

**IL SISTEMA MOTORIO:
L'ESECUZIONE, L'OSSERVAZIONE E
L'IMMAGINAZIONE DEL MOVIMENTO**

Fausto Caruana

Dip. di Neuroscienze,

Sezione di Fisiologia

Università di Parma

Ancona, 23. V.2009

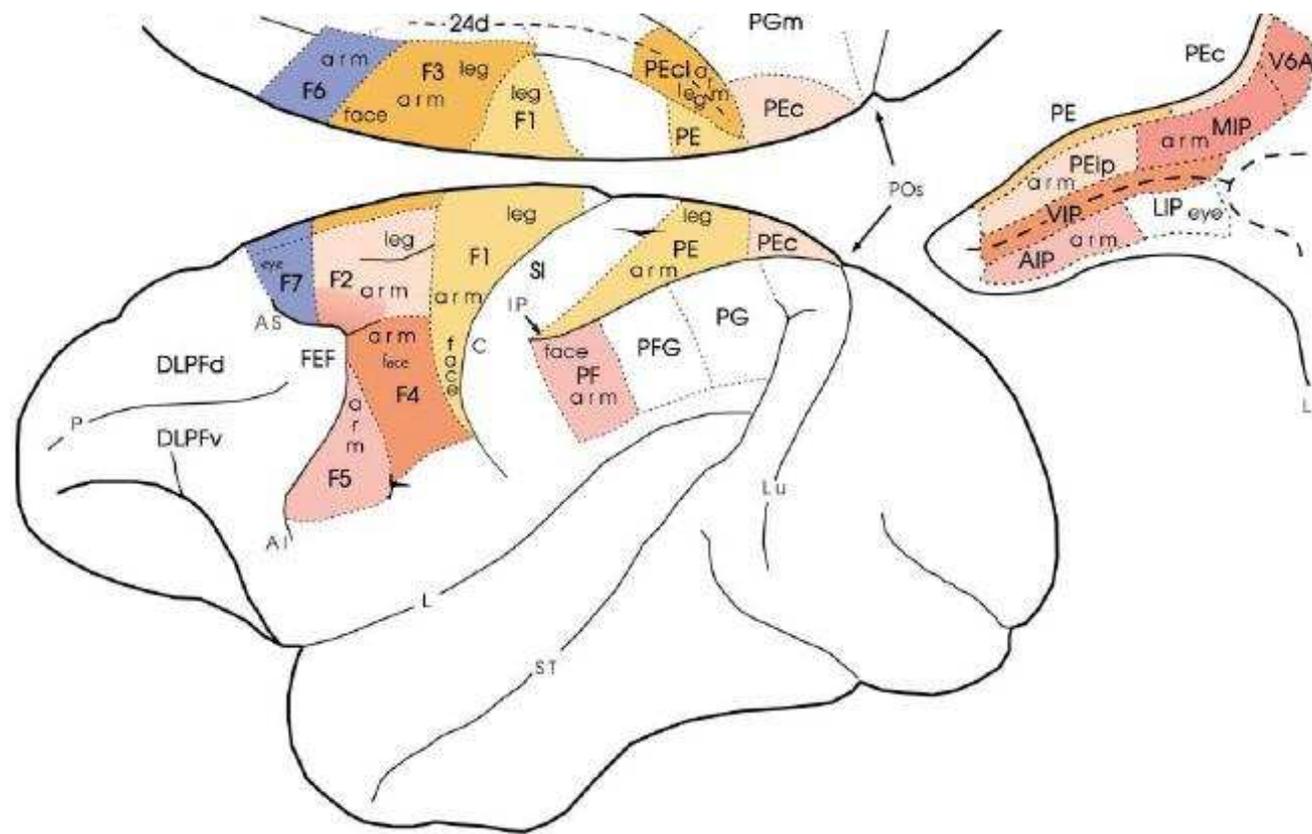
OUTLINE:

- Il sistema motorio e lo *scopo* delle azioni
- Le attivazioni “covert” del sistema motorio:
 - osservare le azioni
 - immaginare le azioni

“... in principio era l’azione”

Il Sistema Motorio e lo Scopo delle Azioni

Il Mosaico delle Aree Motorie



Il Sistema Motorio è costituito da una molteplicità di aree

La distinzione tra aree è ricavata da studi anatomici e funzionali

Ogni area Premotoria è implicata in una rete funzionale parallela con aree della Corteccia Parietale

(Matelli et al., '85, '91; Rizzolatti et al., '98)

L'idea classica è che il Sistema Motorio ha un controllo esecutivo;

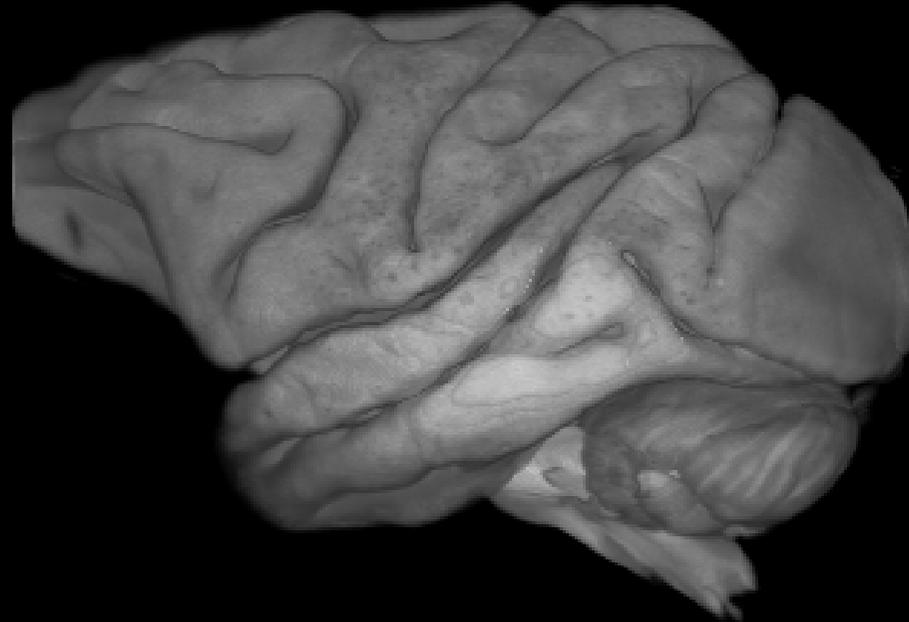
Secondo tale idea, in particolare, il Sistema Motorio codifica e controlla *movimenti*

Suddivisione funzionale classica

PERCEZIONE

COGNIZIONE

AZIONE



AREE SENSORIALI

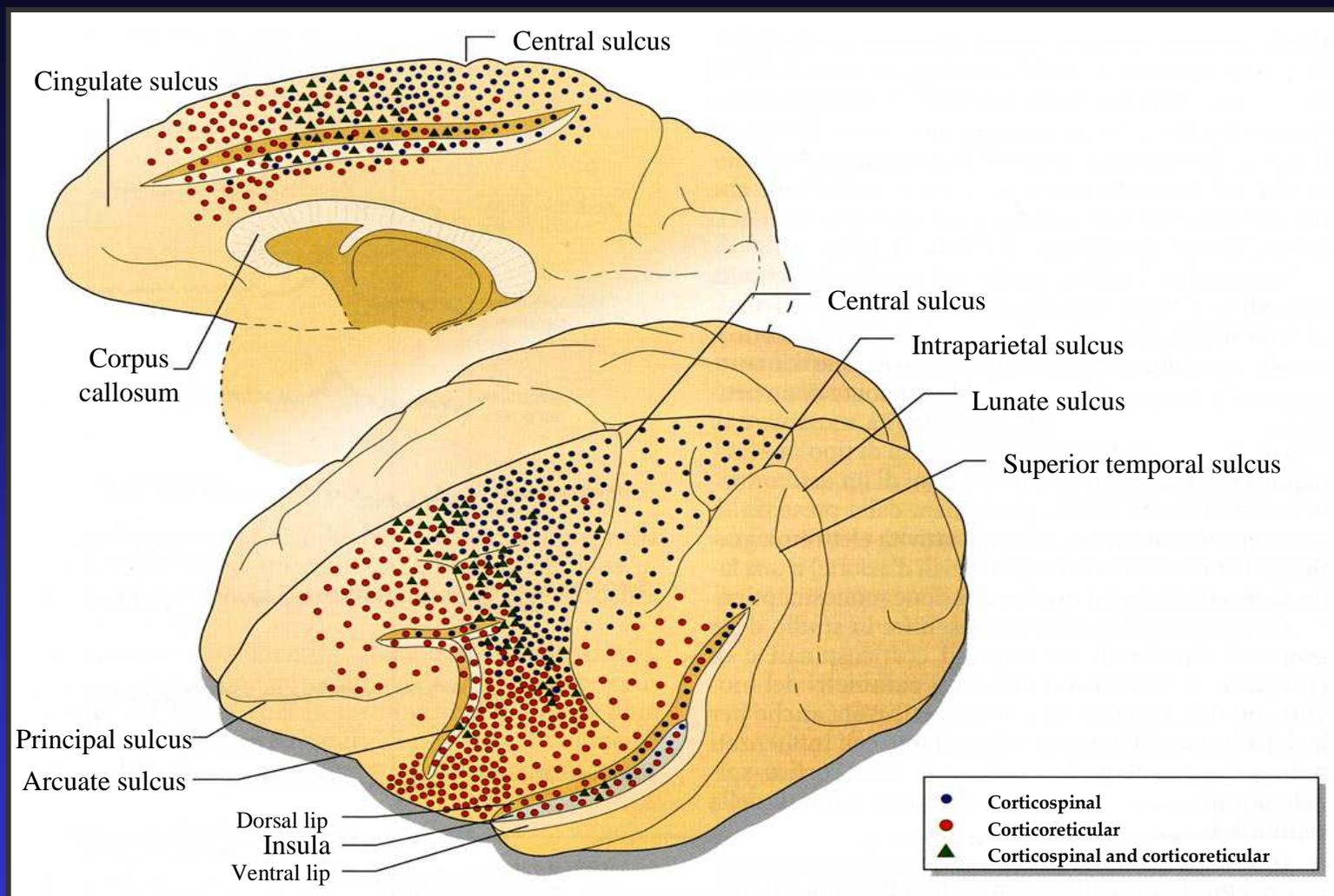
AREE ASSOCIATIVE

AREE MOTORIE

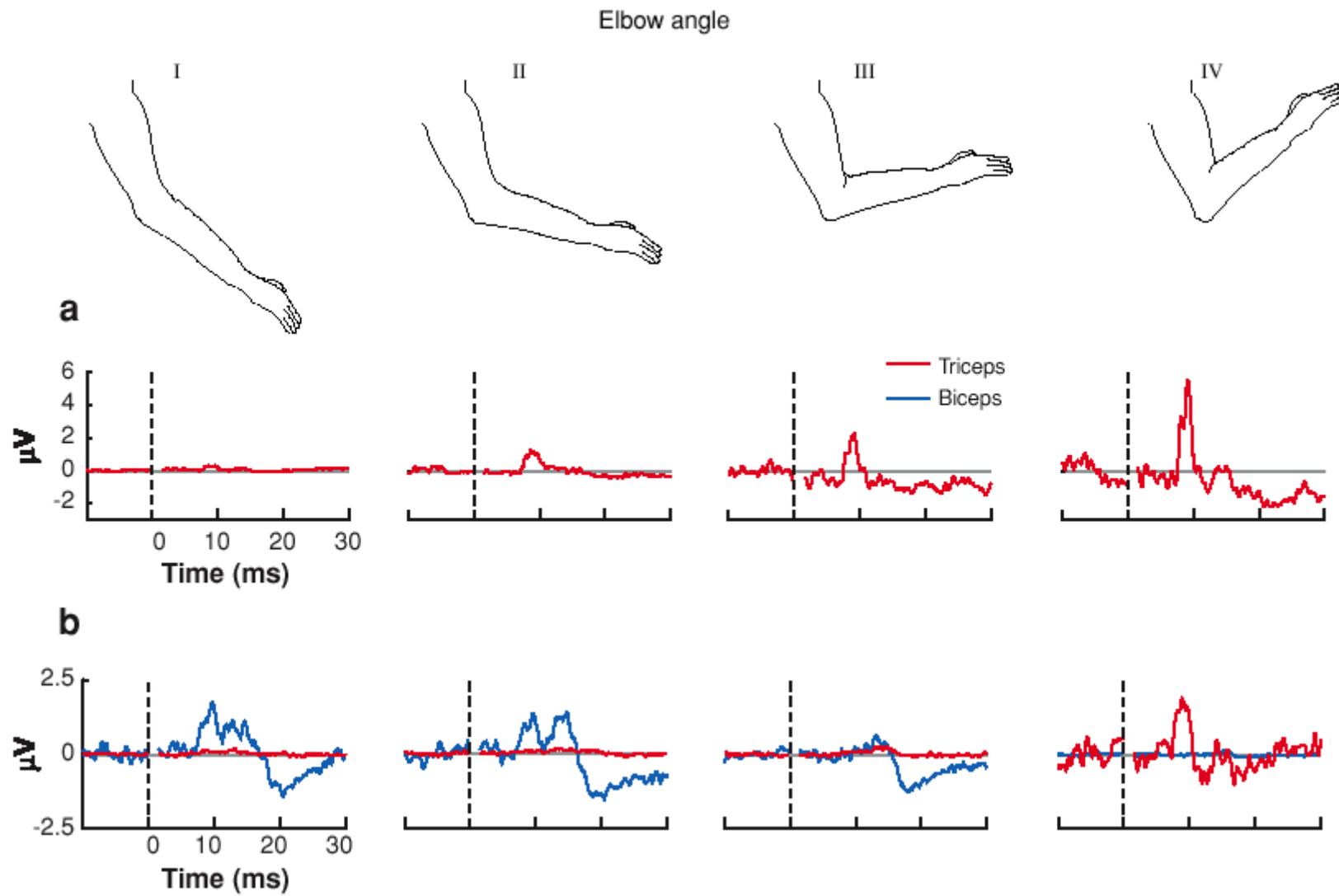
La suddivisione funzionale classica del cervello e' stata fortemente influenzata dall'idea ingenua di ciò che pensiamo faccia "la mente"

- [1] attività percettiva e immagazzinamento di informazioni --- *Aree sensoriali***
- [2] elaborazione cognitiva --- *Aree associative***
- [3] uscita motoria --- *Aree motorie***

Proiezioni Corticali Discendenti

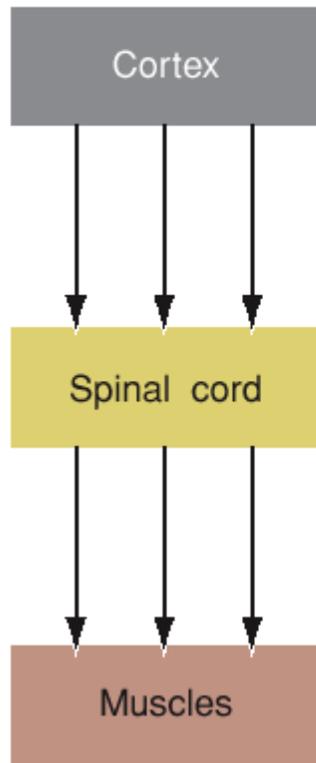


Quando l'**ICMS** viene combinata con la registrazione EMG, persino la più piccola corrente capace di provocare una risposta apprezzabile dà luogo all'attivazione di diversi muscoli (e alla simultanea inibizione di altri) suggerendo che ciò che sono rappresentati nella mappa sono movimenti organizzati, e non invece attivazioni di singoli muscoli



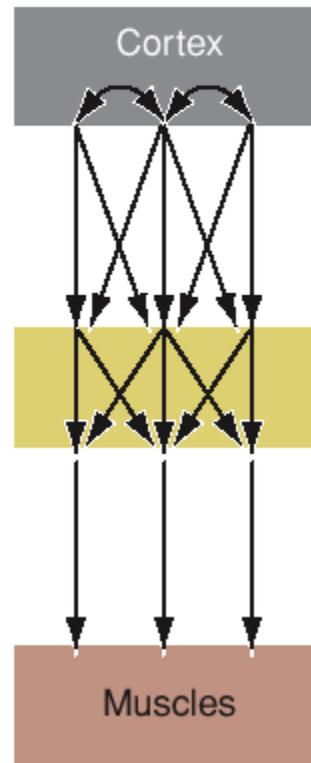
a

**One-to-one
mapping**



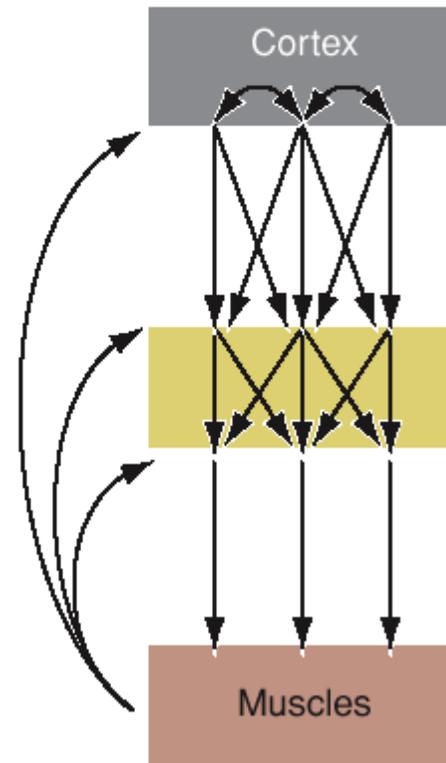
b

**Many-to-many
mapping**



c

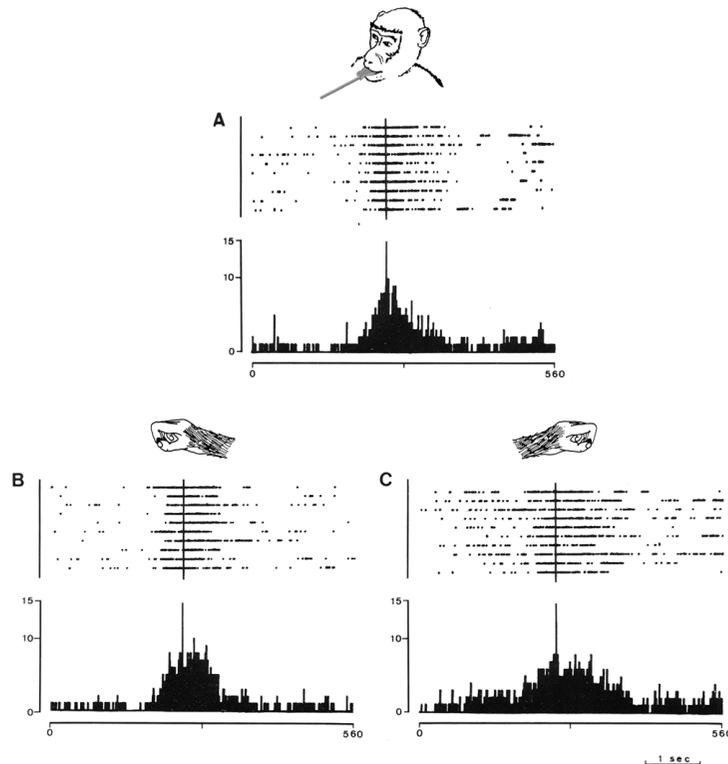
**Feedback
re-mapping**



QUALE RUOLO PER LA CORTECCIA MOTORIA?

Rizzolatti et al., 1988: Nella corteccia premotoria ci sono neuroni che si attivano ogni volta che la scimmia afferra un oggetto, indipendentemente dal tipo di effectore usato: la mano destra, la mano sinistra, la bocca.

Hp: In F5 esistono neuroni che codificano lo *scopo dell'azione* – afferrare, tirare, strappare, etc. – e non il *movimento* necessario per raggiungerlo.



A Afferramento con la bocca

B Afferramento con la mano destra

C Afferramento con la mano sinistra

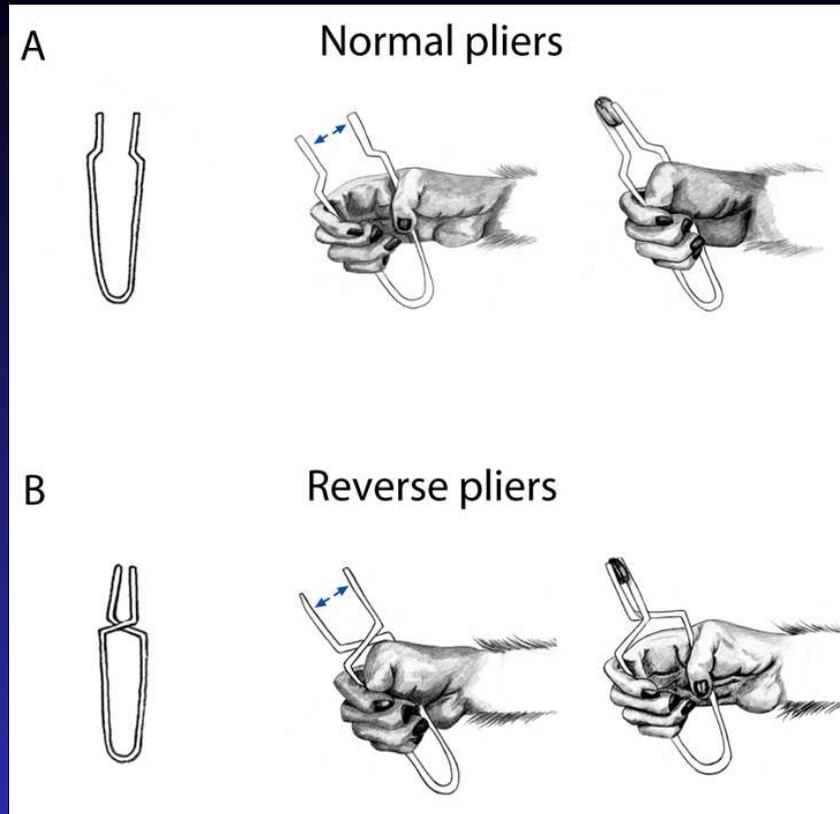
(Rizzolatti et al. 1988)

When pliers become fingers in the monkey motor system

M. A. Umiltà, L. Escola, I. Intskirveli*, F. Grammont†, M. Rochat, F. Caruana, A. Jezzini, V. Gallese, and G. Rizzolatti‡

Cosa succede se l'azione viene dissociata dal movimento richiesto per compierla?

Studio delle proprietà dei neuroni motori durante atti motori dotati dello stesso scopo finale (afferrare il cibo) ma ottenuti mediante *movimenti opposti* della mano.



- PINZE NORMALI: Congruenza tra i movimenti della mano e la fase dell'azione;
- PINZE INVERTITE: Apertura della pinza \Rightarrow chiusura della mano;
Chiusura della pinza \Rightarrow apertura della mano;

Neurone registrato in Premotoria Ventrale

Il picco di attività avviene durante la chiusura delle pinze

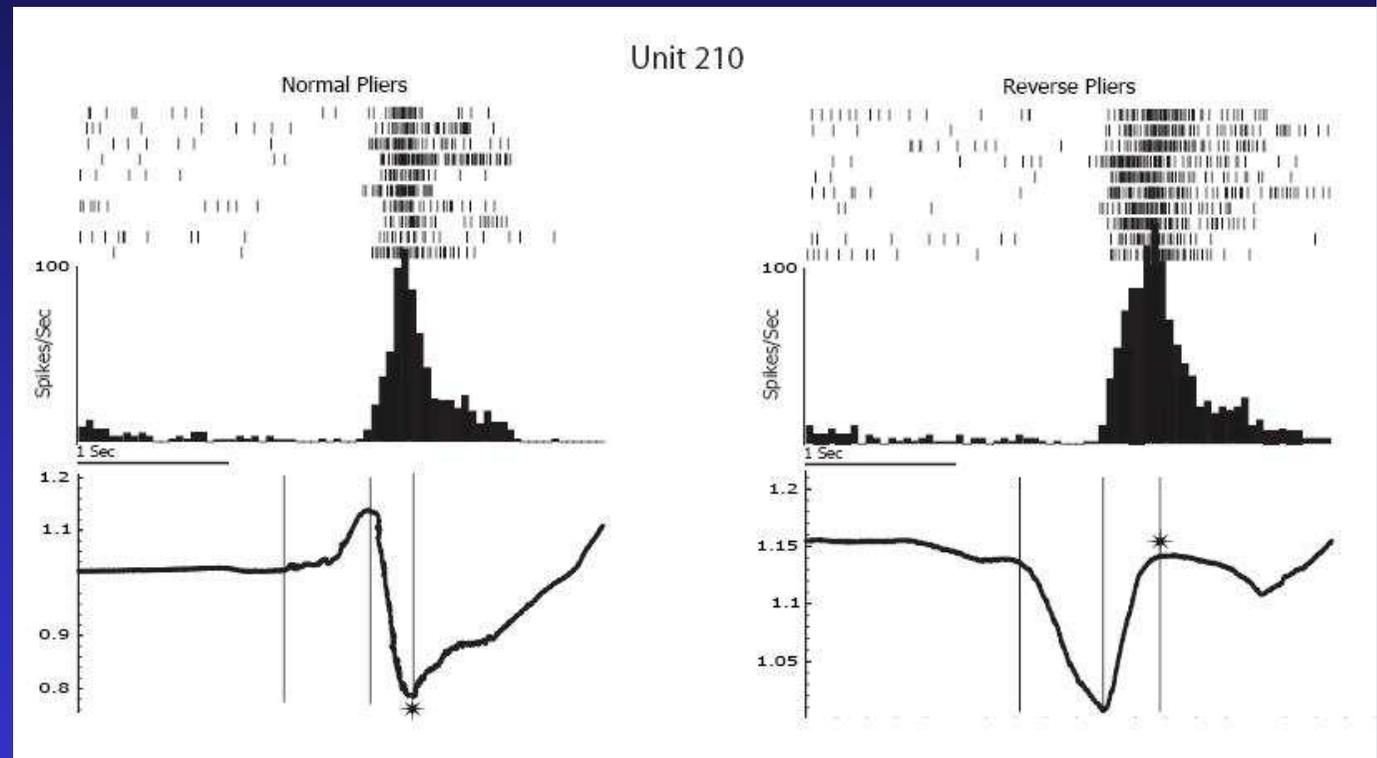
Raster dei
neuroni



Istogramma

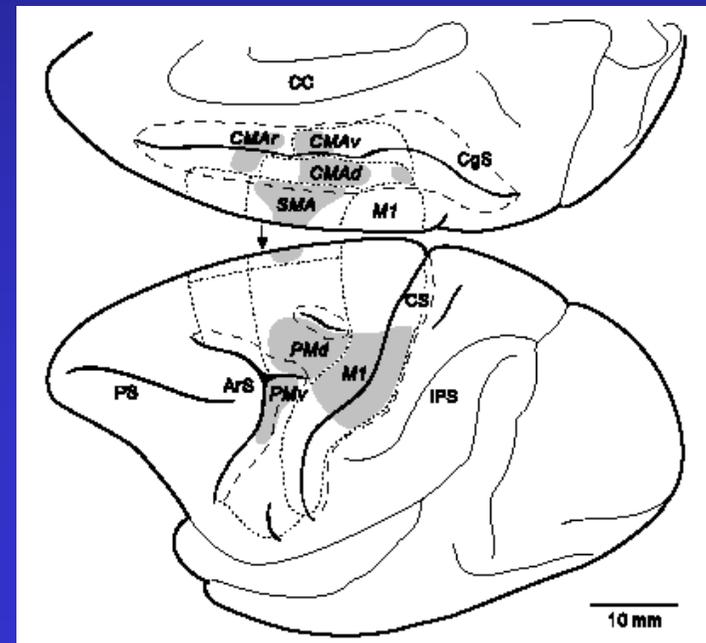


Potenziometro



MOTRICE PRIMARIA

- L'Area Motrice Primaria è considerata più prossima all'uscita motoria
- Area Motrice Primaria è una regione corticospinale
- Costituisce 1/3 del tratto CorticoSpinale



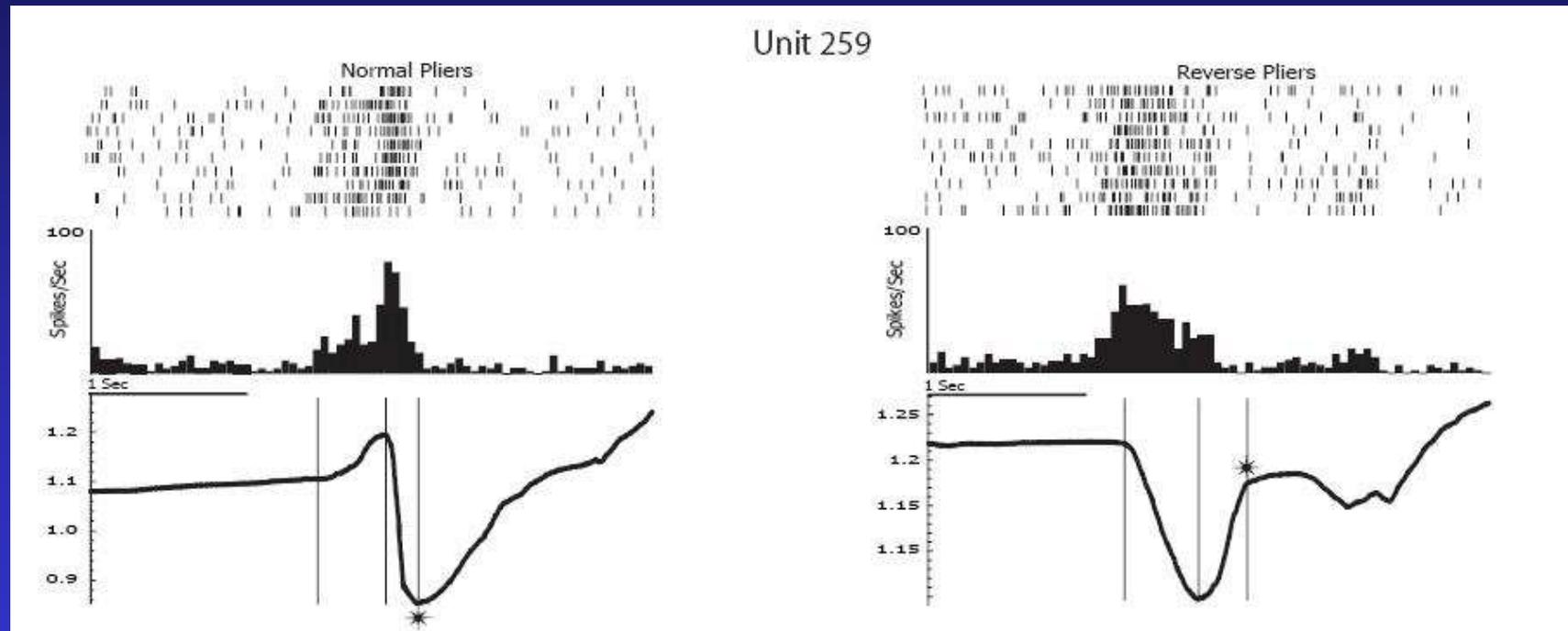
Registrazione nell'Area Motrice Primaria

Due distinte categorie di neuroni sono state trovate nell'area Motrice Primaria :

- 1° - Neuroni che scaricano in relazione allo scopo dell'azione dell'atto motorio
- 2° - Neuroni che scaricano in relazione ai movimenti della mano

Neurone registrato in Motoria Primaria

Il picco di attività avviene durante la chiusura della mano indipendentemente dalla fase dell'azione



... LE PINZE DIVENTANO DITA ...

- Se dissociamo lo scopo dell'azione dal movimento richiesto per compierla, la corteccia Premotoria e parte della Motoria Primaria codificano l'azione dell'effettore finale, piuttosto che il movimento della mano biologica.
- Il sistema motorio e' organizzato intorno allo scopo, al proposito dei nostri movimenti, e non intorno ai movimenti stessi

Organizzazione “intenzionale” del repertorio motorio

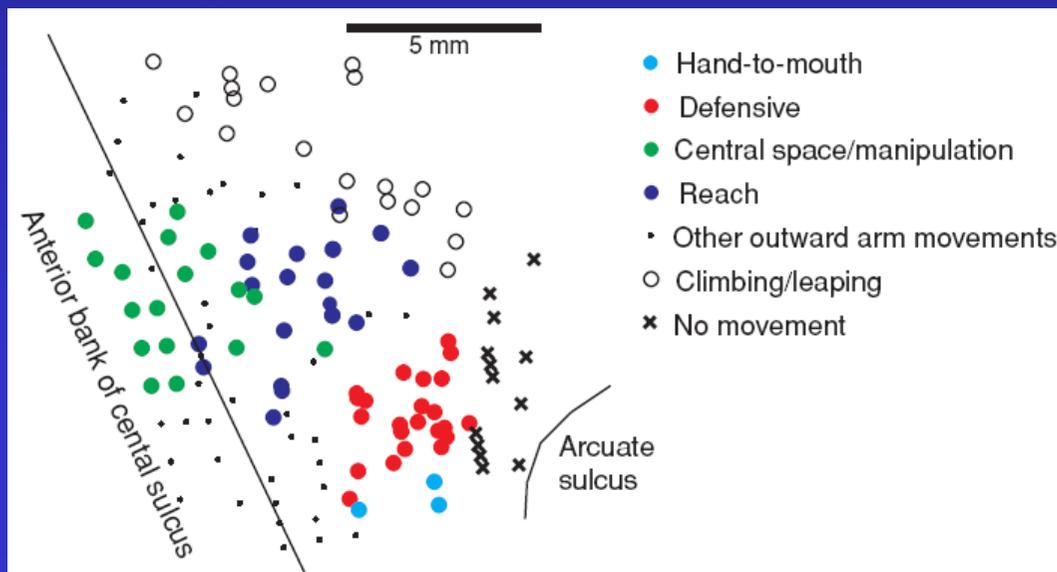
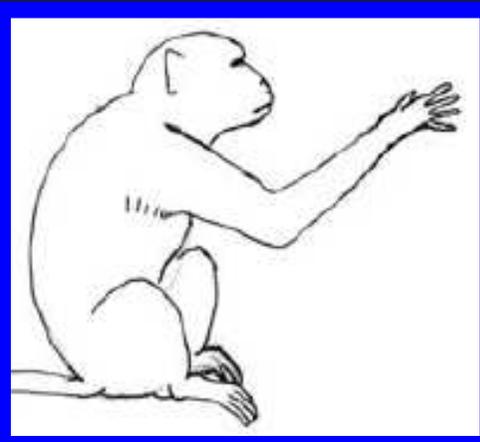
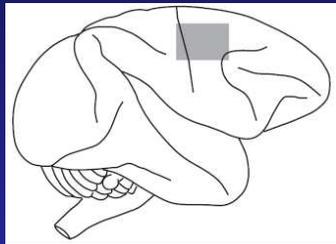
Stimolazione Intracorticale

Tempi di
Stimolazione



Scala Temporale
Comportamentale

Organizzazione “intenzionale” del repertorio motorio

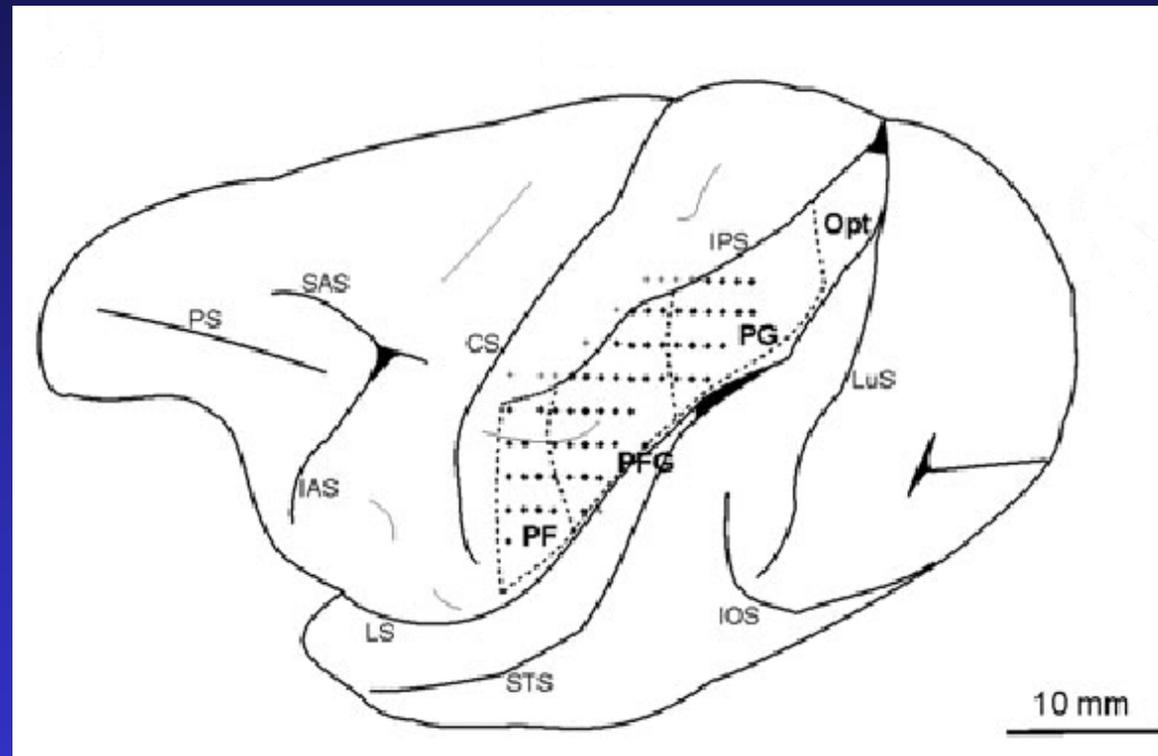


Il Sistema Motorio ha un'organizzazione centrata sullo *scopo dell'atto motorio*, e non invece sulla mappa muscolare

Una variabile importante per il sistema motorio è il "*che cosa fare*" più che il "*come fare*"

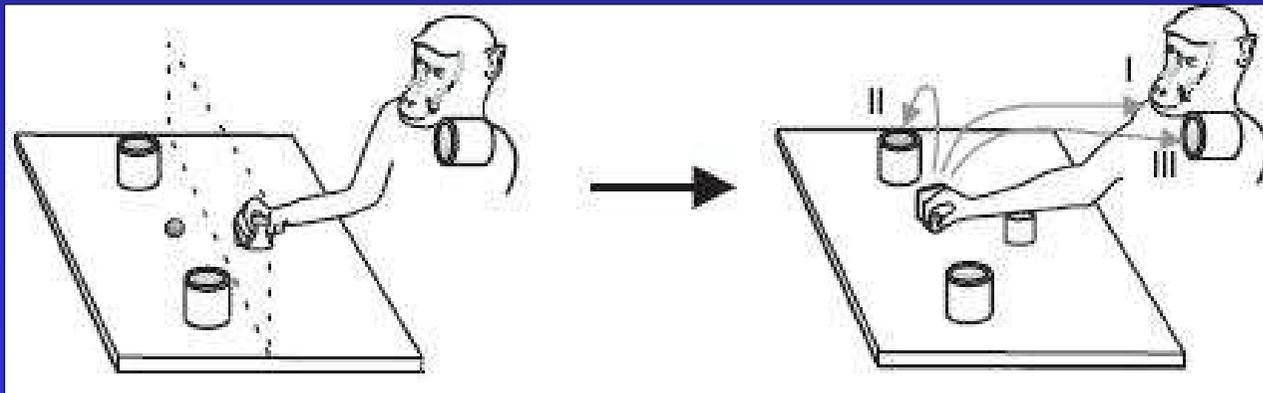
**IL “*MODELLO DELLE CATENE*”
E IL CASO DELLE AZIONI COMPLESSE**

Modello delle Catene & Lobulo Parietale Inferiore

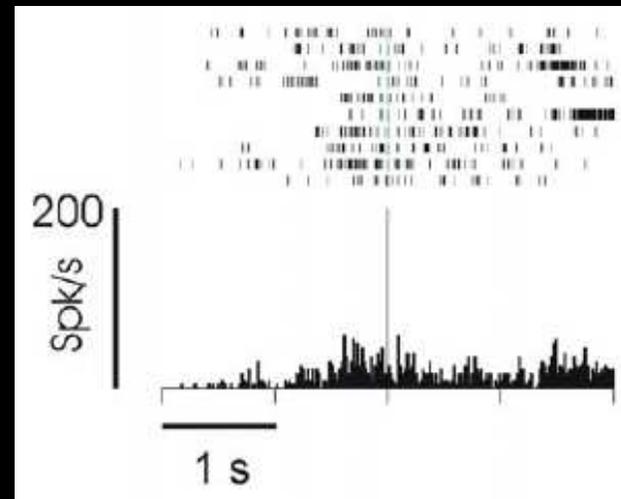
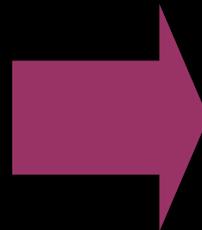
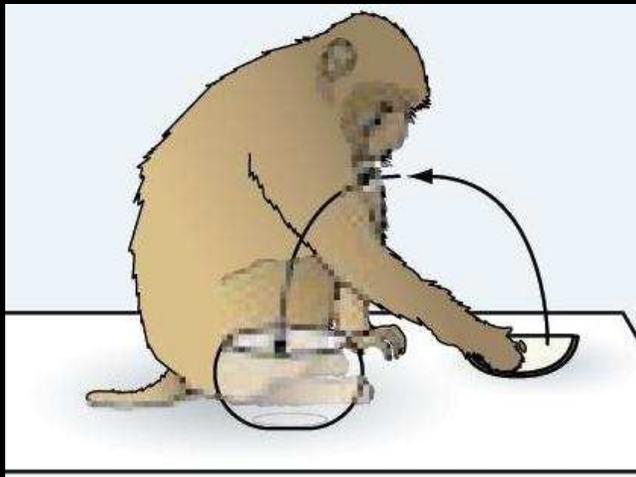
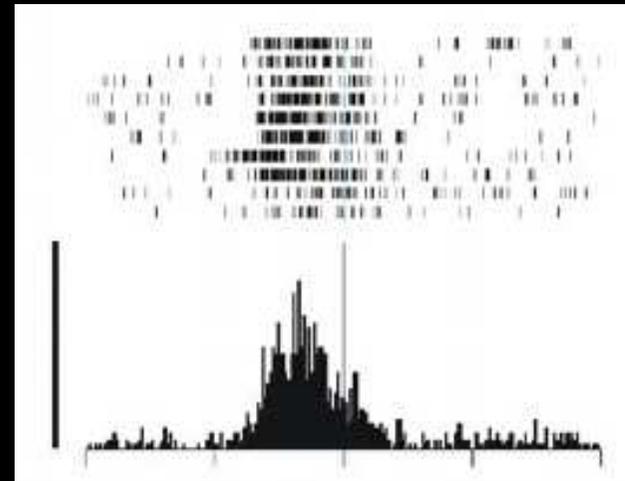
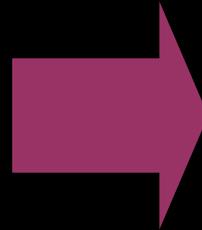
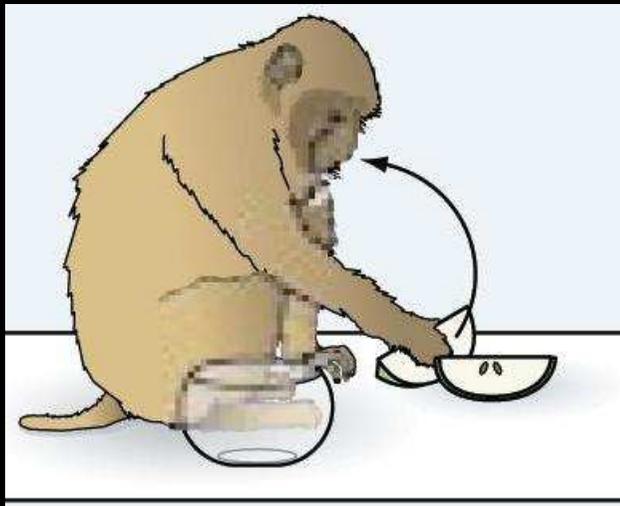


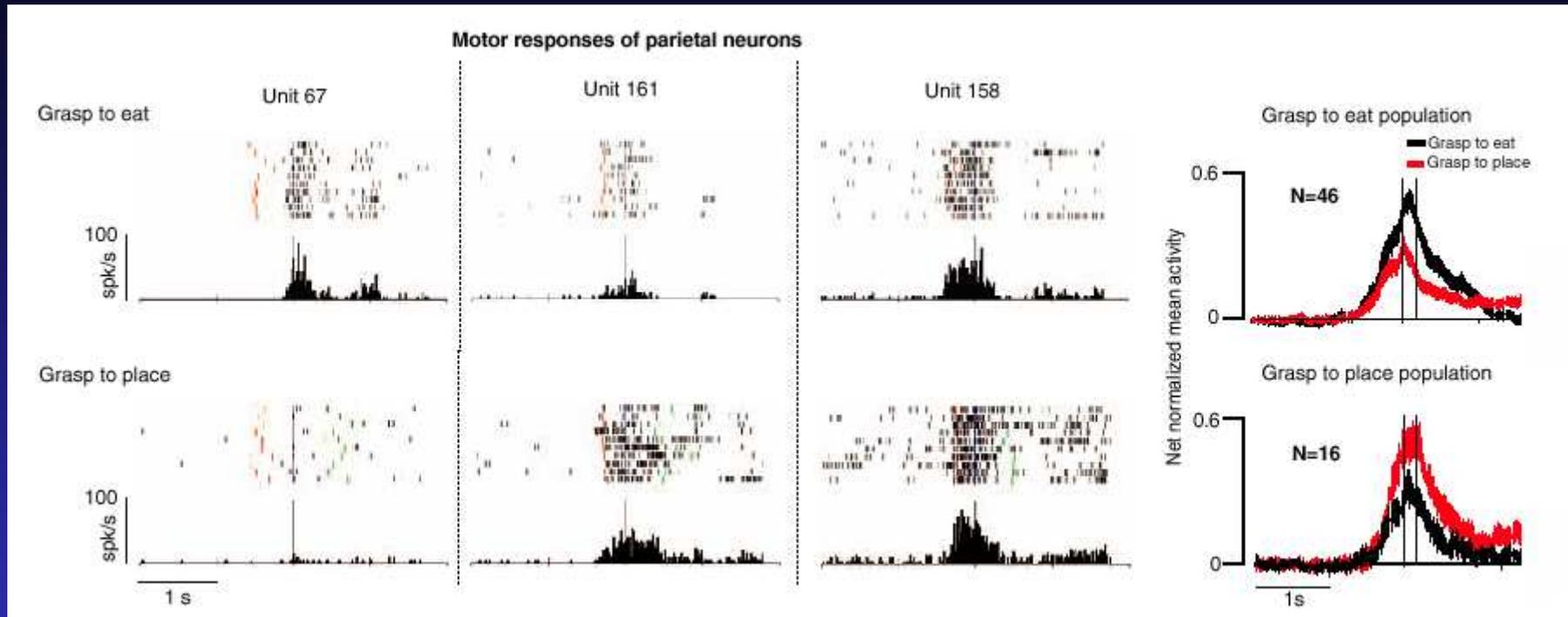
Il *Modello delle Catene* è stato scoperto nel Lobulo Parietale Inferiore e, successivamente, nella Corteccia Premotoria Ventrale

- 2005: i neuroni motori del Lobo Parietale Inferiore che codificano un atto motorio specifico (afferrare un oggetto o cibo) mostrano differenti attivazioni a seconda dell'azione globale nella quale è incorporato quell'atto motorio
- Nell'esperimento, l'afferramento è incorporato in due azioni:
 - (1) afferrare per portare alla bocca
 - (2) afferrare per portare al contenitore



(Fogassi et al. 2005)





Neurone
*prendere per
mangiare*

Neurone
*prendere per
piazzare*

Neurone
prendere

Analisi di
Popolazione

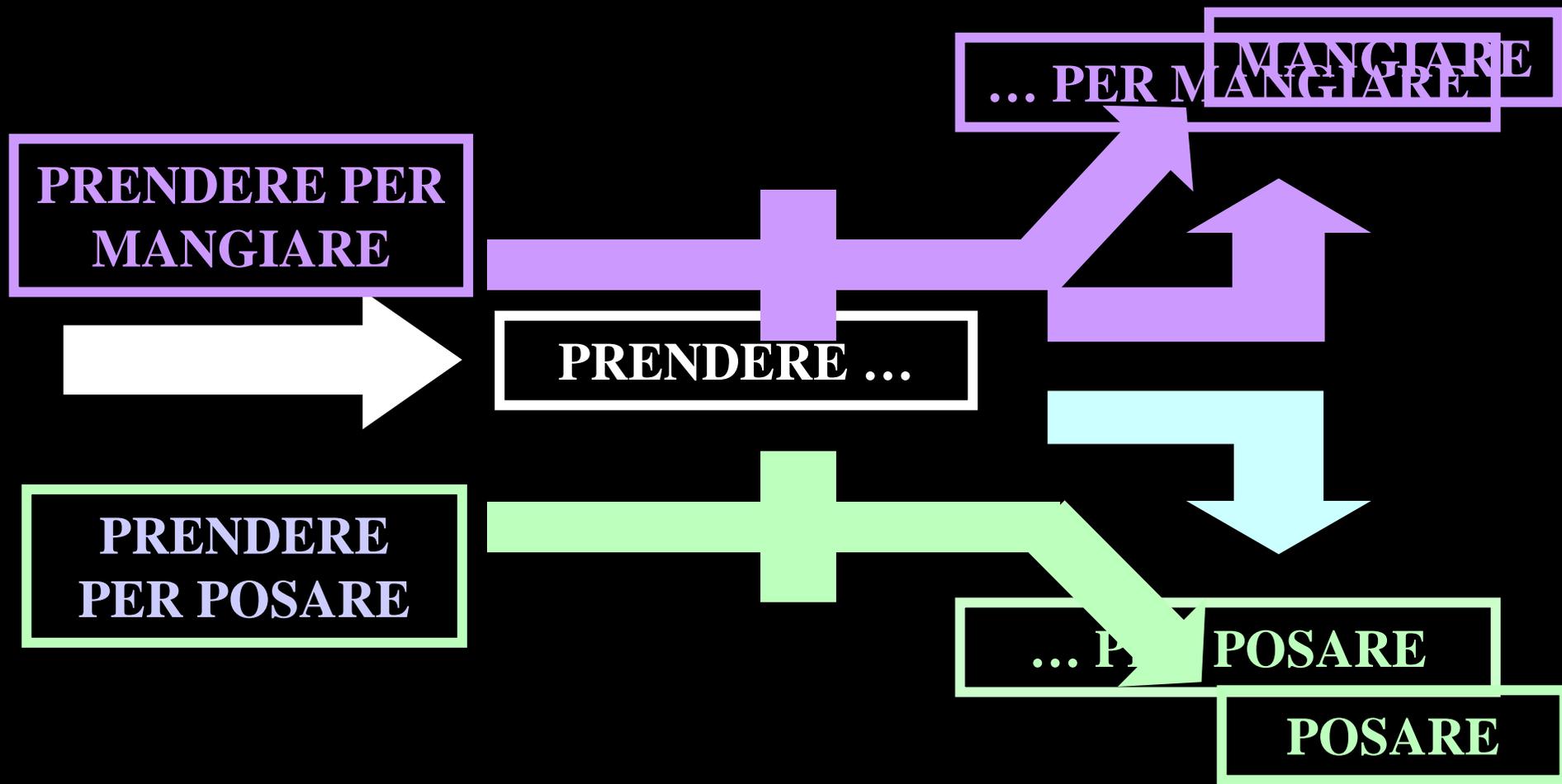
**165 neuroni studiati: risposta durante l'afferramento
2/3 dipendenti dall'azione seguente
1/3 indipendente dall'azione seguente**

Dati recenti hanno dimostrato con lo stesso compito sperimentale che la stessa organizzazione presente nel *lobulo parietale inferiore* esiste nella *corteccia premotoria ventrale*

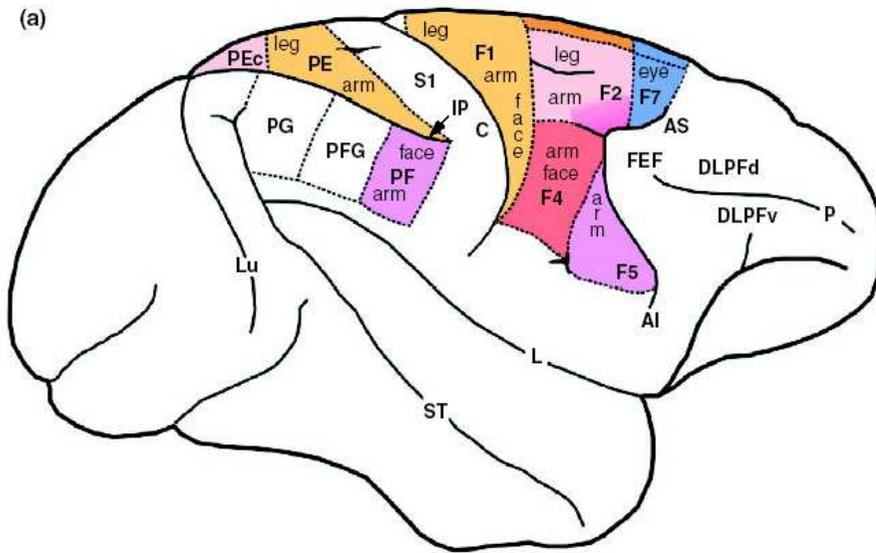
Il Modello delle Catene

Gli atti motori *non* sono correlati l'uno con l'altro *indipendentemente* dallo scopo finale dell'azione, ma sembrano appartenere ad una *catena intenzionale precostituita*, nella quale ogni atto motorio è facilitato dal precedente

MODELLO A CATENA PER SEQUENZE COMPLESSE

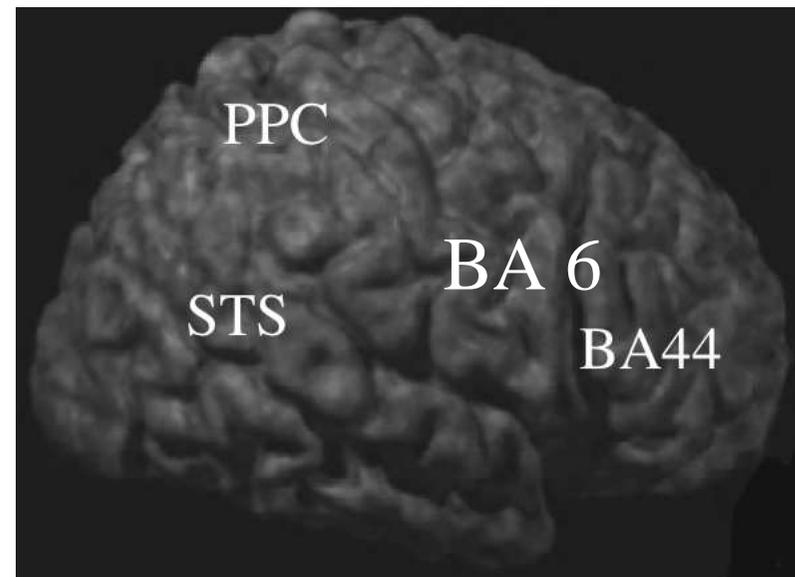


I NEURONI 'MIRROR'

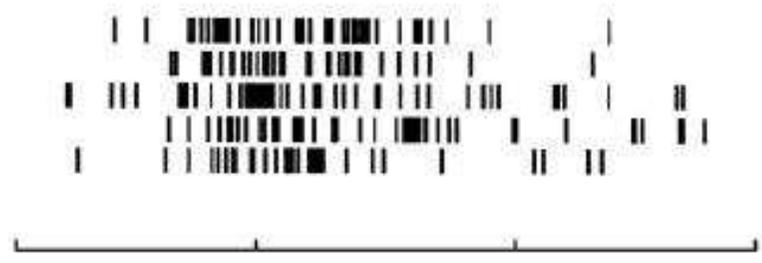
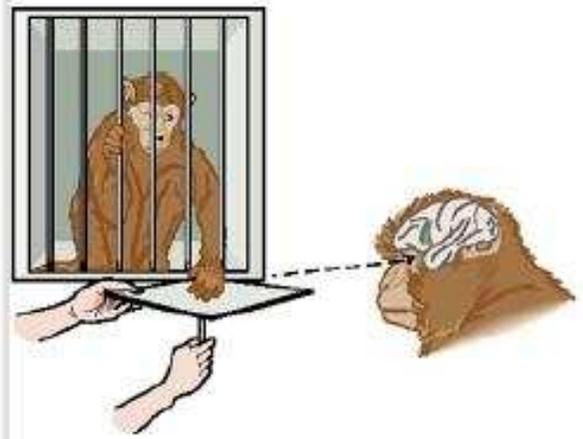


I Neuroni Mirror sono stati descritti sul modello animale

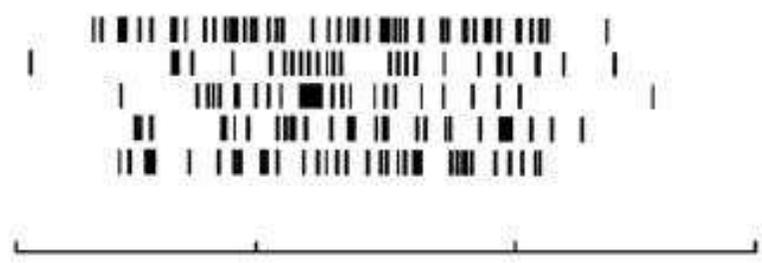
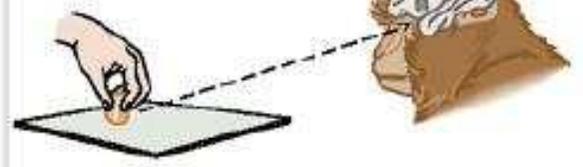
L'esistenza di Neuroni Mirror nell'uomo è inferita, ma un analogo sistema (Sistema Mirror) è descritto nell'uomo



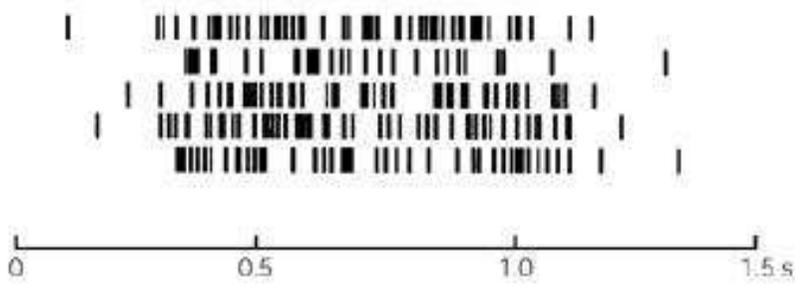
A



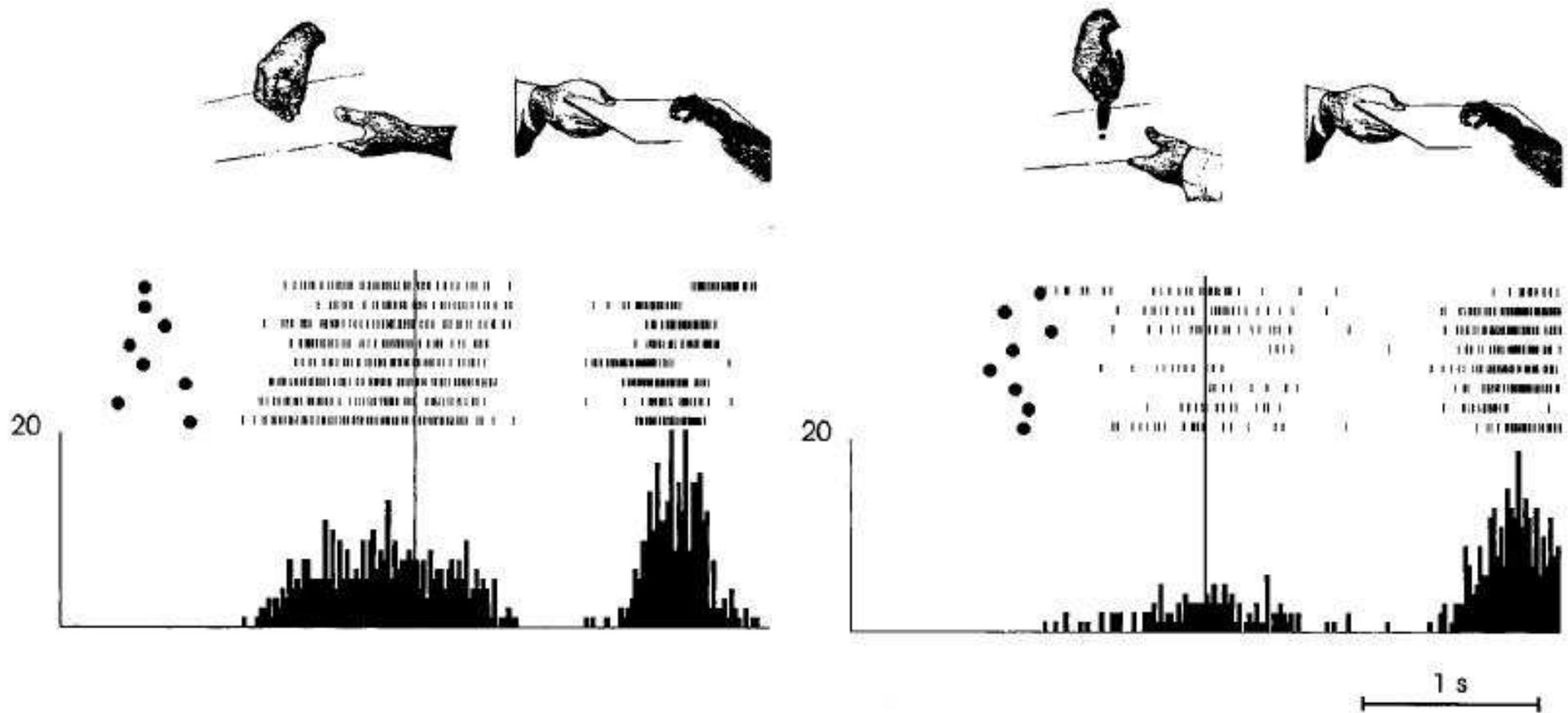
B



C

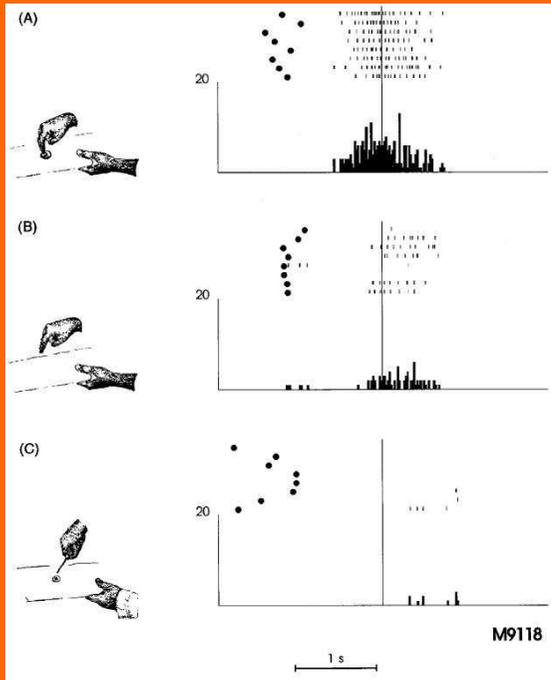


Neuroni Mirror in Premotoria Ventrale durante l'afferramento di cibo



(Gallese et al. 1996)

Neuroni Mirror per la Manipolazione



(A) Lo sperimentatore muove un pezzo di cibo

(B) Lo sperimentatore mima l'azione senza la presenza del cibo

(C) Lo sperimentatore muove un pezzo di cibo con uno strumento

Neuroni Mirror, Azioni Ingestive e Comunicative

(A) Lo sperimentatore/ la scimmia afferra il cibo



(B) Lo sperimentatore/ la scimmia succhia il liquido dalla siringa



(C) Lo sperimentatore/ la scimmia produce gesti comunicativi



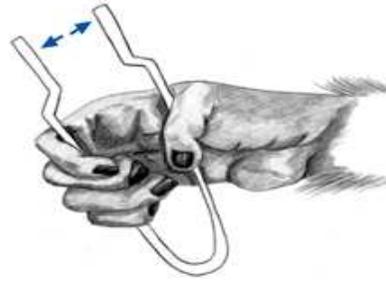
Che cosa viene mappato sul Sistema Mirror?

Movimenti?

Azioni?

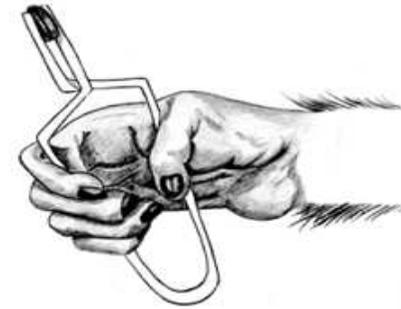
A

Normal pliers

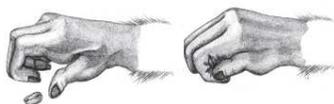
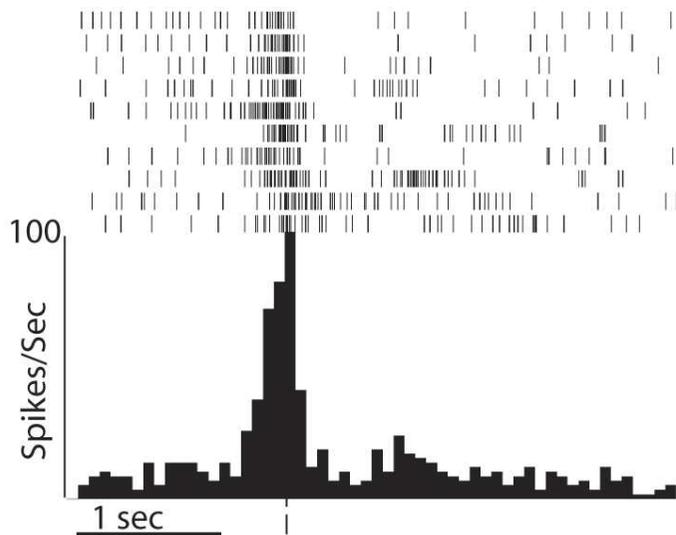


B

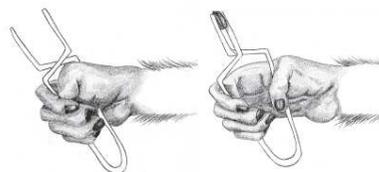
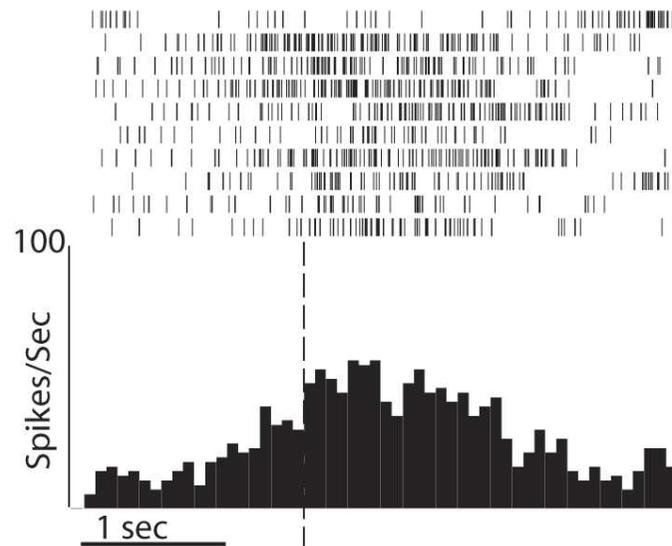
Reverse pliers



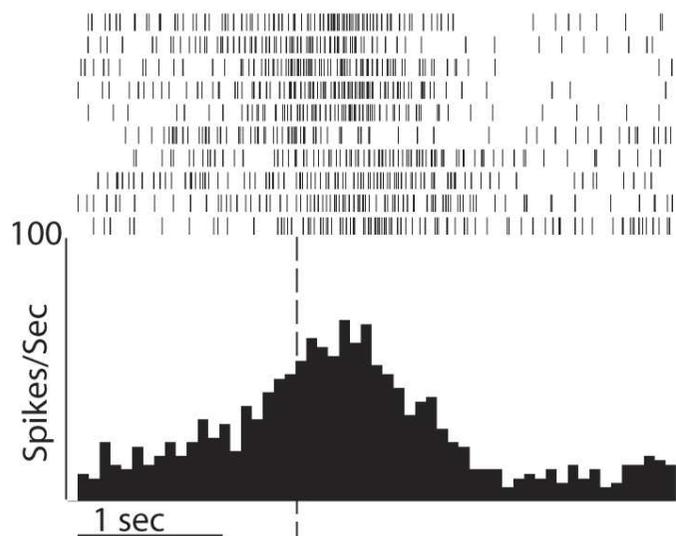
Hand execution



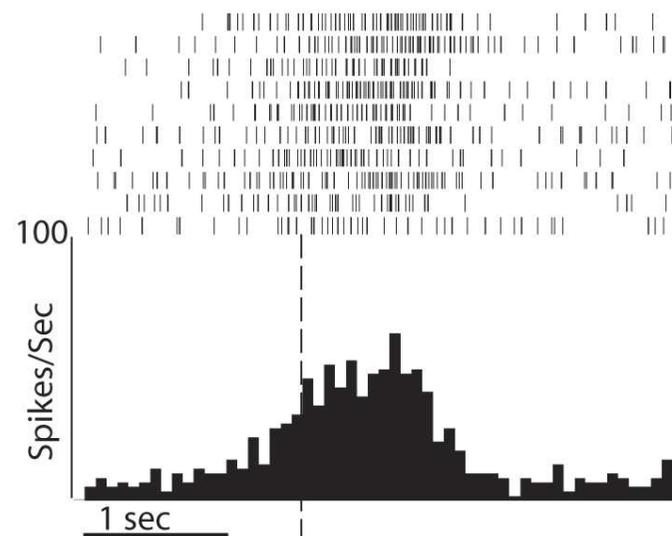
Reverse pliers execution



Hand observation



Reverse pliers observation



- I Neuroni Mirror sono modulati dall'osservazione della fase di chiusura dell'effettore e dal raggiungimento dello scopo finale...e non dall'osservazione del movimento biologico che compone l'azione
- Il Sistema Mirror della scimmia non mappa i movimenti corporei

Ruolo dell'Esperienza Motoria

'Tool-responding mirror neurons'

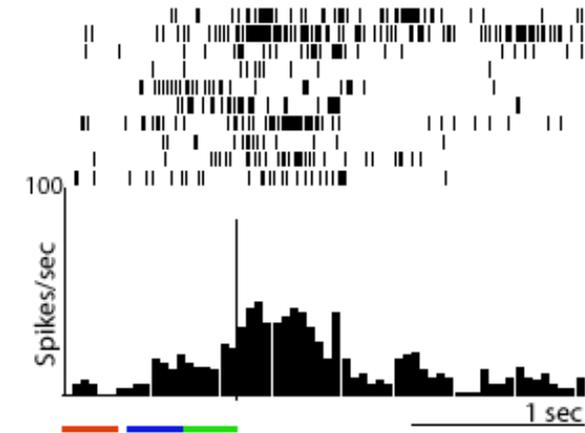
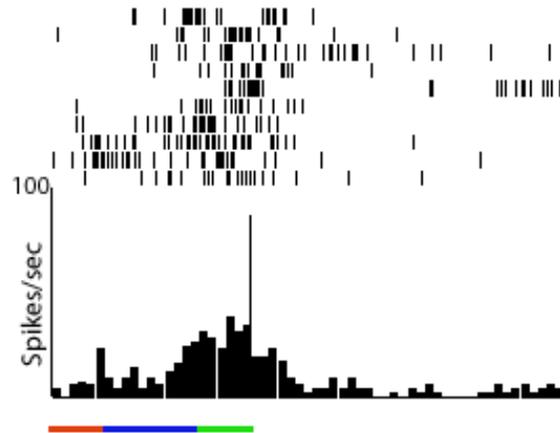
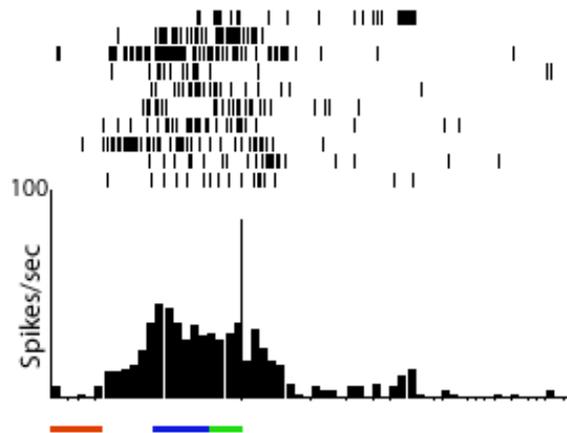
I neuroni mirror della premotoria ventrale sono stati testati durante l'osservazione di:

- Afferramento manuale;
- Afferramento con uno strumento che la scimmia sa utilizzare (pinze invertite);
- Afferramento con uno strumento che la scimmia non sa utilizzare (bastone con punta);

Hand observation

Reverse pliers observation

Stick observation



BASELINE

APERTURA EFFETTORE

PRESA DEL CIBO

- L'attivazione causata dall'azione di mano è anticipata
- L'attivazione causata dall'azione con la pinza (strumento appreso) è allineata con il raggiungimento dell'azione
- L'attivazione causata dall'osservazione della presa con bastone (strumento non appreso) è ritardata

La capacità di attivarsi e quindi di anticipare lo scopo dell'azione osservata è dipendente dal grado di familiarità del sistema motorio con l'azione stessa

Comprendiamo prima (e anticipiamo prima) le azioni che sappiamo eseguire

Esperienza Motoria nell'Uomo

Abbiamo visto dal modello animale che i neuroni mirror rispondono all'osservazione di azioni con tempistiche diverse a seconda del grado di familiarità motoria

Le abilità motorie umane apprese offrono una via preferenziale per testare la funzione del Sistema Mirror, poiché le persone differiscono reciprocamente nel repertorio di azioni conosciute

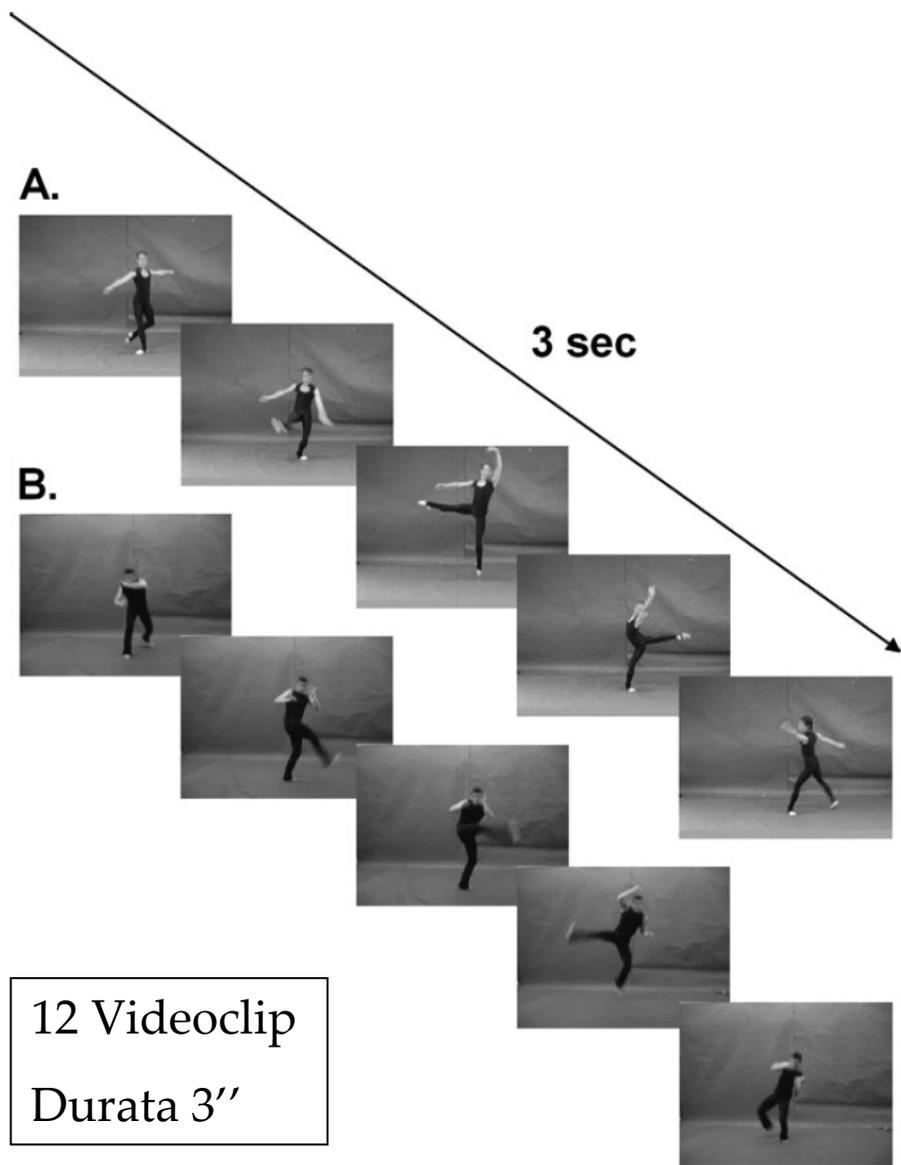
Cerebral Cortex August 2005;15:1243-1249

doi:10.1093/cercor/bhi007

Advance Access publication December 22, 2004

Action Observation and Acquired Motor Skills: An fMRI Study with Expert Dancers

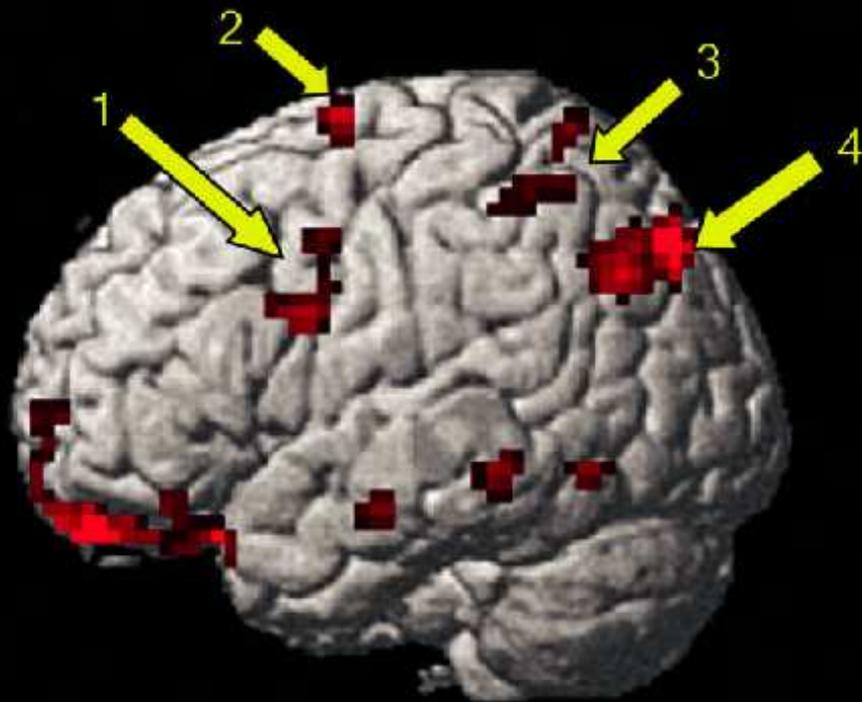
B. Calvo-Merino¹, D.E. Glaser², J. Grèzes³, R.E. Passingham⁴
and P. Haggard²



Soggetti sperimentali:

1. Ballerini di Classica (n°10)
2. Ballerini di Capoeira (n°9)
3. Non Esperti - controllo (n°10)

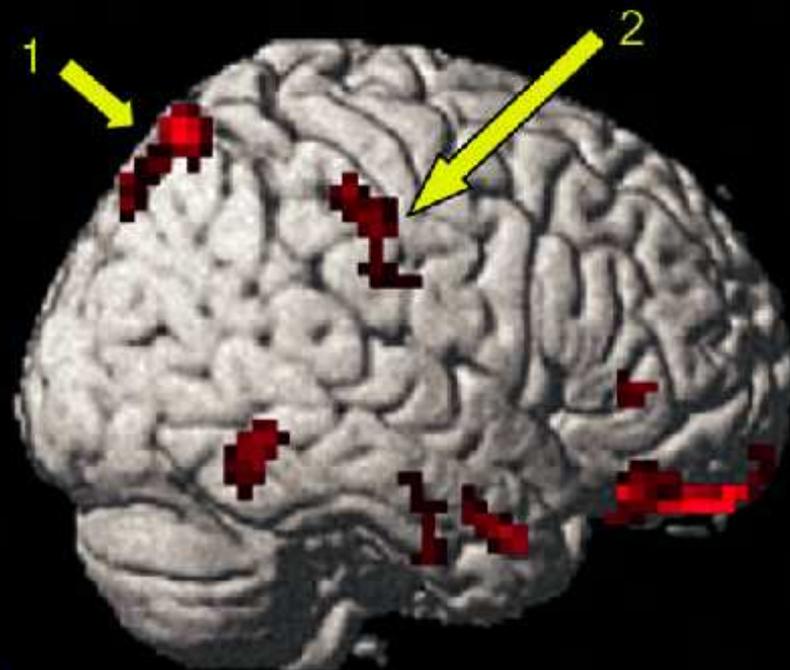
Figure 1. Stimuli: Colour videos of standard classical ballet and capoeira movements were performed by professional dancers. Twelve different moves of each style (*a*, ballet; *b*, capoeira) were matched by a professional choreographer for kinematic features (for examples see videos in the supplementary information online).



1. Corteccia premotoria ventrale
2. Corteccia premotoria dorsale
3. Solco intraparietale
4. STS posteriore

A

1. Lobulo parietale superiore
2. Solco intraparietale



B

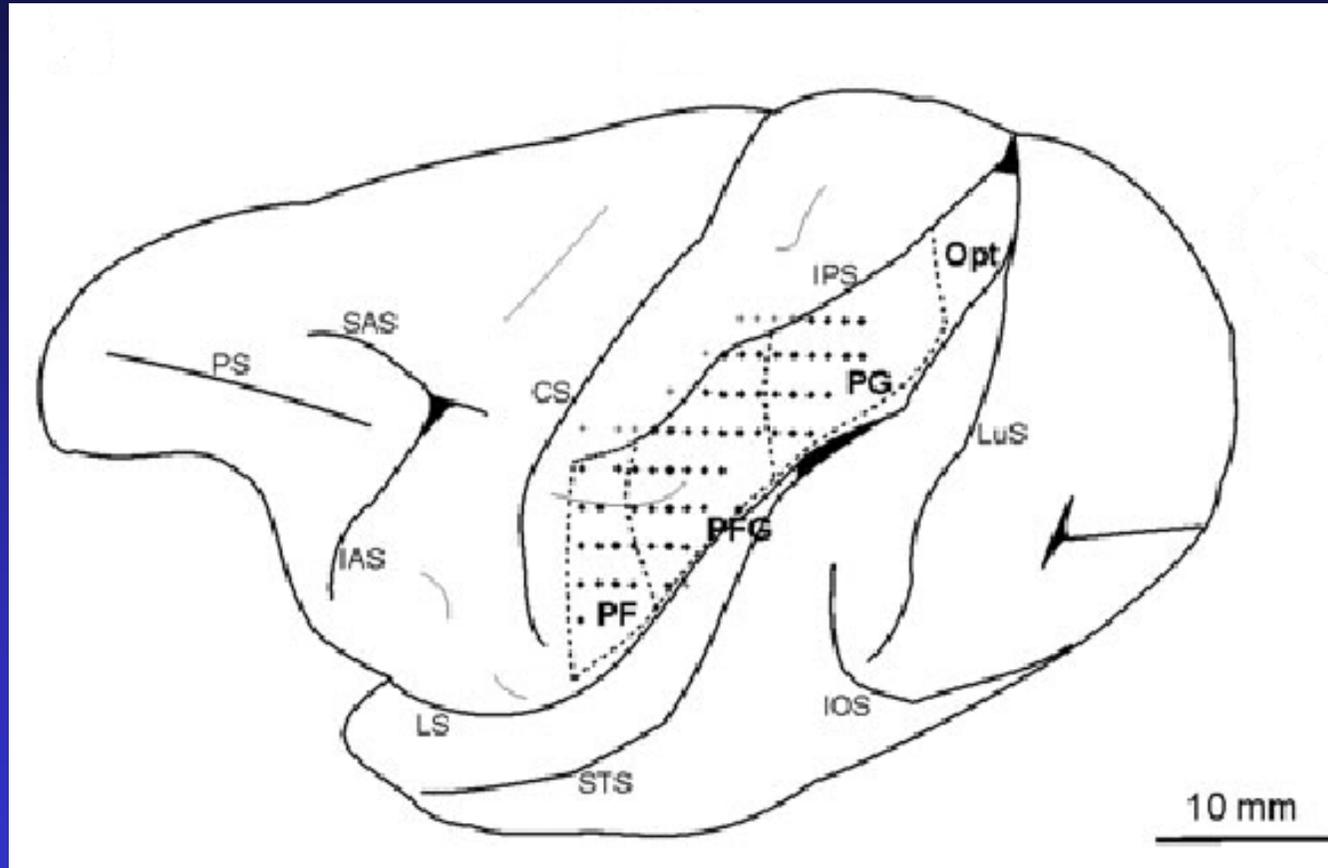
- 1. Attivazione del Sistema Mirror nei 3 gruppi**
- 2. Maggiore attivazione durante la condizione congruente**
- 3. Insensibilità al tipo di stimolo nei soggetti Non Esperti**

- Il confronto dimostra la rilevanza dell'esperienza motoria nell'osservazione dell'azione
- *“Our results show that this ‘mirror system’ integrates observed actions of others with an individual’s personal motor repertoire, and suggest that the human brain understands actions by motor simulation”*
- Gli autori evidenziano che i movimenti, e quindi i gruppi muscolari implicati nelle due discipline, sono sostanzialmente gli stessi.
- Conseguentemente, la differenza tra i due gruppi dimostra che il sistema mirror non mappa i movimenti, ma le abilità motorie

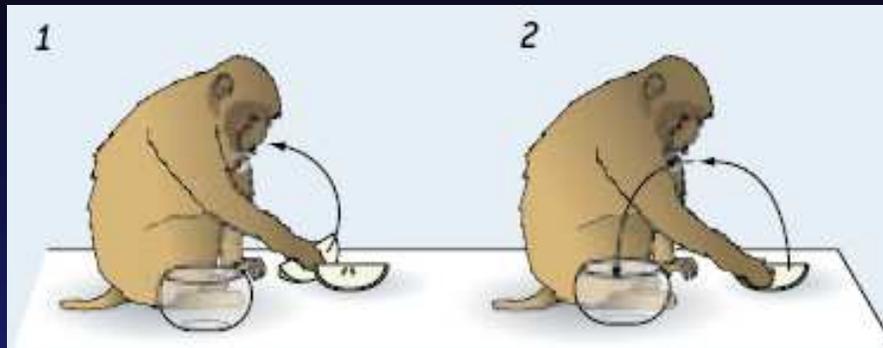
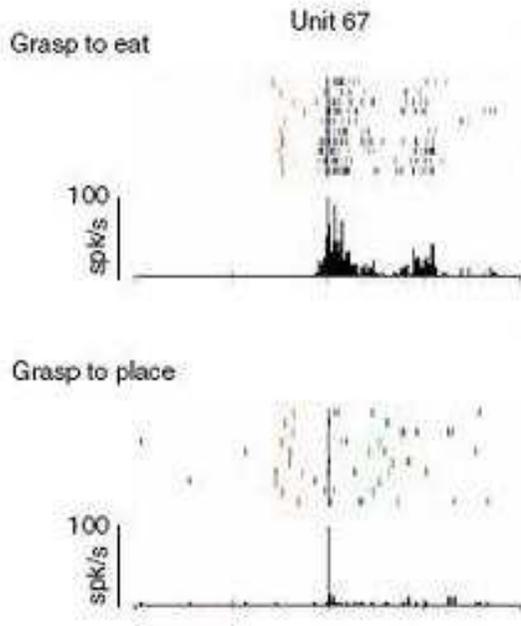
Il Sistema Mirror ci aiuta a predire le azioni?

**Il Sistema Mirror e la comprensione delle
*intenzioni***

Il Modello delle Catene



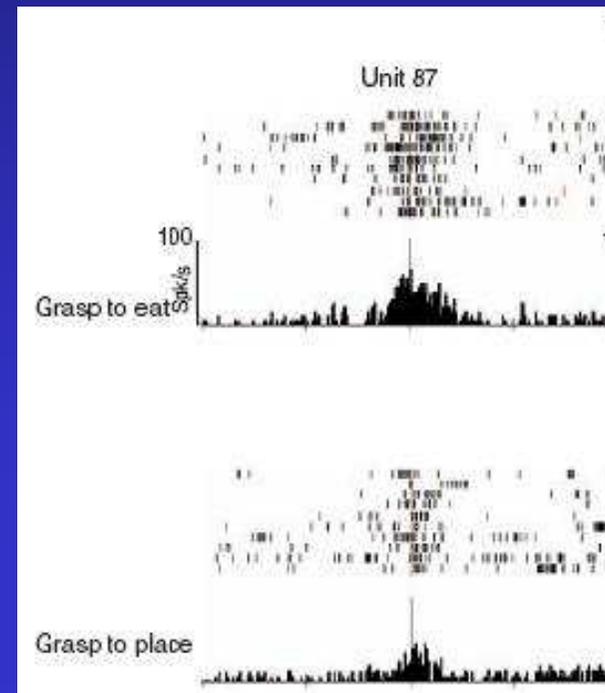
E' stata scoperta una nuova classe di neuroni mirror parietali



CONDIZIONE MOTORIA



CONDIZIONE VISIVA



Il Modello delle Catene

MOTORIO

Gli atti motori *non* sono correlati l'uno con l'altro *indipendentemente* dallo scopo finale dell'azione, ma sembrano appartenere ad una *catena intenzionale precostituita*, nella quale ogni atto motorio è facilitato dal precedente

VISIVO

Durante l'osservazione, l'atto motorio osservato recluta un'intera e specifica catena intenzionale.

A seconda del tipo di catena motoria attivata, l'osservatore avrà una spontanea previsione del *perché* l'agente osservato fa quello che vediamo (per mangiare / per posare).

What & Why

What: i Neuroni Mirror indicano il “cosa” fa l’altro (prende, morde, strappa, etc)

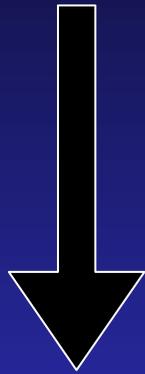
Why: le Catene Motorie mettono a disposizione del Sistema Mirror il “perché”
l’altro fa qualcosa (prende *per mangiare*, prende *per posare*)

IL SISTEMA MIRROR

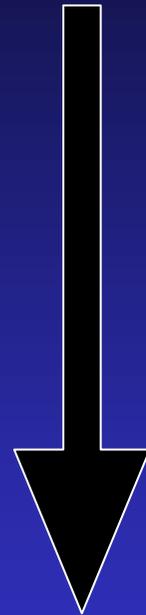
&

LA MOTOR IMAGERY

In almeno tre occasioni la nostra corteccia motoria è attivata



**Durante l'esecuzione
di atti motori**



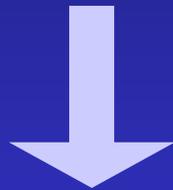
**Durante l'osservazione
di atti motori**



**Durante l'immaginazione
di atti motori**

Motor imagery

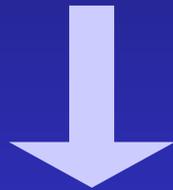
Studi apparsi negli ultimi 20 anni hanno dimostrato che l'immaginazione di una azione richiede le stesse caratteristiche temporali corrispondenti alla reale esecuzione.



Camminare verso punti diversi di una stanza, richiede gli stessi tempi, sia che il compito sia eseguito fisicamente o mentalmente.

Motor imagery

Anche nelle operazioni 'non coscienti' si verifica questa analogia: immaginare di afferrare un oggetto piazzato in differenti orientamenti, richiede tempi diversi a seconda dell'orientamento.



Questo suggerisce che il soggetto debba mentalmente ruotare il braccio nella posizione appropriata, con tempi corrispondenti alla reale esecuzione

Negli esperimenti di Motor Imagery sono stati rilevate variazioni dei parametri del SNA



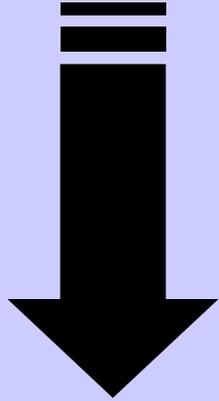
Decety et al., 1991:

Il grado di aumento di frequenza cardiaca e ventilazione polmonare di un soggetto che corre mentalmente a 12km/h è paragonabile a quello di un soggetto che corre realmente a 5km/h

Non può essere spiegato come un aumento della domanda metabolica periferica

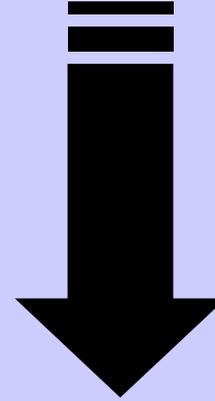
Il Sistema Mirror
è un 'sottoprodotto' della
Motor Imagery?

- Sistema Mirror



Attivazione
Esogena

- Motor Imagery
- Esecuzione



Attivazione
Endogena

Che cosa viene mappato
dai due sistemi?

Movimenti?

Azioni?

1. Sistema Mirror

- Abbiamo detto che nella Scimmia la dissociazione tra *movimento* e *scopo* dimostra che i Neuroni Mirror della corteccia premotoria sono modulati dallo scopo, indipendentemente dalla strategia muscolare

Abbiamo dissociato lo scopo (*prendere*) dal movimento (*aprire / chiudere*)
impiegando Pinze Normali & Pinze Inverse, ognuna in 2 condizioni

normal pliers

reverse pliers

'no-goal'



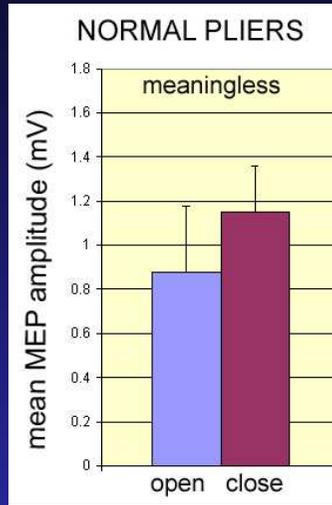
'goal'



Osservare movimenti senza scopo



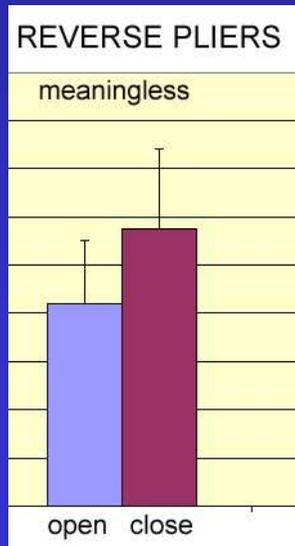
Pinze normali
No scopo



**Facilitazione durante
l'osservazione della chiusura
della mano**



Pinze invertite
No scopo

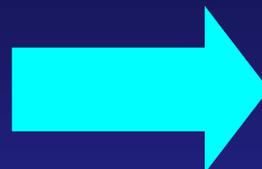
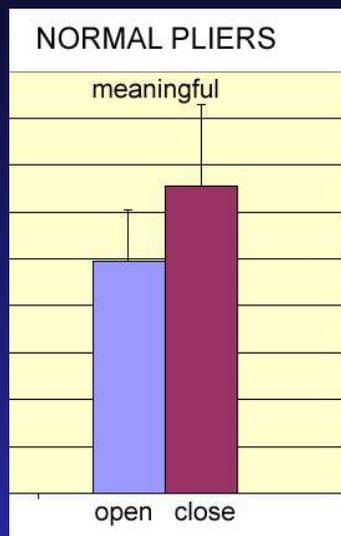


**Facilitazione durante
l'osservazione della chiusura
della mano
(mentre la pinza si apre)**

Osservare movimenti con uno scopo



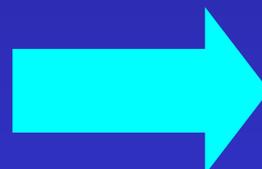
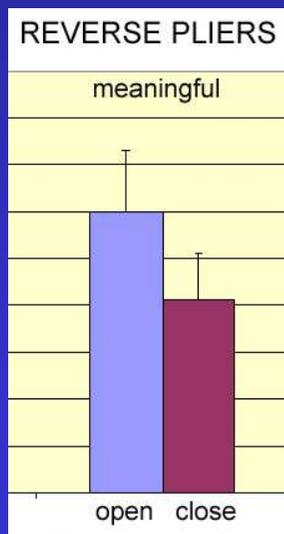
Pinze normali
Scopo



Facilitazione durante
l'osservazione della chiusura
della mano (e della pinza)



Pinze invertite
Scopo



Facilitazione durante
l'osservazione della chiusura
della pinza!!!
(e non della mano!!!)

Se NON è presente uno scopo, il sistema mirror mappa il movimento biologico della mano osservata

Se è presente uno scopo, il sistema mirror mappa lo scopo e quindi l'effettore finale



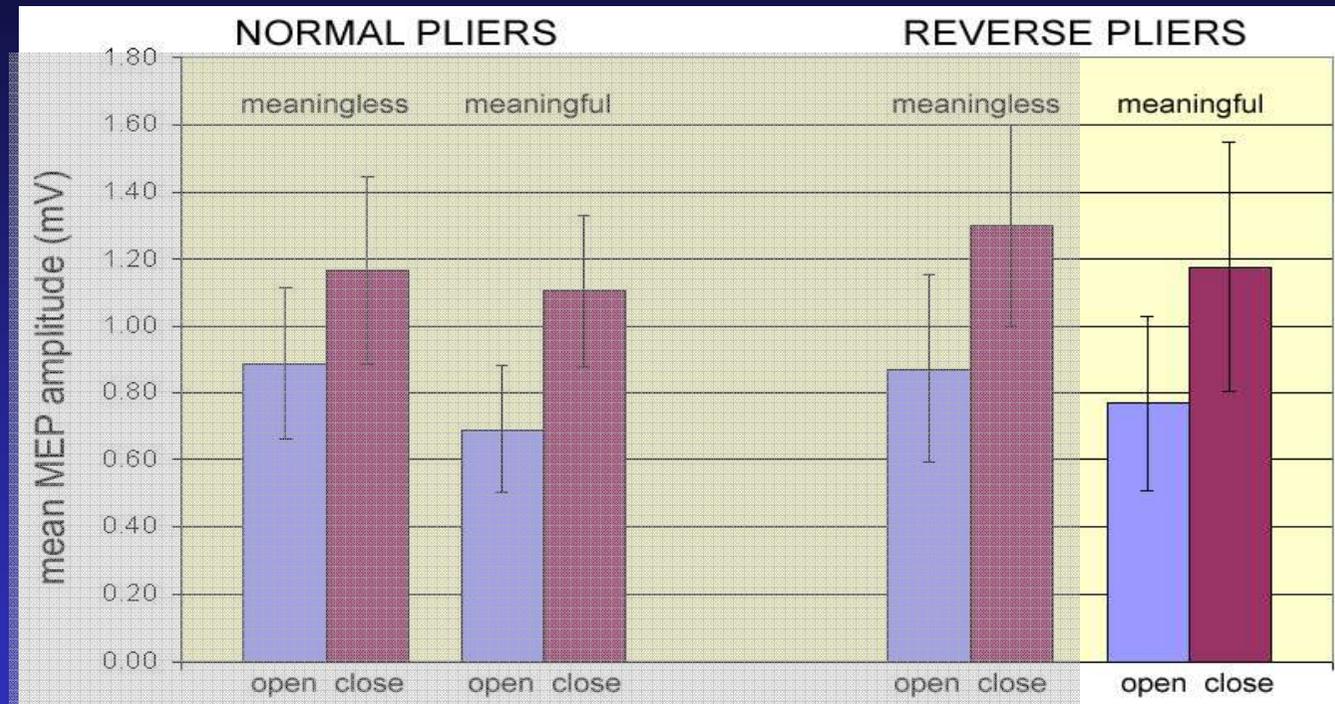
Per il nostro Sistema Mirror, le uniche dita da considerare sono le “*dita*” della pinza!

2. Motor imagery

Cosa succede se invece di osservare queste azioni, le immaginiamo ad occhi chiusi?

Abbiamo eseguito lo stesso esperimento, ma anziché osservare le 4 condizioni, i soggetti dovevano immaginarle

RISULTATI



In ogni condizione la facilitazione è maggiore durante l'immaginazione della fase di chiusura della mano, indipendentemente dalla presenza dello scopo e dalla pinza utilizzata

Anche se è presente uno scopo, l'immaginazione mappa il movimento

Le due attivazioni 'silenti' della corteccia motoria mostrano un comportamento diverso se testate in un compito simile.

- Quando immaginiamo di eseguire un'azione, il nostro sistema motorio simula l'esecuzione dell'atto (parametri di basso livello)
- Quando osserviamo un'azione, il nostro sistema motorio ha un comportamento diverso a seconda che l'azione sia finalizzata o meno:
 - (a) se non-finalizzata, il sistema motorio replica i singoli movimenti che costituiscono l'azione osservata;
 - (b) se finalizzata, il sistema motorio è modulato dallo scopo finale dell'azione;

Applicazioni pratiche: riabilitazione e sport?

- Le attivazioni “*covert*” del sistema motorio (osservazione / immaginazione) replicano l’esecuzione effettiva di azioni finalizzate e non finalizzate
- Queste tipologie di attivazione possono essere d’aiuto nella pratica riabilitativa?

Action observation has a positive impact on rehabilitation of motor deficits after stroke

Denis Ertelt,^a Steven Small,^b Ana Solodkin,^b Christian Dettmers,^c Adam McNamara,^a Ferdinand Binkofski,^{a,*} and Giovanni Buccino^{d,*}

Sistema Mirror e
Riabilitazione

Motor Imagery e
Riabilitazione

Clinical Rehabilitation 2001; **15**: 233–240

A randomized efficacy and feasibility study of imagery in acute stroke

Stephen J Page, Peter Levine, SueAnn Sisto and Mark V Johnston Kessler Medical Rehabilitation Research and Education Corporation (KMRREC), West Orange, New Jersey, USA

... non essendo il deficit “alla periferia” del sistema, bensì corticale, ...

... ed essendo l’attivazione della corteccia motoria invariata nelle sue attivazioni “overt” e “covert” ...

- ... una riabilitazione che fa leva su altre modalità di attivazione della corteccia motoria (osservazione, immaginazione) ha un impatto positivo sulla terapia riabilitativa

Attivazioni 'covert' & sport

Il mental training è considerato in grado di modificare l'addestramento sportivo e musicale

- Miglioramento nella velocità (Pascual-Leone 1995)
- Miglioramento nell'accuratezza (Pascual-Leone 1995)
- Miglioramento nella forza (Yue & Cole 1992)

**Il potenziamento della *forza* muscolare
mediante allenamento è dovuto a due fattori:**

Ipertrofia del muscolo



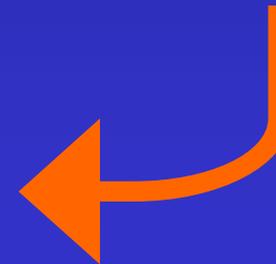
**Stadi successivi
dell'allenamento**

**Aumentata abilità nella
attivazione dei motoneuroni**



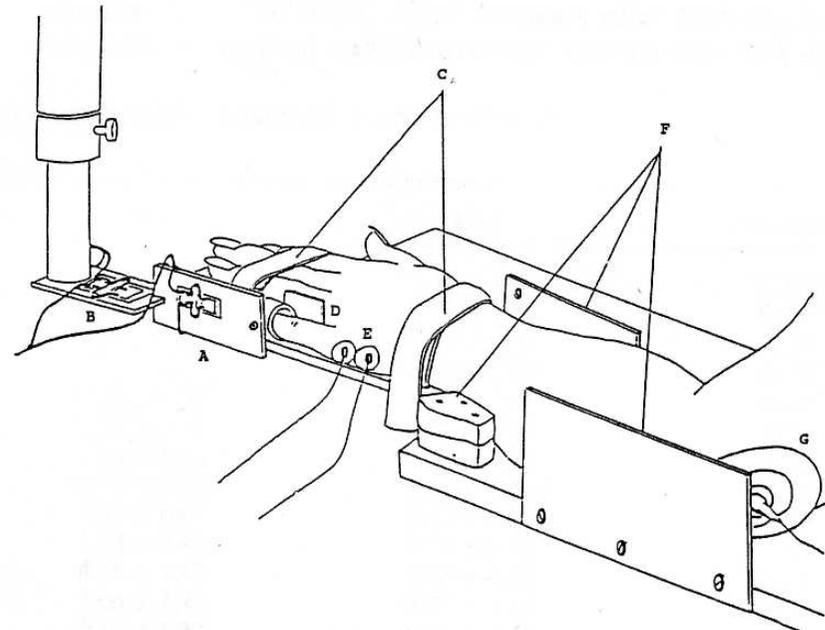
**Prime settimane di
allenamento**

Origine Neurale



Yue & Cole 1992: *Strength increases from the motor program: comparison of training with maximal voluntary and imagined muscle contractions*

- I soggetti immaginano di contrarre al massimo l'abditore del digit minimi, senza attivare nessun muscolo
- Dopo 4 settimane, aumento del 22% (contro 29.75% a seguito di reale allenamento)
- Aumento del 10.45% nella mano non addestrata (contro 14.45% nel gruppo con reale allenamento)





“The pattern of results on the mechanisms of covert action corresponds to the central stages of action organization, uncontaminated by the effects of execution”

Marc Jeannerod

Riepilogo

- Sebbene adibito al controllo del movimento, il sistema motorio è particolarmente sensibile allo scopo delle azioni (eseguite ed osservate)
- Il sistema motorio è reclutato durante l'osservazione delle azioni (modulato dallo *scopo* e dal *movimento* dell'azione osservata)
- Il sistema motorio è reclutato durante l'immaginazione del movimento (modulato dal *movimento* dell'azione osservata)
- Immaginazione ed osservazione del movimento hanno un impatto positivo sull'esecuzione dello stesso movimento

FINE