sensoriale diversa, sono molto comuni: ad es. *suono brillante, musica dolce, canto delicato, voce vellutata* [Ronga et al. 2012a; per un lavoro sul radicamento esperienziale delle sinestesie gustative, si veda

⁹ Anche se in letteratura esistono alcuni esempi di influenza uditiva sull'elaborazione di stimoli somatosensoriali [Bresciani et al. 2005, Soto-Faraco e Deco 2009].

Ronga *in press*], come d'altra parte sono molto frequenti i casi in cui l'elaborazione degli stimoli uditivi viene influenzata da stimoli di altre modalità sensoriali.

4. DALLA MULTIMODALITÀ ALLA COMPLESSITÀ

4.1. Multimodalità ed *embodiment*

Gli studi che sono stati presentati finora, molti dei quali usciti negli ultimi anni, dipingono il quadro di un sistema nervoso profondamente connotato dalla multimodalità.

Si tratta di una multimodalità a vari livelli: da un lato, il sistema nervoso sembra avvantaggiare l'elaborazione degli input multisensoriali rispetto a quelli unimodali, presenta circuiti destinati al rapido riconoscimento e al processamento delle proprietà multimodali, si basa sull'interazione continua fra aree differenti; dall'altro, forse per ragioni di *economicità*, la specializzazione funzionale (che pure è presente) talvolta lascia il posto allo sfruttamento della medesima popolazione di neuroni per una pluralità di funzioni (proprio come un ufficio il cui organico sia limitato).

In ogni caso, sia che si guardi alle singole cellule che alle connessioni fra le diverse aree, la multisensorialità appare più come la regola che come un'eccezione limitata a poche strutture.

Considerando questa prospettiva, anche la nozione di *embodiment*, così come viene presentata dalla linguistica cognitiva [ad es. Lakoff, Johnson 1980, Johnson 1987, Hampe, Grady 2005, Gallese, Sinigaglia 2011], assume nuove connotazioni. L'idea che il linguaggio sia radicato nell'esperienza percettiva e sia elaborato all'interno delle stesse strutture che si occupano del processamento sensoriale e motorio non rappresenta

più un'eccezione nel panorama delle funzioni del sistema nervoso. Al contrario, l'idea di un modulo separato per il linguaggio, che si occupi selettivamente di una singola funzione, risulterebbe in forte contrasto con l'attuale *mainstream* teorico in neurofisiologia.

Da questo punto di vista, l'ipotesi della *grounded cognition* [ad es. Barsalou 2008] rappresenta il correlato più naturale, in linguistica, psicologia e filosofia, del paradigma multimodale nelle scienze dure.

4.2 Verso la complessità

L'*issue* di *Nature* di agosto 2013 (n. 501) è completamente incentrato sulle ricerche che riguardano il “connettoma”. Lo *Human connectome project*, un progetto di ricerca inaugurato nel 2009, riguarda l'insieme di studi che esaminano le connessioni fra i neuroni e ha come scopo quello di tracciare una vera e propria mappa delle connessioni nel sistema nervoso umano. Helmstaedter et al. [2013] sono appena riusciti nella straordinaria impresa di ricostruire la mappatura delle connessioni (milioni) fra 950 neuroni della retina (e in particolare dello strato plessiforme interno, IPL) del topo. Essere in grado di ricostruire le connessioni fra i neuroni è certamente di fondamentale importanza: capire come le cellule nervose sono collegate fra loro ci permetterà, infatti, di comprendere meglio la loro struttura e il loro funzionamento [si veda ad es. il *commentary* di Masland 2013]. Inoltre, mentre le tipologie di cellule nervose sono comuni a tutti gli esemplari di una specie, la rete di connessioni che collega i neuroni è specifica per ogni individuo: in un certo senso, sembrerebbe che la chiave dell'unicità di ciascun sistema nervoso risieda nel connettoma.

Il rischio maggiore di un approccio puramente neurofisiologico alle funzioni cognitive del sistema nervoso è rappresentato dal riduzionismo (§ 2.3). Questa nuova prospettiva di analisi neurofisiologica, incentrata sulla complessità della rete delle connessioni nel cervello, suggerisce una diversa attenzione al problema del riduzionismo biologico; i sistemi complessi, infatti, assumono la presenza di interazioni così profonde e diffuse che il risultato finale non è prevedibile dall'analisi delle parti da cui il sistema è composto. Lo sviluppo degli studi sulla multimodalità e delle ricerche scientifiche del sistema nervoso, nel quadro dei sistemi complessi, potrà, forse in futuro, contribuire al dibattito filosofico su mente-cervello.

Le modalità di questo incontro e le metodologie di una possibile discussione aperta fra neurofisiologia e filosofia sono però, in gran parte, ancora da definire.

Il campo della filosofia della mente è determinato dall'incontro tra annose sotto-tradizioni filosofiche, quali la metafisica, l'epistemologia, la filosofia del linguaggio, la filosofia della psicologia, da un lato, e dall'altro recenti aree disciplinari, quali neuroscienze, scienze cognitive, intelligenza artificiale, le quali, per di più, non si limitano a offrire "dati" alla tranquilla riflessione del filosofo, ma contengono al loro interno importanti assunzioni metafisiche, epistemologiche e anche etiche, che ne caratterizzano l'intima struttura, le metodologie, e ne influenzano (almeno secondo alcuni) i risultati. [Di Francesco 2002: 19].

In questo passo, Di Francesco tocca probabilmente uno fra i problemi metodologici più cruciali delle scienze dure, ovvero l'*interpretazione* dei dati raccolti. Tuttavia, l'influenza di paradigmi differenti e di assunzioni teoriche esplicite o implicite può essere rintracciata in varie fasi dell'indagine scientifica, dalla progettazione degli esperimenti stessi, alla lettura delle osservazioni empiriche, ai metodi statistici utilizzati per l'elaborazione dei dati.

Per questo motivo, sarebbe auspicabile una compenetrazione più profonda fra il dibattito filosofico e l'analisi neurofisiologica: per esplicitare ed approfondire la

discussione teorica inevitabilmente collegata allo studio del sistema nervoso e delle sue funzioni.

BIBLIOGRAFIA

Allman B. L., Keniston L. P., Meredith M. A. (2009), “Not just for bimodal neurons anymore: the contribution of unimodal neurons to cortical multisensory processing”, *Brain Topography*, 21, 3-4, pp. 157-167.

Alvarado J. C., Vaughan J. W., Stanford T. R., Stein B. E. (2007), “Multisensory versus unisensory integration: contrasting modes in the superior colliculus”, *Journal of Neurophysiology*, 97, 5, pp. 3193-3205.

Amedi A., Floel A., Knecht S., Zohary E., Cohen L. G. (2004), “Transcranial magnetic stimulation of the occipital pole interferes with verbal processing in blind subjects”, *Nature Neuroscience*, 7, 11, pp. 1266-1270.

Barsalou L. W. (2008), “Grounded cognition”. *Annual Review of Psychology*, 59, pp. 617-645.

Bazzanella C. (1994), *Le facce del parlare*, La Nuova Italia, Firenze.

Bazzanella C. (2005/2008), *Linguistica e pragmatica del Linguaggio*, Laterza, Bari.

Beckers G., Homberg V. (1992), “Cerebral visual motion blindness: transitory akinetopsia induced by transcranial magnetic stimulation of human area V5”, *Proc Biol Sci*, 249, 1325, pp. 173-178.

Berger C. C., Ehrsson H. H. (2013), “Mental imagery changes multisensory perception”, *Current Biology*, 23, 14, pp. 1367-1372.

- Bizley J. K., Nodal F. R., Bajo V. M., Nelken I., King A. J. (2007), “Physiological and anatomical evidence for multisensory interactions in auditory cortex”, *Cerebral Cortex*, 17, 9, pp. 2172-2189.
- Bresciani J. P., Ernst M. O., Drewing K., Bouyer G., Maury V., Kheddar A. (2005), “Feeling what you hear: auditory signals can modulate tactile tap perception”, *Experimental Brain Research*, 162, 2, pp. 172-180.
- Bublitz W., Norrick N. R. (2011), *Foundations of pragmatics*, De Gruyter Mouton, Berlin-Boston.
- Budinger E., Heil P., Hess A., Scheich H. (2006), “Multisensory processing via early cortical stages: Connections of the primary auditory cortical field with other sensory systems”, *Neuroscience*, 143, 4, pp. 1065-1083.
- Burr D., Banks M. S., Morrone M. C. (2009), “Auditory dominance over vision in the perception of interval duration”, *Experimental Brain Research*, 198, 1, pp. 49-57.
- Caclin A., Soto-Faraco S., Kingstone A., Spence C. (2002), “Tactile “capture” of audition”. *Perception and Psychophysics*, 64, 4, pp. 616-630.
- Caggiano V., Fogassi L., Rizzolatti G., Casile A., Giese M. A., Thier P. (2012), “Mirror neurons encode the subjective value of an observed action”, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109, 29, pp. 11848-11853.
- Calvert G., Spence C., Stein B. E. (2004), *The handbook of multisensory processes*, The MIT Press, Cambridge, Mass.

- Calvert G. A., Bullmore E. T., Brammer M. J., Campbell R., Williams S. C., McGuire P. K., Woodruff P. W., Iversen S. D., David A. S. (1997), “Activation of auditory cortex during silent lipreading”, *Science*, 276, 5312, pp. 593-596.
- Cattaneo L., Maule F., Barchiesi G., Rizzolatti G. (2013), “The motor system resonates to the distal goal of observed actions: testing the inverse pliers paradigm in an ecological setting”. *Experimental Brain Research*, 231, 1, pp. 37-49.
- Cauda F., D’Agata F., Sacco K., Duca S., Geminiani G., Vercelli A. (2011). “Functional connectivity of the insula in the resting brain”, *Neuroimage*, 55, 1, pp. 8-23.
- Chomsky N. (1957), *Syntactic Structures*, Mouton de Gruyter, Berlin.
- Colavita F. B. (1974), “Human sensory dominance”. *Perception and Psychophysics*, 16, pp. 409-412.
- Constantinople C. M., Bruno R. M. (2013), “Deep cortical layers are activated directly by thalamus”, *Science*, 340, 6140, pp. 1591-1594.
- Corbetta M., Shulman G. L. (2002), “Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain”, *Nat Rev Neurosci*, 3, 3, pp. 201-215.
- Damasio A. (1994), *L’errore di Cartesio. Emozioni, ragione e cervello umano*, Adelphi, Milano.
- Di Francesco M. (2002), *Introduzione alla filosofia della mente*, Carocci, Roma.
- Driver J., Noesselt T. (2008), “Multisensory interplay reveals crossmodal influences on ‘sensory-specific’ brain regions, neural responses, and judgments”, *Neuron*, 57, 1, pp. 11-23.

- Dum R. P., Levinthal D. J., Strick P. L. (2009), “The spinothalamic system targets motor and sensory areas in the cerebral cortex of monkeys”, *Journal of Neuroscience*, 29, 45, pp. 14223-14235.
- Fadiga L., Fogassi L., Pavesi G., Rizzolatti G. (1995), “Motor facilitation during action observation: a magnetic stimulation study”, *Journal of Neurophysiology*, 73, 6, pp. 2608-2611.
- Felleman D. J., Van Essen D. C. (1991), “Distributed hierarchical processing in the primate cerebral cortex”, *Cerebral Cortex*, 1, 1, pp. 1-47.
- Ferrari P. F., Gallese V., Rizzolatti G., Fogassi L. (2003), “Mirror neurons responding to the observation of ingestive and communicative mouth actions in the monkey ventral premotor cortex”, *European Journal of Neuroscience*, 17, 8, pp. 1703-1714.
- Foxworthy W. A., Clemo H. R., Meredith M. A. (2013), “Laminar and connective organization of a multisensory cortex”, *Journal of Comparative Neurology*, 521, 8, pp. 1867-1890.
- Frassinetti F., Bolognini N., Ladavas E. (2002), “Enhancement of visual perception by crossmodal visuo-auditory interaction”, *Experimental Brain Research*, 147, 3, pp. 332-343.
- Gallese V. (2008), “Mirror neurons and the social nature of language: the neural exploitation hypothesis”, *Soc Neurosci*, 3, 3-4, pp. 317-333.
- Gallese V., Fadiga L., Fogassi L., Rizzolatti G. (1996), “Action recognition in the premotor cortex”, *Brain*, 119 (Pt 2), pp. 593-609.

- Gallese V., Lakoff G. (2005), “The Brain’s concepts: the role of the Sensory-motor system in conceptual knowledge”, *Cogn Neuropsychol*, 22, 3, pp. 455-479.
- Gallese V., Sinigaglia C. (2011), “What is so special about embodied simulation?”, *Trends Cogn Sci*, 15, 11, pp. 512-519.
- Ghazanfar A. A., Schroeder C. E. (2006), “Is neocortex essentially multisensory?”, *Trends Cogn Sci*, 10, 6, pp. 278-285.
- Gillmeister H., Eimer M. (2007), “Tactile enhancement of auditory detection and perceived loudness”, *Brain Research*, 1160, pp. 58-68.
- Helmstaedter M., Briggman K. L., Turaga S. C., Jain V., Seung H. S., Denk W. (2013), “Connectomic reconstruction of the inner plexiform layer in the mouse retina”, *Nature*, 500, 7461, pp. 168-174.
- 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 Biol*, 3, 3, pp. e79.
- Iannetti G. D., Mouraux A. (2010), “From the neuromatrix to the pain matrix (and back)”, *Experimental Brain Research*, 205, 1, pp. 1-12.
- Jaekl P. M., Harris L. R. (2007), “Auditory-visual temporal integration measured by shifts in perceived temporal location”, *Neuroscience Letters*, 417, 3, pp. 219-224.
- Keysers C., Gazzola V. (2010), “Social neuroscience: mirror neurons recorded in humans”, *Current Biology*, 20, 8, pp. R353-354.

- Klemen J., Chambers C. D. (2012), “Current perspectives and methods in studying neural mechanisms of multisensory interactions”, *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 36, 1, pp. 111-133.
- 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, 5582, pp. 846-848.
- Koppen C., Spence C. (2007), “Seeing the light: exploring the Colavita visual dominance effect”, *Experimental Brain Research*, 180, 4, pp. 737-754.
- Lakoff G., Johnson M. (1980), *Metaphors we live by*, University of Chicago Press, Chicago-London.
- Legrain V., Iannetti G. D., Plaghki L., Mouraux A. (2011), “The pain matrix reloaded: a salience detection system for the body”, *Progress in Neurobiology*, 93, 1, pp. 111-124.
- Levinson S. C. (1983), *Pragmatics*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Liang M., Mouraux A., Hu L., Iannetti G. D. (2013a), “Primary sensory cortices contain distinguishable spatial patterns of activity for each sense”, *Nat Commun*, 4, pp. 1979.
- Liang M., Mouraux A., Iannetti G. D. (2013b), “Bypassing primary sensory cortices--a direct thalamocortical pathway for transmitting salient sensory information”, *Cerebral Cortex*, 23, 1, pp. 1-11.
- Lovelace C. T., Stein B. E., Wallace M. T. (2003), “An irrelevant light enhances auditory detection in humans: a psychophysical analysis of multisensory

- integration in stimulus detection”, *Brain Research. Cognitive Brain Research*, 17, 2, pp. 447-453.
- Macaluso E., Driver J. (2005), “Multisensory spatial interactions: a window onto functional integration in the human brain”, *Trends in Neurosciences*, 28, 5, pp. 264-271.
- Magosso E., Cuppini C., Ursino M. (2012), “A neural network model of ventriloquism effect and aftereffect”, *PLoS One*, 7, 8, pp. e42503.
- Mancini F. (2013), “Subcortical and neocortical mechanisms of visual-somatosensory interplay”, *Journal of Neuroscience*, 33, 31, pp. 12555-12556.
- Masland R. H. (2013), “Neuroscience: Accurate maps of visual circuitry”, *Nature*, 500, 7461, pp. 154-155.
- Massopust L. C., Jr., Wolin L. R., Kadoya S. (1969), “Differential color responses in the visual cortex of the squirrel monkey”, *Vision Research*, 9, 4, pp. 465-473.
- Massopust L. C., Jr., Wolin L. R., Meder R., Frost V. (1967), “Changes in auditory frequency discrimination thresholds after temporal cortex ablations”, *Experimental Neurology*, 19, 2, pp. 245-255.
- Meyer K., Kaplan J. T., Essex R., Damasio H., Damasio A. (2011), “Seeing touch is correlated with content-specific activity in primary somatosensory cortex”, *Cerebral Cortex*, 21, 9, pp. 2113-2121.
- Meyer K., Kaplan J. T., Essex R., Webber C., Damasio H., Damasio A. (2010), “Predicting visual stimuli on the basis of activity in auditory cortices”, *Nature Neuroscience*, 13, 6, pp. 667-668.

- Mouraux A., Diukova A., Lee M. C., Wise R. G., Iannetti G. D. (2011), “A multisensory investigation of the functional significance of the “pain matrix””, *Neuroimage*, 54, 3, pp. 2237-2249.
- Odgaard E. C., Arieh Y., Marks L. E. (2004), “Brighter noise: sensory enhancement of perceived loudness by concurrent visual stimulation”, *Cogn Affect Behav Neurosci*, 4, 2, pp. 127-132.
- Olcese U., Iurilli G., Medini P. (2013), “Cellular and Synaptic Architecture of Multisensory Integration in the Mouse Neocortex”, *Neuron*.
- Oruc I., Sinnott S., Bischof W. F., Soto-Faraco S., Lock K., Kingstone A. (2008), “The effect of attention on the illusory capture of motion in bimodal stimuli”, *Brain Research*, 1242, pp. 200-208.
- Paternoster A. (2002), *Introduzione alla filosofia della mente*, Laterza, Bari.
- Rauschecker J. P. (1995). “Compensatory plasticity and sensory substitution in the cerebral cortex”, *Trends in Neurosciences*, 18, 1, pp. 36-43.
- Rizzolatti G., Arbib M. A. (1998), “Language within our grasp”, *Trends in Neurosciences*, 21, 5, pp. 188-194.
- Rizzolatti G., Fadiga L., Gallese V., Fogassi L. (1996), “Premotor cortex and the recognition of motor actions”, *Brain Research. Cognitive Brain Research*, 3, 2, pp. 131-141.
- Rizzolatti G., Sinigaglia C. (2006), *So quel che fai. Il cervello che agisce e i neuroni specchio*, Cortina, Milano.

- Ronga I. (in press), “Taste Synaesthesias: Linguistic Features and Neurophysiological Bases” in E. Gola & F. Ervas (a cura di), *Metaphor and Communication*, Benjamins Publishing, Amsterdam.
- Ronga I., Bazzanella C., Rossi F., Iannetti G. D. (2012a), “Linguistic synaesthesia, perceptual synaesthesia and the interaction between multiple sensory modalities”, *Pragmatics & Cognition*, 20, 1.
- Ronga I., Rossi F., Bazzanella C. (2012), “Crucialità del contesto negli esperimenti neurofisiologici”, *AISC*, Roma.
- Ronga I., Valentini E., Mouraux A., Iannetti G. D. (2013), “Novelty is not enough: laser-evoked potentials are determined by stimulus saliency, not absolute novelty”, *Journal of Neurophysiology*, 109, 3, pp. 692-701.
- Rowland B. A., Quessy S., Stanford T. R., Stein B. E. (2007), “Multisensory integration shortens physiological response latencies”, *Journal of Neuroscience*, 27, 22, pp. 5879-5884.
- Sadato N., Pascual-Leone A., Grafman J., Ibanez V., Deiber M. P., Dold G., Hallett M. (1996), “Activation of the primary visual cortex by Braille reading in blind subjects”, *Nature*, 380, 6574, pp. 526-528.
- Schurmann M., Caetano G., Jousmaki V., Hari R. (2004), “Hands help hearing: facilitatory audiotactile interaction at low sound-intensity levels”, *Journal of the Acoustical Society of America*, 115, 2, pp. 830-832.
- Seeley W. W., Menon V., Schatzberg A. F., Keller J., Glover G. H., Kenna H., Reiss A. L., Greicius M. D. (2007), “Dissociable intrinsic connectivity networks for

- salience processing and executive control”, *Journal of Neuroscience*, 27, 9, pp. 2349-2356.
- Shams L., Wozny D. R., Kim R., Seitz A. (2011), “Influences of multisensory experience on subsequent unisensory processing”, *Front Psychol*, 2, pp. 264.
- Shimojo S., Shams L. (2001). “Sensory modalities are not separate modalities: plasticity and interactions”, *Current Opinion in Neurobiology*, 11, 4, pp. 505-509.
- Sinclair J. (1991), *Corpus, concordance, collocation*, Oxford University Press, Oxford.
- Sinnett S., Spence C., Soto-Faraco S. (2007), “Visual dominance and attention: the Colavita effect revisited”, *Perception and Psychophysics*, 69, 5, pp. 673-686.
- Soto-Faraco S., Deco G. (2009), “Multisensory contributions to the perception of vibrotactile events”, *Behavioural Brain Research*, 196, 2, pp. 145-154.
- Spence C. (2009), “Explaining the Colavita visual dominance effect”, *Progress in Brain Research*, 176, pp. 245-258.
- Stein B. E., Stanford T. R. (2008), “Multisensory integration: current issues from the perspective of the single neuron”, *Nat Rev Neurosci*, 9, 4, pp. 255-266.
- Stevens A. A., Snodgrass M., Schwartz D., Weaver K. (2007), “Preparatory activity in occipital cortex in early blind humans predicts auditory perceptual performance”, *Journal of Neuroscience*, 27, 40, pp. 10734-10741.
- Thurlow W. R., Rosenthal T. M. (1976), “Further study of existence regions for the “ventriloquism effect””, *Journal of the American Audiology Society*, 1, 6, pp. 280-286.

- 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, 1, pp. 155-165.
- Vattimo G. (1967), *Poesia e ontologia*, Mursia, Milano.
- Vigneswaran G., Philipp R., Lemon R. N., Kraskov A. (2013), “M1 corticospinal mirror neurons and their role in movement suppression during action observation”, *Current Biology*, 23, 3, pp. 236-243.
- Walsh V., Ellison A., Battelli L., Cowey A. (1998), “Task-specific impairments and enhancements induced by magnetic stimulation of human visual area V5”, *Proc Biol Sci*, 265, 1395, pp. 537-543.
- Zihl J., von Cramon D., Mai N. (1983), “Selective disturbance of movement vision after bilateral brain damage”, *Brain*, 106 (Pt 2), pp. 313-340.
- Zihl J., von Cramon D., Mai N., Schmid C. (1991), “Disturbance of movement vision after bilateral posterior brain damage. Further evidence and follow up observations”, *Brain*, 114 (Pt 5), pp. 2235-2252.

APhEx.it è un periodico elettronico, registrazione n° ISSN 2036-9972. Il copyright degli articoli è libero. Chiunque può riprodurli. Unica condizione: mettere in evidenza che il testo riprodotto è tratto da www.aphex.it

Condizioni per riprodurre i materiali --> Tutti i materiali, i dati e le informazioni pubblicati all'interno di questo sito web sono "no copyright", nel senso che possono essere riprodotti, modificati, distribuiti, trasmessi, ripubblicati o in altro modo utilizzati, in tutto o in parte, senza il preventivo consenso di APhEx.it, a condizione che tali utilizzazioni avvengano per finalità di uso personale, studio, ricerca o comunque non commerciali e che sia citata la fonte attraverso la seguente dicitura, impressa in caratteri ben visibili: "www.aphex.it". Ove i materiali, dati o informazioni siano utilizzati in forma digitale, la citazione della fonte dovrà essere effettuata in modo da consentire un collegamento ipertestuale (link) alla home page www.aphex.it o alla pagina dalla quale i materiali, dati o informazioni sono tratti. In ogni caso, dell'avvenuta riproduzione, in forma analogica o digitale, dei materiali tratti da www.aphex.it dovrà essere data tempestiva comunicazione al seguente indirizzo (redazione@aphex.it), allegando, laddove possibile, copia elettronica dell'articolo in cui i materiali sono stati riprodotti.

In caso di citazione su materiale cartaceo è possibile citare il materiale pubblicato su APhEx.it come una rivista cartacea, indicando il numero in cui è stato pubblicato l'articolo e l'anno di pubblicazione riportato anche nell'intestazione del pdf. Esempio: Autore, *Titolo*, <<www.aphex.it>>, 1 (2010).
