

# L'intelligenza biologica Computazione nel sistema nervoso

Alberto Borghese  
Università degli Studi di Milano  
Laboratorio di Applied Intelligent Systems  
(AIS-Lab)

Dipartimento di Informatica  
[borghese@di.unimi.it](mailto:borghese@di.unimi.it)





# Sommario



## Struttura del Sistema Nervoso Centrale

Il linguaggio

Le trasformazioni visuo-motorie

I mirror neurons

Il codice di popolazione come esempio di processing corticale



# Computazione nel SNC



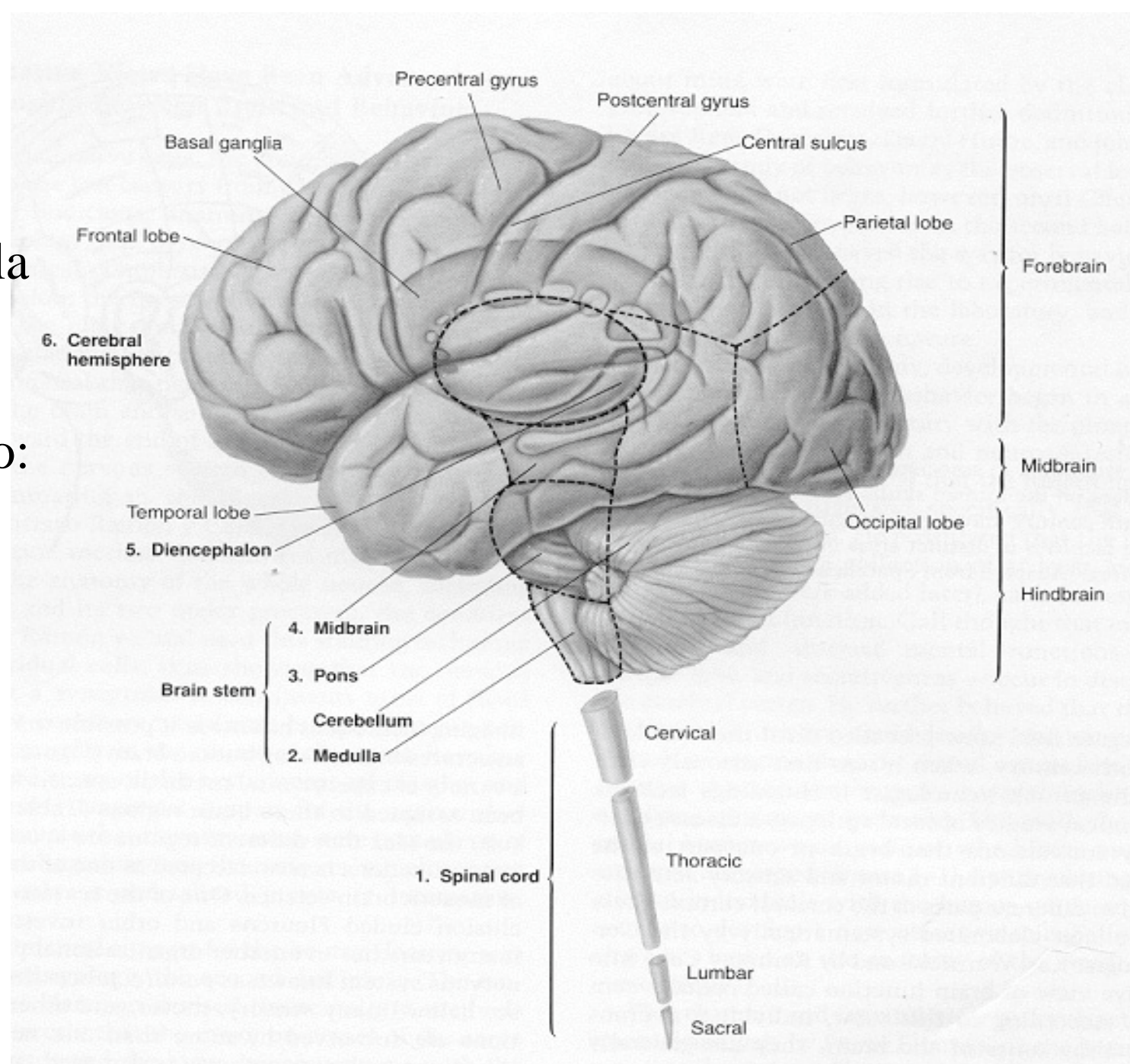
- Parallelizzazione
- Suddivisione dei task in moduli seriali / paralleli.
- Network che collega in serie / parallelo i vari moduli.
- Network dinamici.



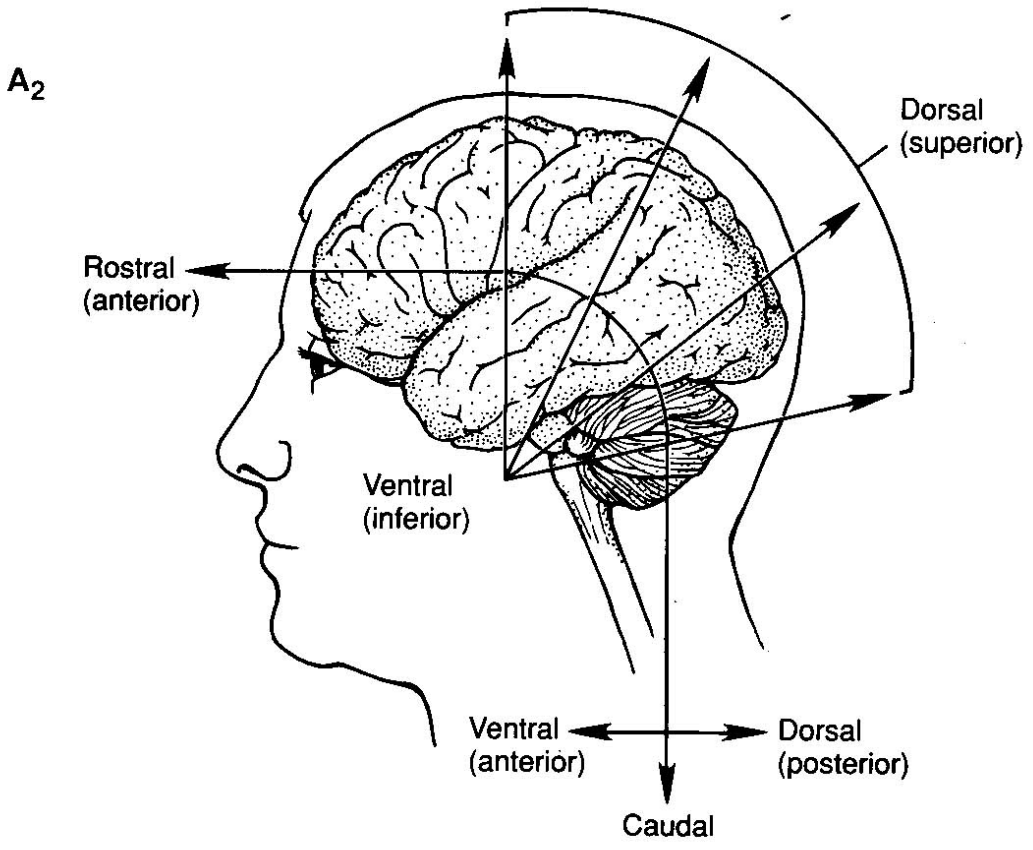
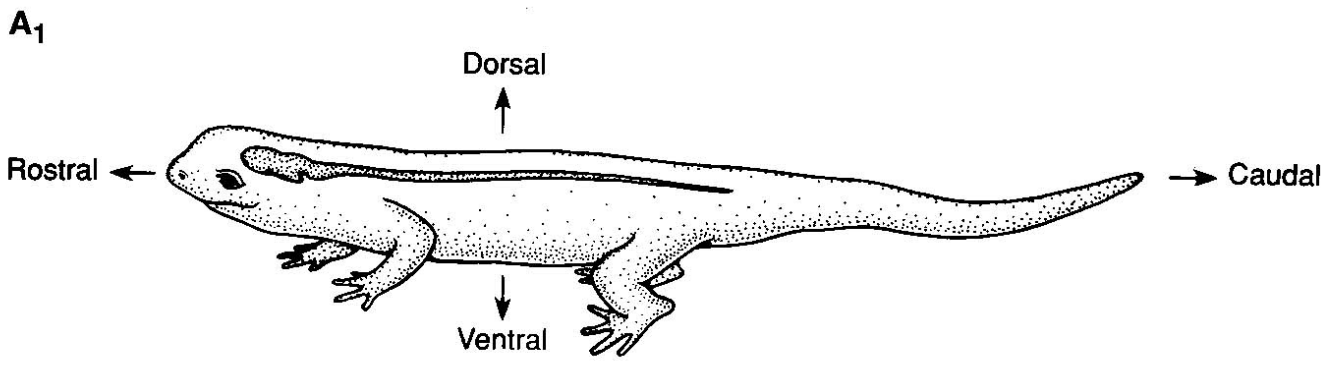
Sistema nervoso centrale:  
nella scatola cranica e nella  
spina dorsale.

Sistema nervoso periferico:  
nervi e gangli; parte  
somatica ed autonoma.

*Parallel,  
Distributed  
processing.*



# Struttura del Sistema Nervoso



# I punti cardinali del SNC



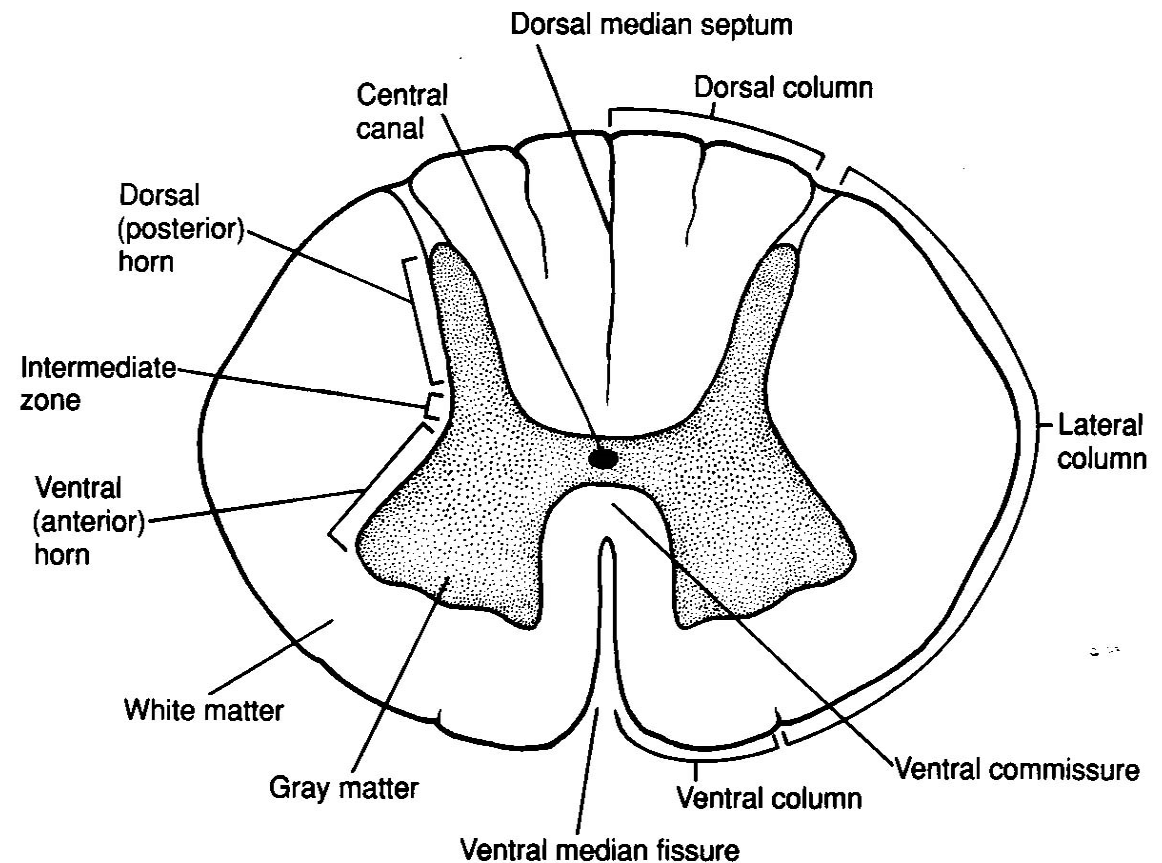
# La spina dorsale

*Spina dorsale*: Controlla il movimento degli arti e del tronco e riceve informazioni sensoriali dagli stessi distretti anatomici.

Si dipartono 31 paia di *nervi spinali*.

Contiene stazioni di elaborazione elementari e soprattutto assoni.

E' suddivisa in una parte ventrale (motoria) ed una parte dorsale (sensoriale).





# I 2 emisferi cerebrali

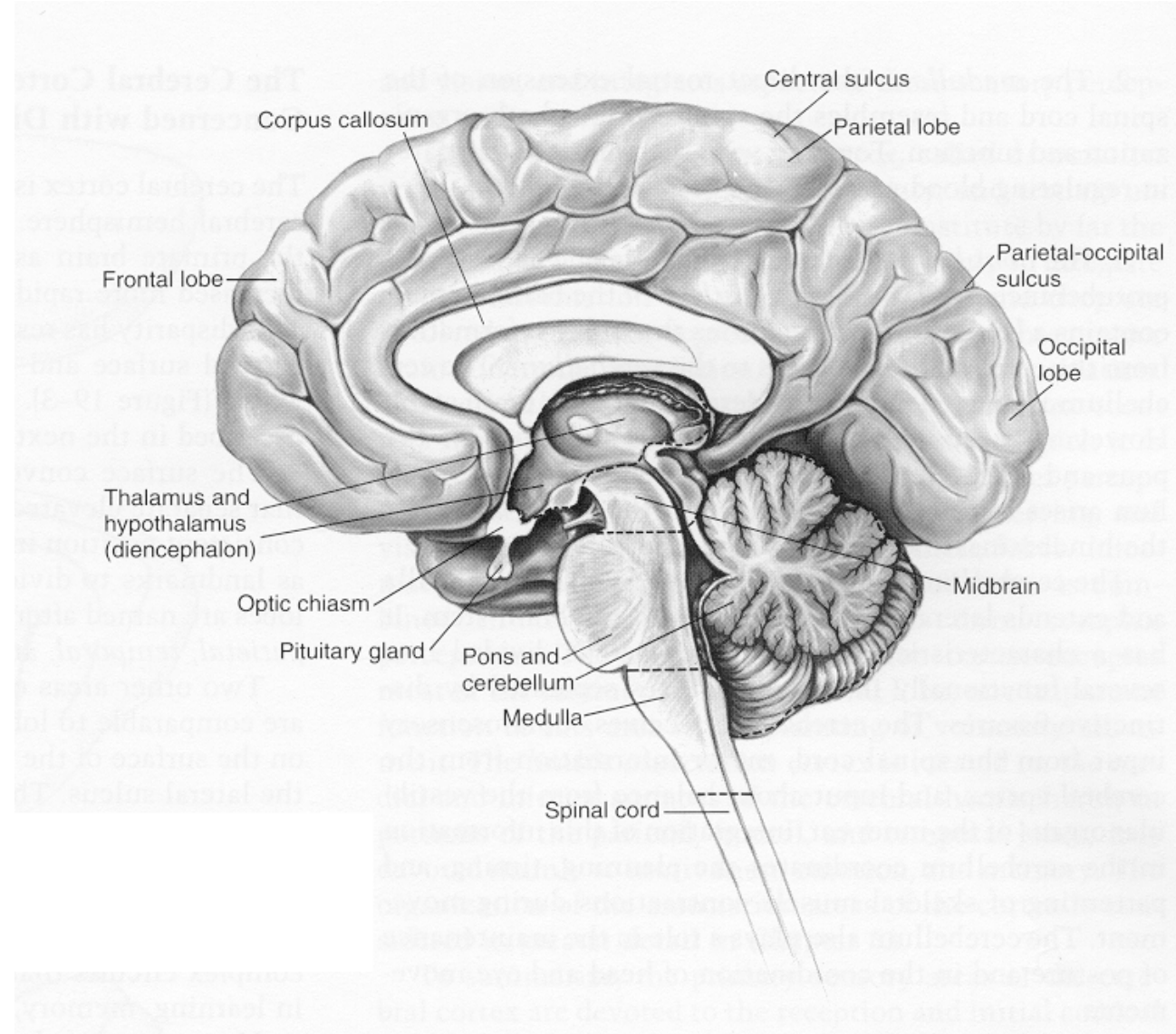


Emisferi simmetrici  
bilateralmente.

Ciascun emisfero ha  
competenza per la parte  
contro-laterale.

Le fibre neurali subiscono una  
decussazione.

Il corpo calloso è un fascio di  
fibre che connette i due  
emisferi.



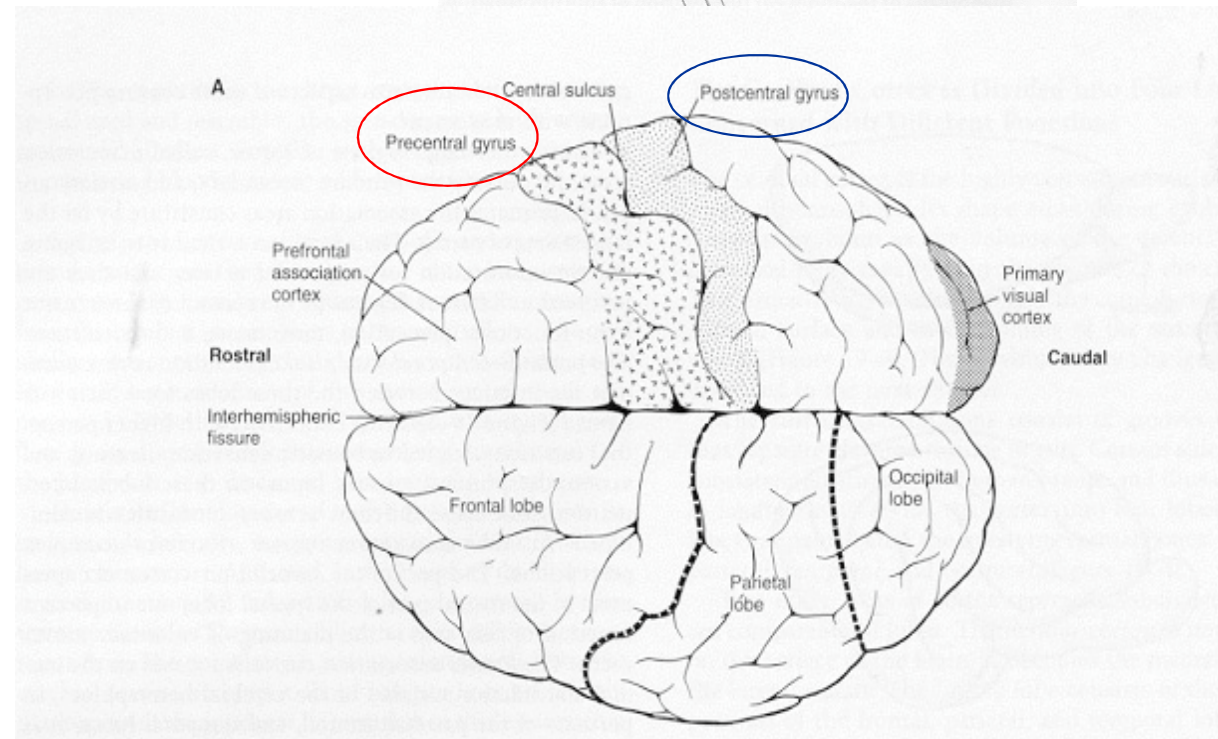
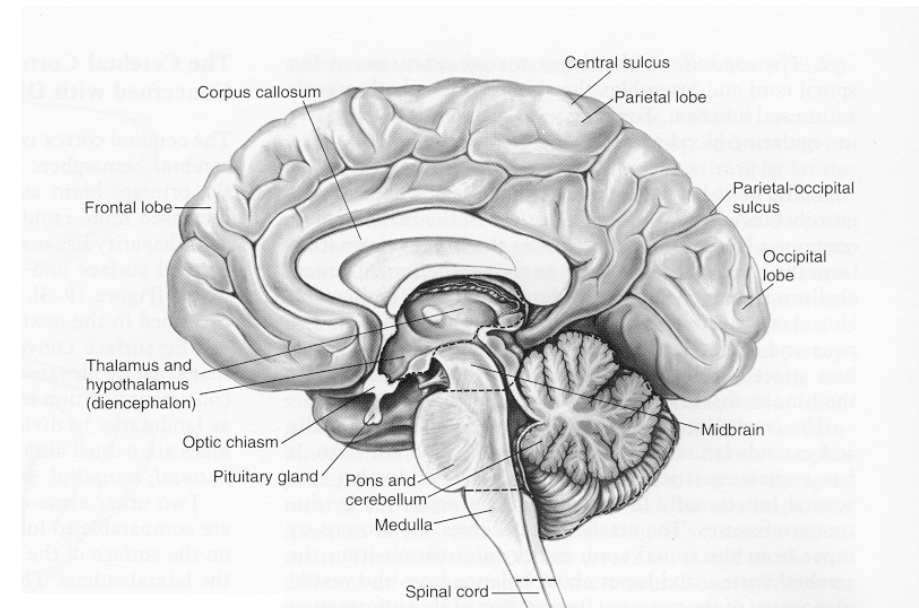
# Le convoluzioni cerebrali.

Struttura convoluta sotto la pressione dell'evoluzione.

Gyri e solci.

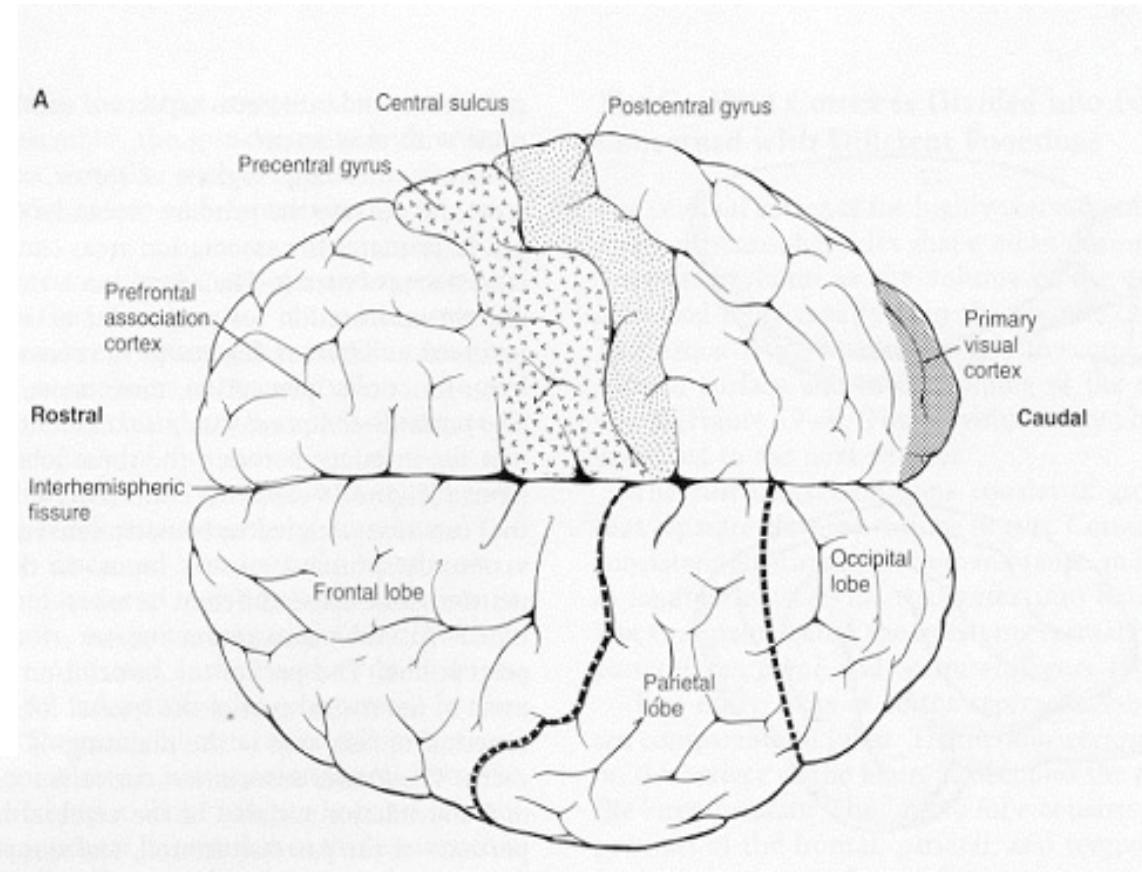
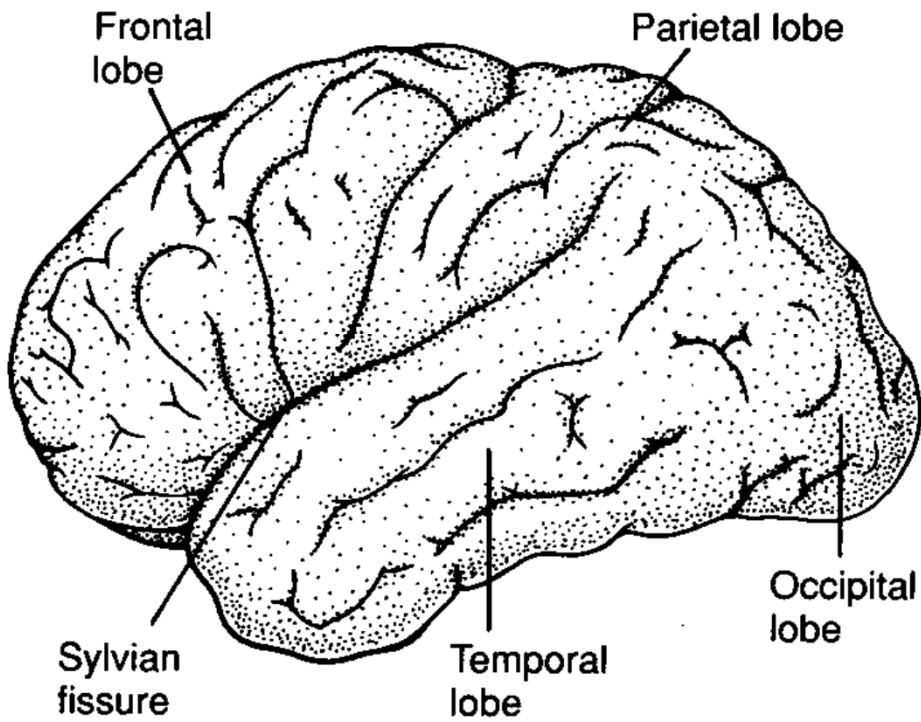
Alcuni solchi sono elementi di contrassegno.

Cellule nervose sulla superficie della corteccia, assoni diretti verso l'interno, sostanza bianca.



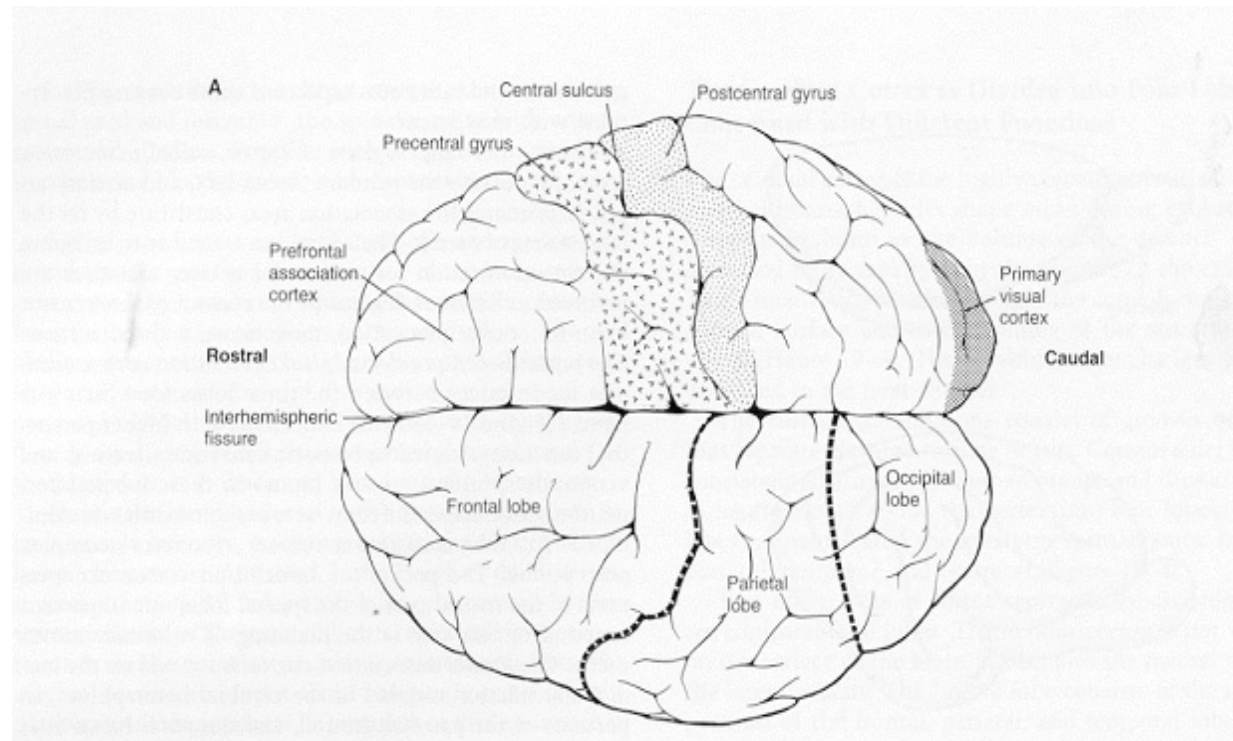
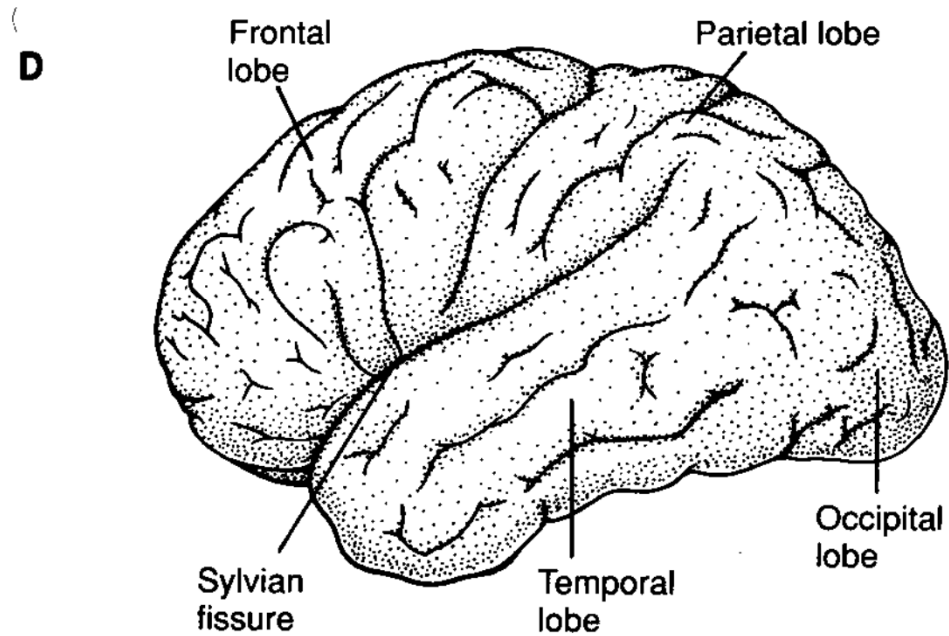


# I lobi cerebrali





+ *limbic lobe*.  
Cintura di corteccia  
posta sopra il brain  
stem ed il  
diencefalo. Ruolo  
fondamentale  
nell'apprendimento,  
nella memoria e  
nelle emozioni.



**I 4 lobi cerebrali classici**



# I lobi cerebrali

*Lobo frontale:* pianificazione dell'attività, rappresentazione delle azioni.

*Lobo parietale:* organizzazione spaziale delle informazioni sensoriali (spaziali), e rappresentazione (spaziale) del corpo umano (Body schema).

*Lobo occipitale:* visione.

*Lobo temporale:* udito, apprendimento, riconoscimento (memoria), rappresentazioni ed emozioni.

Competenza contro-laterale dei due emisferi.  
Lateralizzazione di alcune funzioni.





# Suddivisione cito-architeturale in aree funzionali



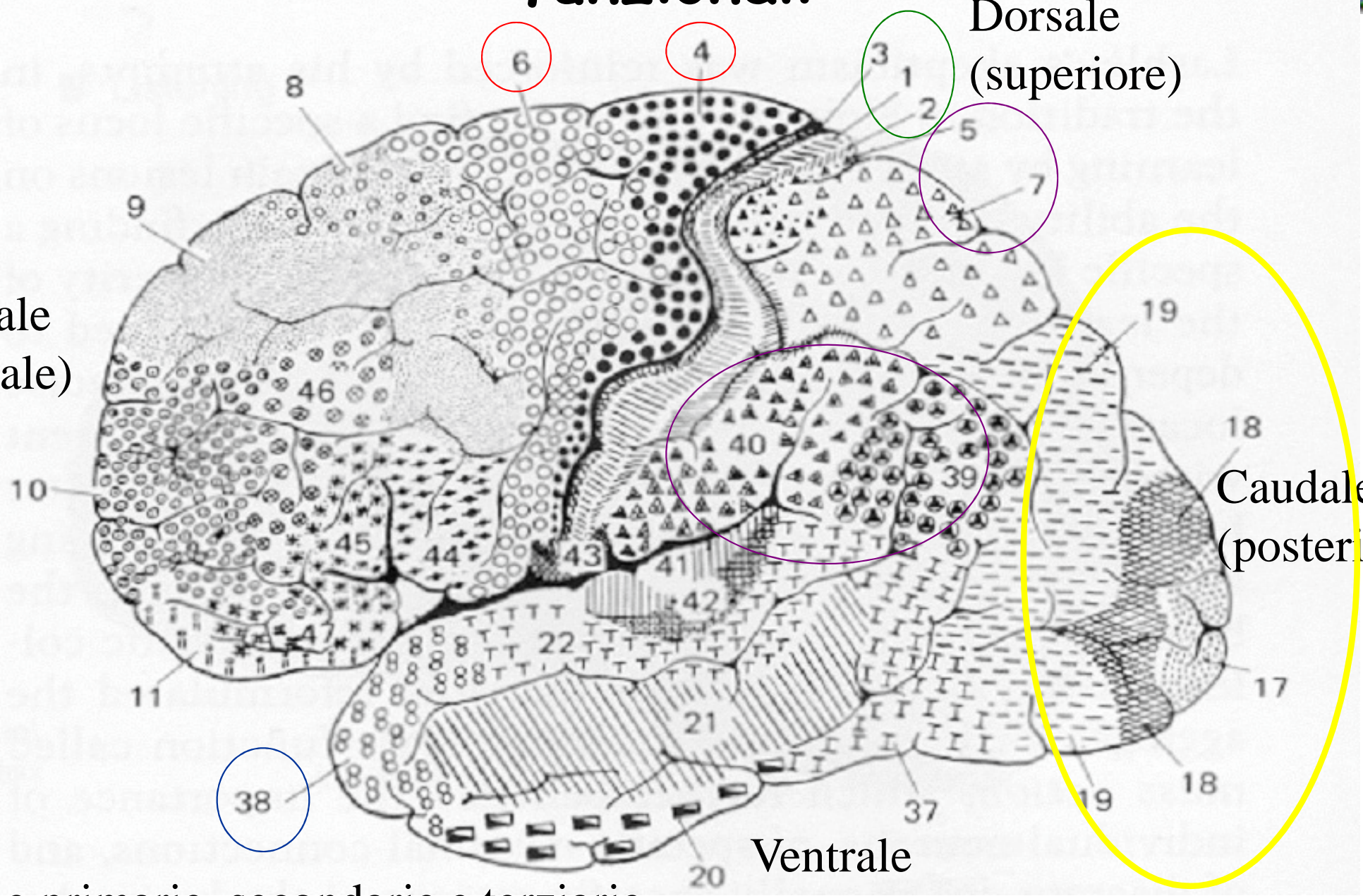
Rostrale  
(frontale)

Dorsale  
(superiore)

Caudale  
(posteriore)

Ventrale  
(inferiore)

Aree primarie, secondarie e terziarie.





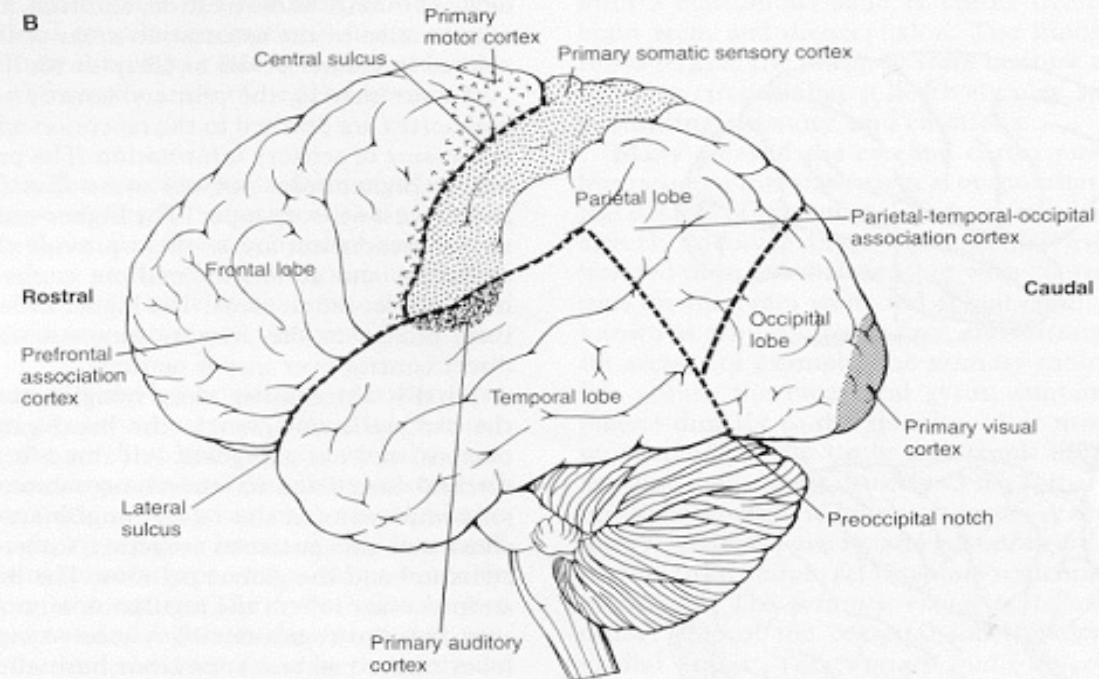
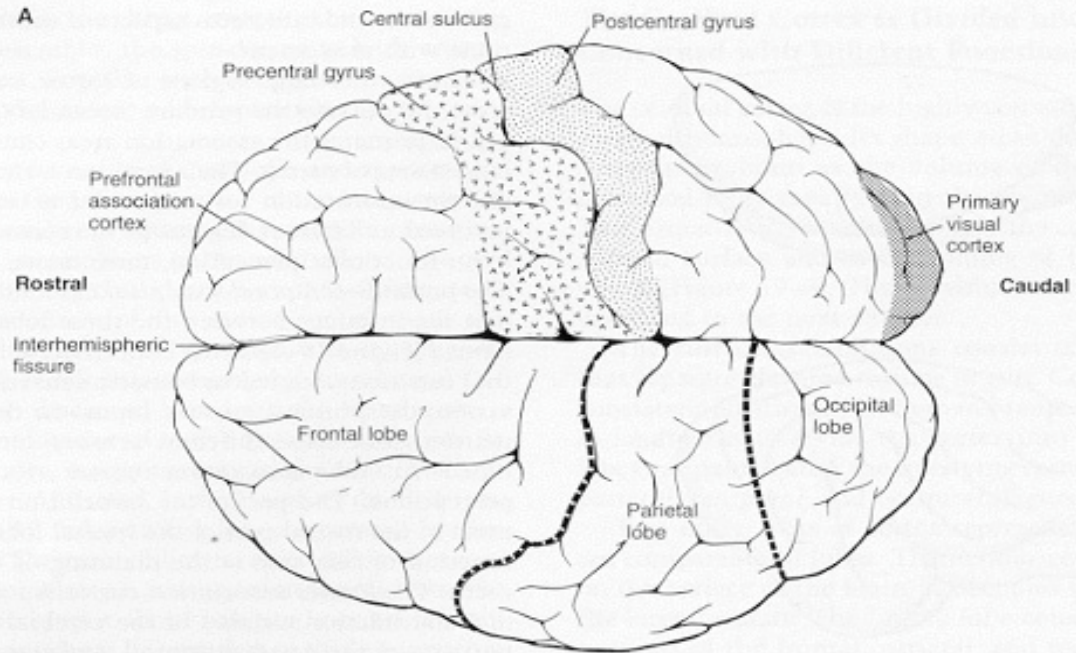


**Integrazione multi-sensoriale per l'azione.**

Giunzione temporale-parietale-occipitale.

Area limbica.

Area pre-frontale.



**Arete associative**



# Sommario



Struttura del Sistema Nervoso Centrale

**Il linguaggio**

Le trasformazioni visuo-motorie

I mirror neurons

Il codice di popolazione come esempio di processing corticale



# Linguaggio ed afasia



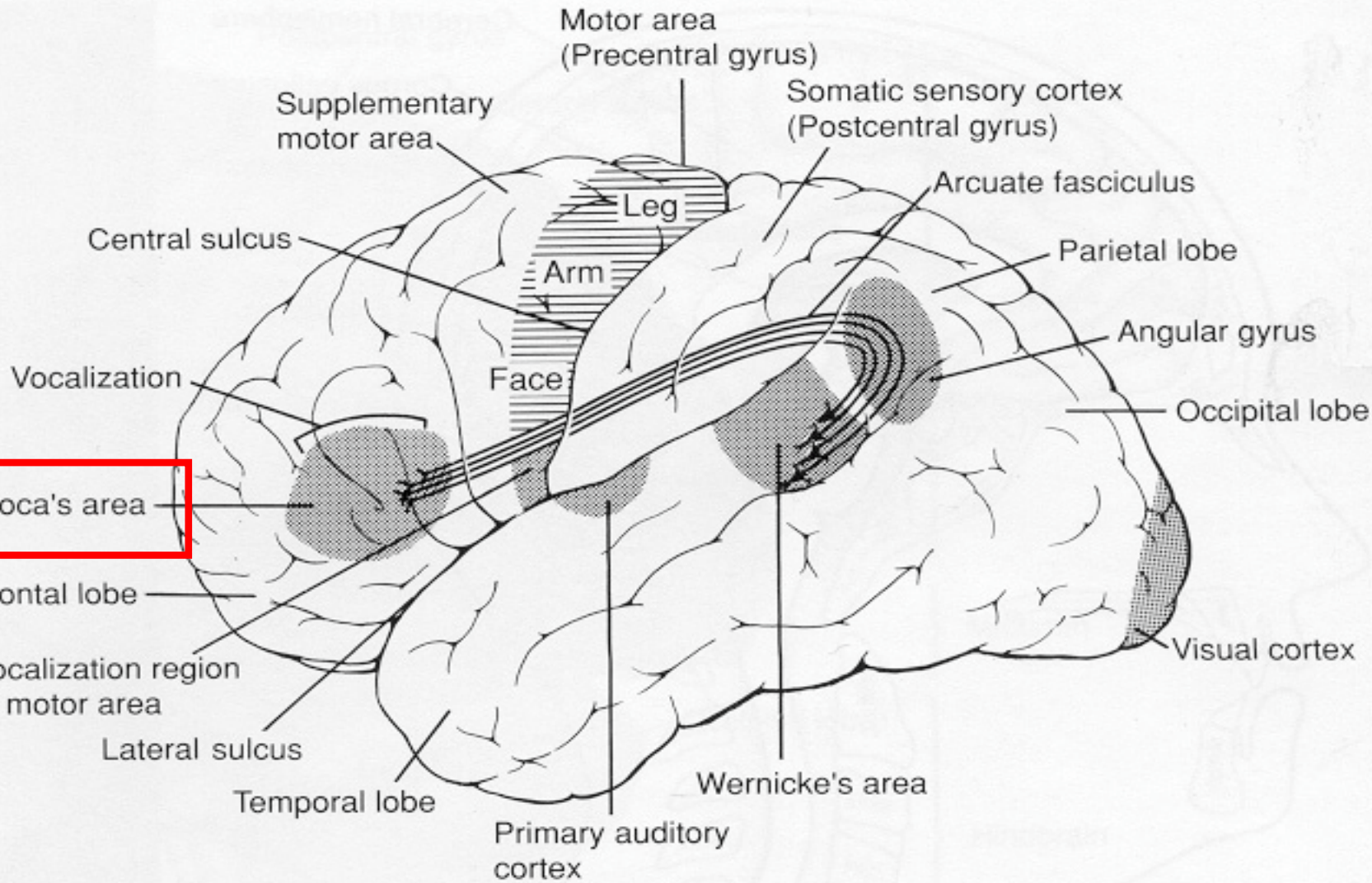
Afasia – genericamente, disordine del linguaggio.

**Lo studio sperimentale delle funzioni cognitive si basa su tre pilastri: neuro-imaging, lesioni e neuro-anatomia.**



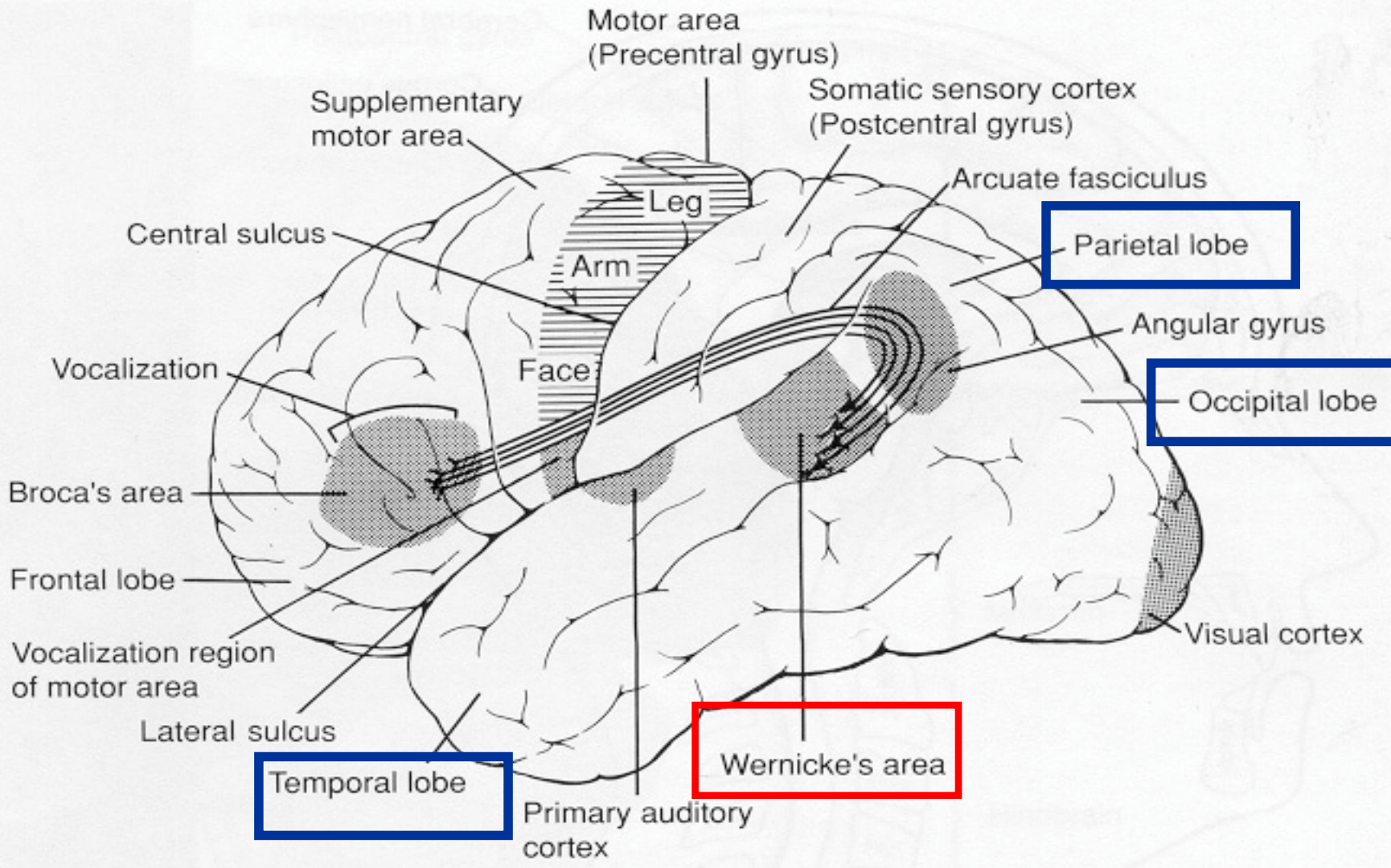
# Corteccia sinistra

L'area di Broca: afasia motoria





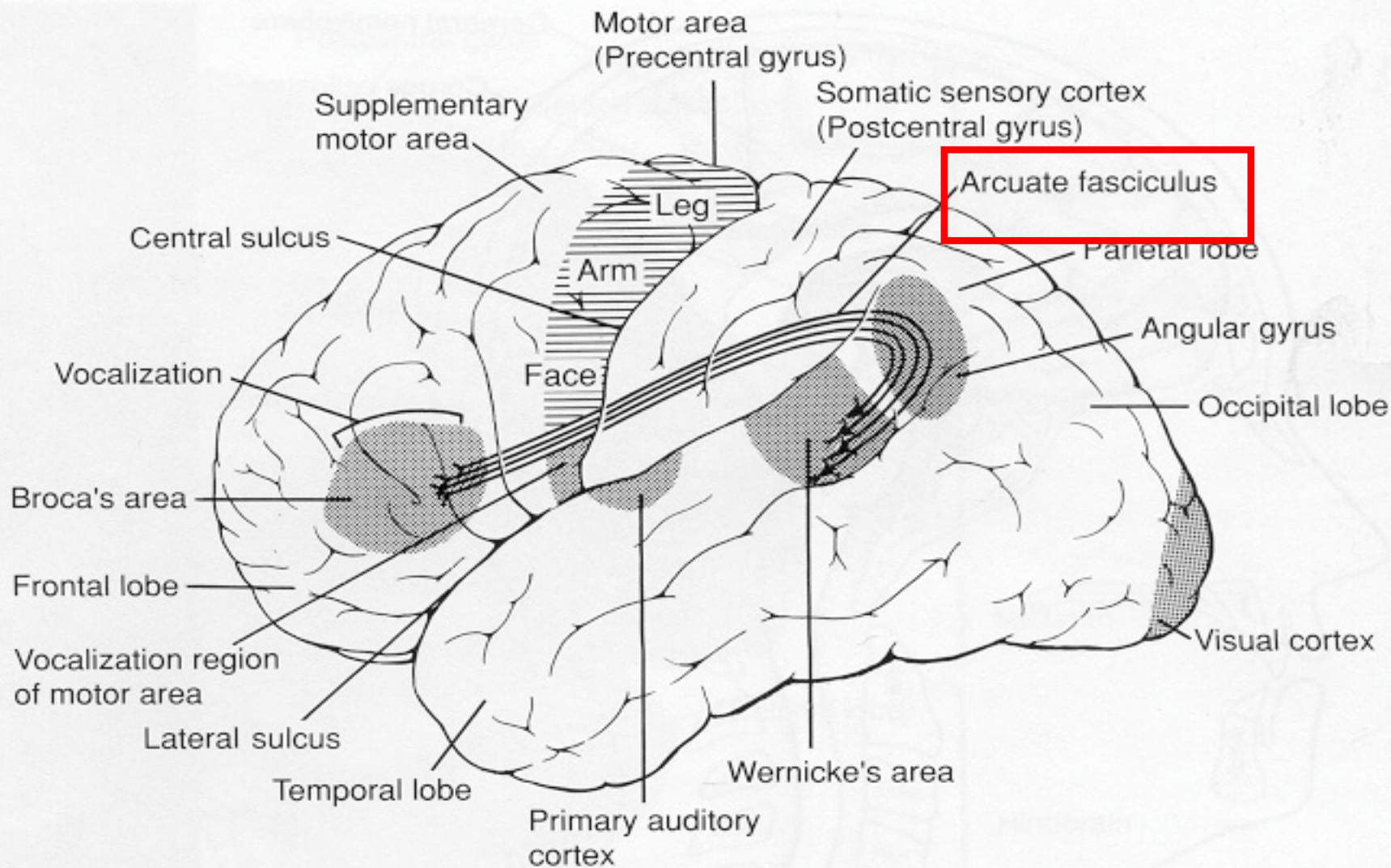
# L'area di Wernicke: afasia sensoriale



# Parallel Distributed Processing!!

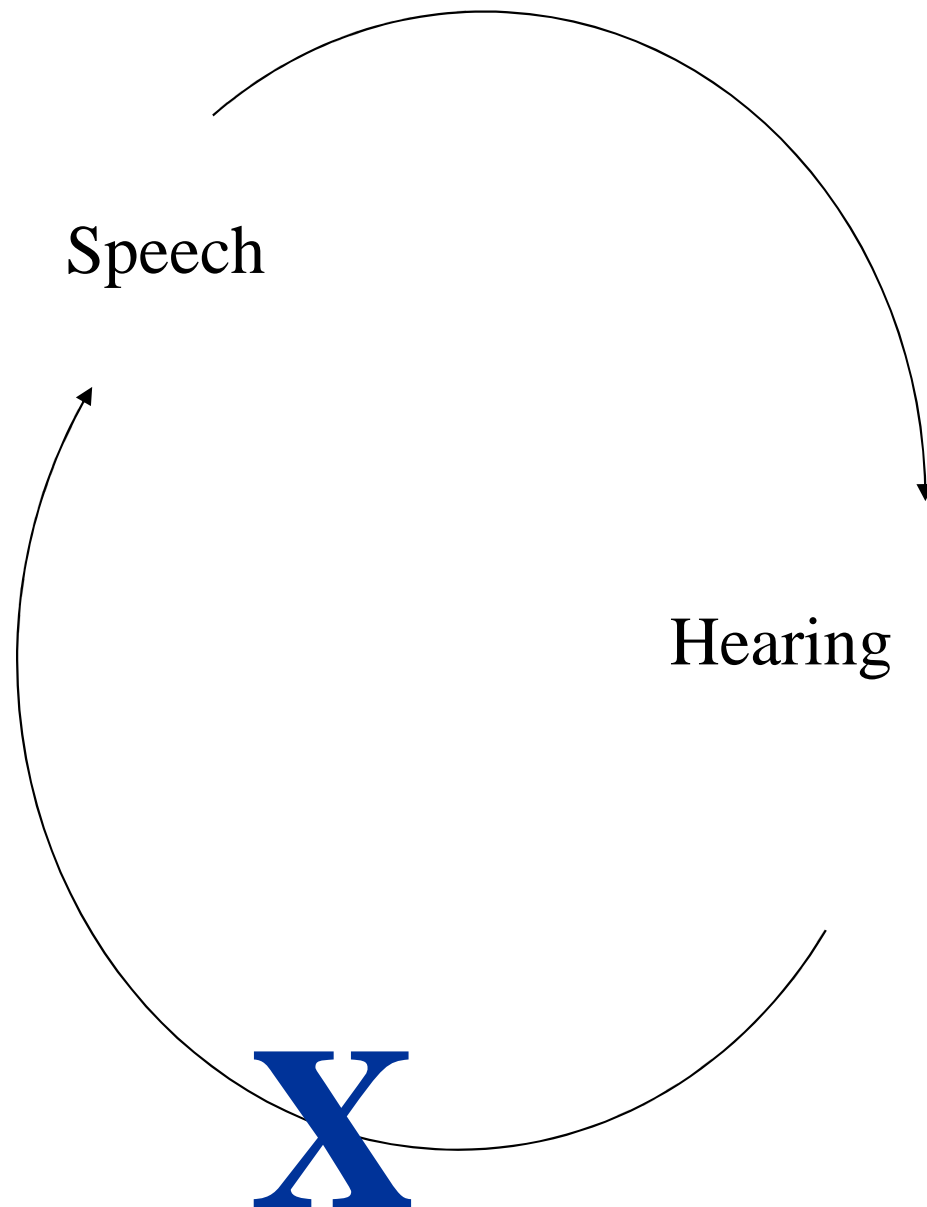


## Un terzo tipo di afasia





# Interruzione della circular reaction



**Afasia di conduzione. Un paziente può:**  
comprendere il linguaggio.  
parlare fluentemente.

**Ma:**

Non correttamente (omissione di parti del discorso, utilizzo di suoni sbagliati ....)

Si accorge del proprio errore ma non riesce a correggersi.





# Wenicke's model

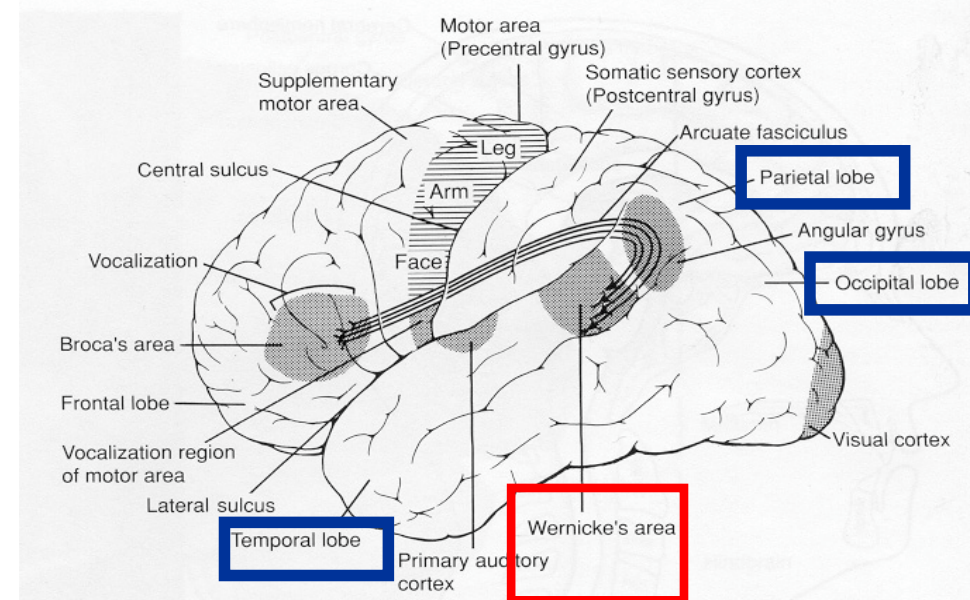
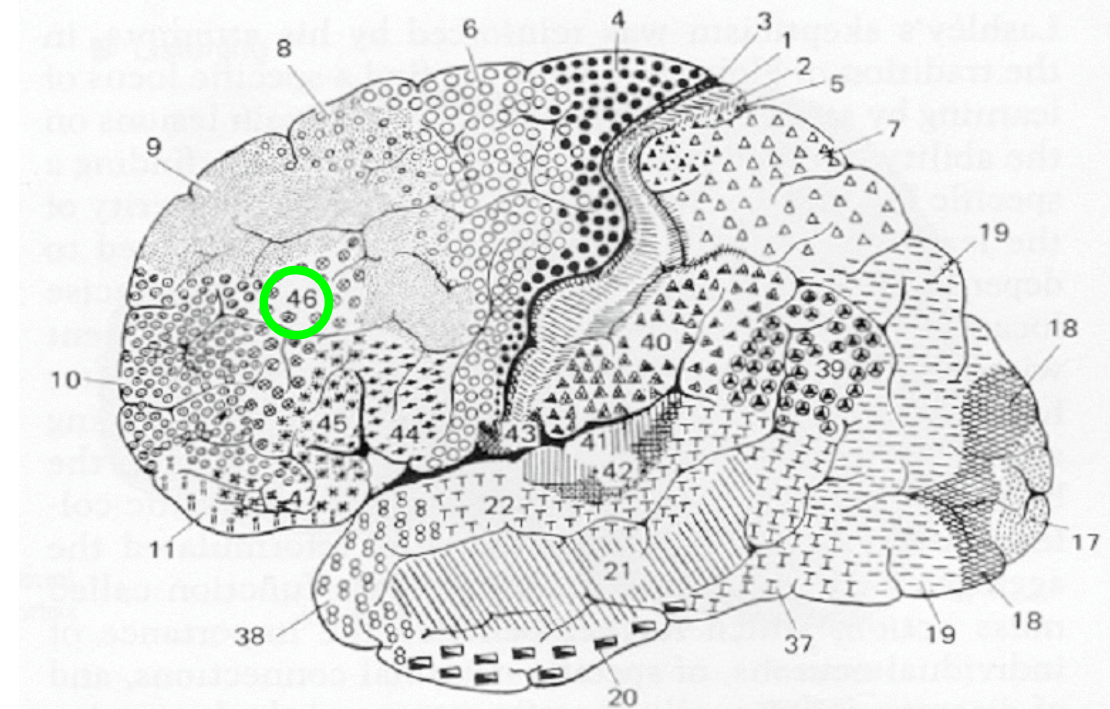


Parallel Distributed Processing.

Associazione acustica – visiva (area di Wernicke -> area di Broca).

Lettura di parole (aree visive -> area di Broca).

Prosodia (corteccia destra).







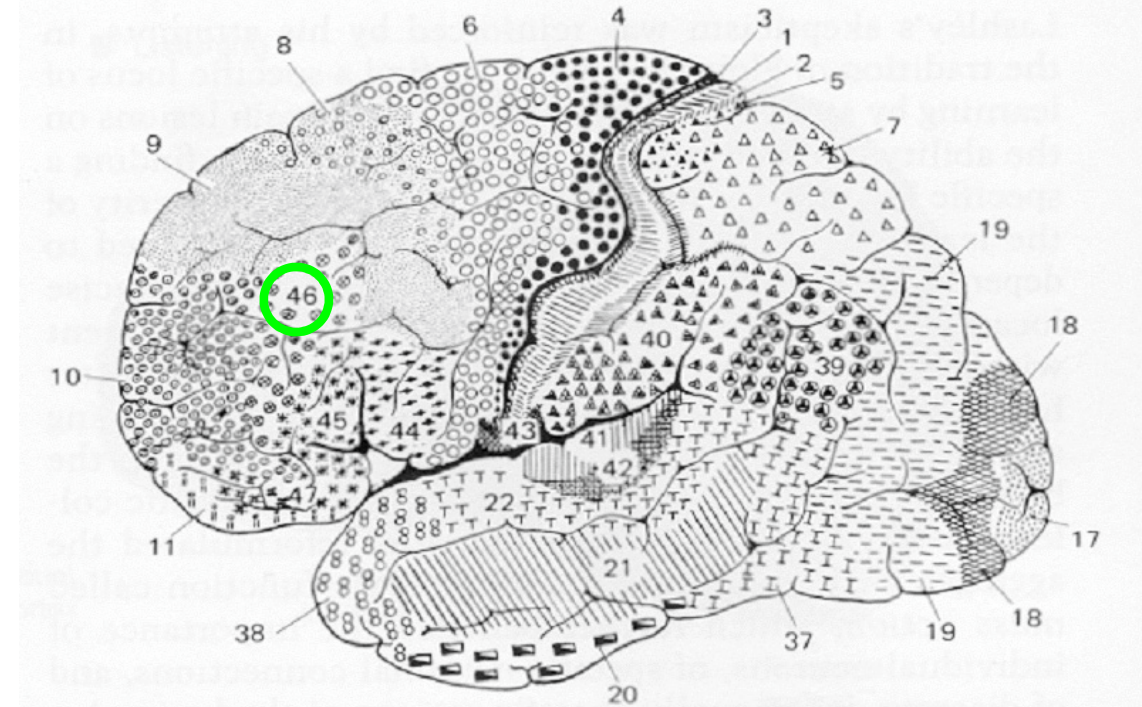
# Apprendimento del linguaggio



Clustering degli input acustici,  
associazioni visive – acustiche  
(percezione primaria del linguaggio).  
Emergenza di un codice neurale  
associato al linguaggio.

Rinforzo rappresentato dal  
significato (associazione cognitiva).

Dalla percezione del linguaggio alla  
sua produzione (circular reaction).



Solo se c'è produzione acustica  
si attiva l'area di Wernicke.



# Sommario



Struttura del Sistema Nervoso Centrale

Il linguaggio

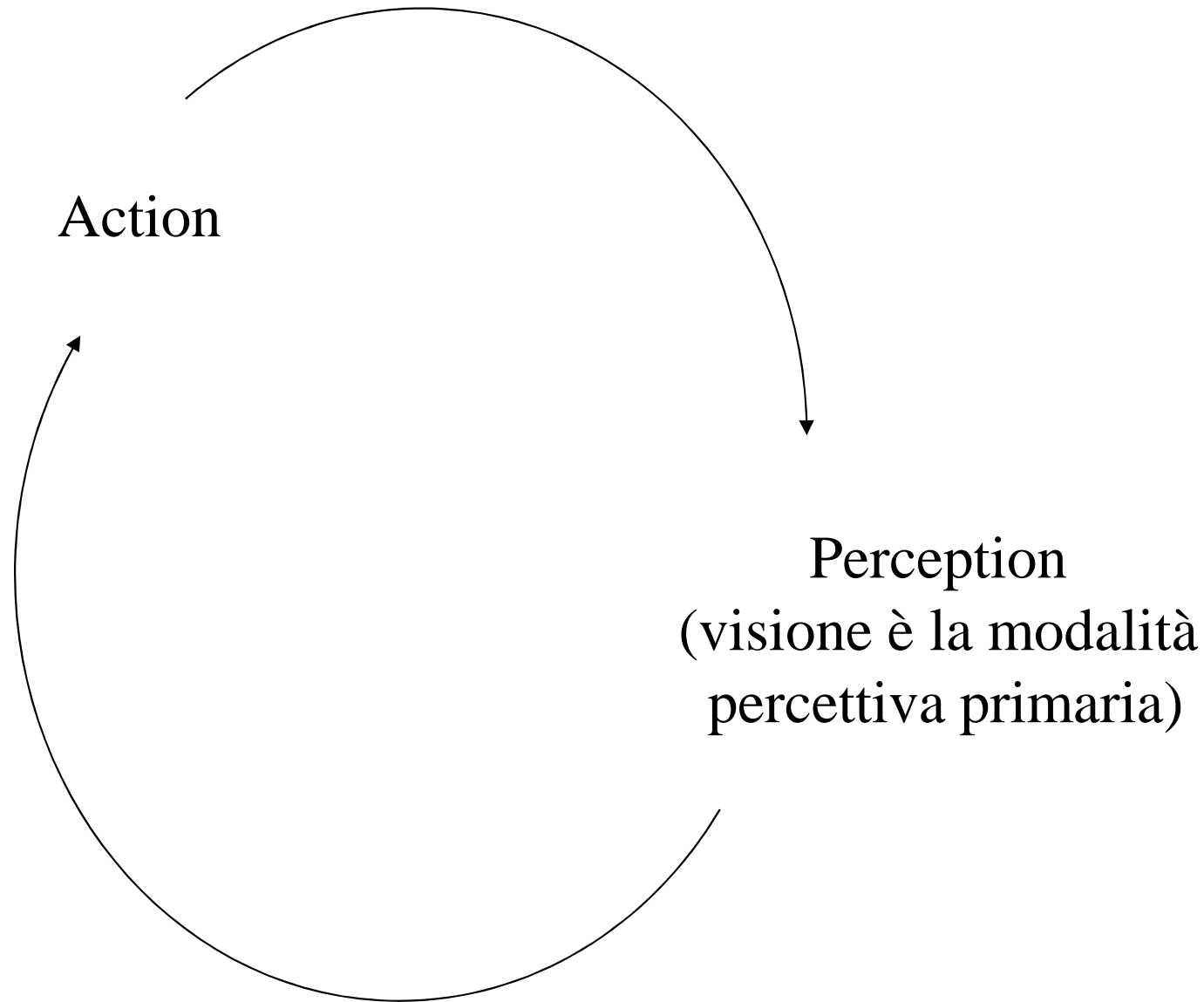
Le trasformazioni visuo-motorie

I mirror neurons

Il codice di popolazione come esempio di processing corticale



# Trasformazioni visuo-motorie

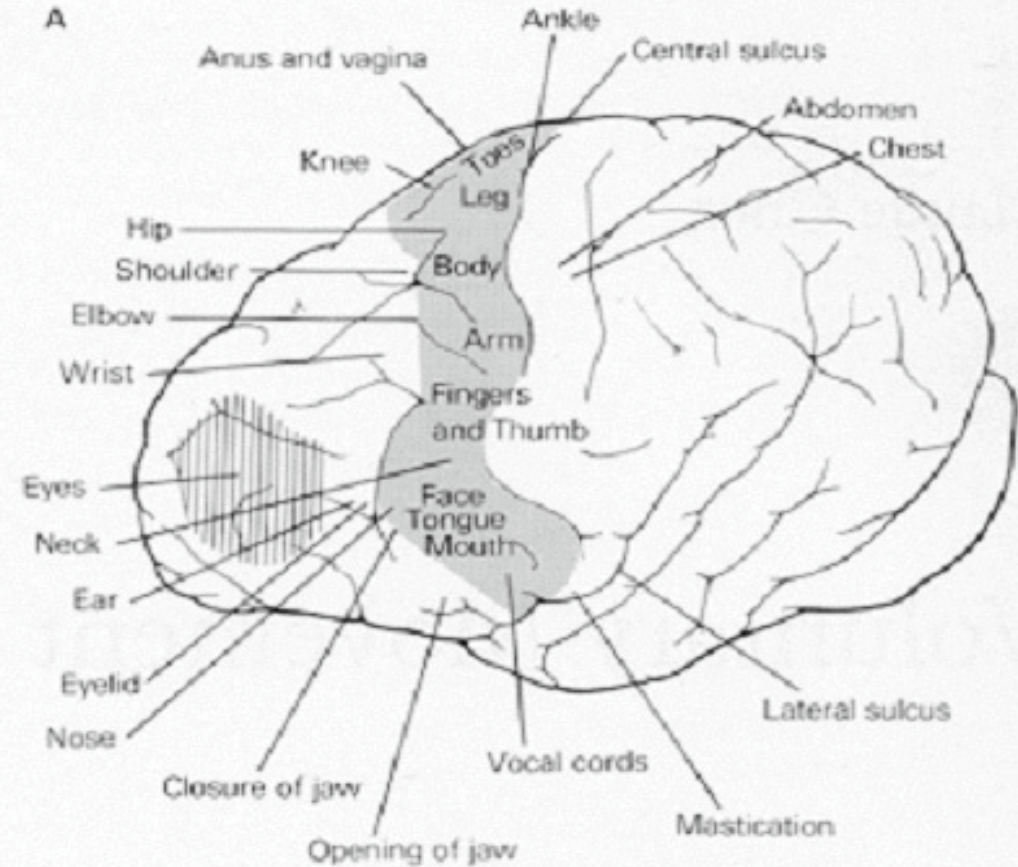


## Movimenti volontari.

Orientati ad un compito motorio (e.g. scrittura, prendere un bicchiere d'acqua...).

Caratterizzati da:

- Equivalenza motoria (D. Hebb).
- Miglioramento con l'apprendimento
- Non necessità di uno stimolo esterno per essere eseguiti.



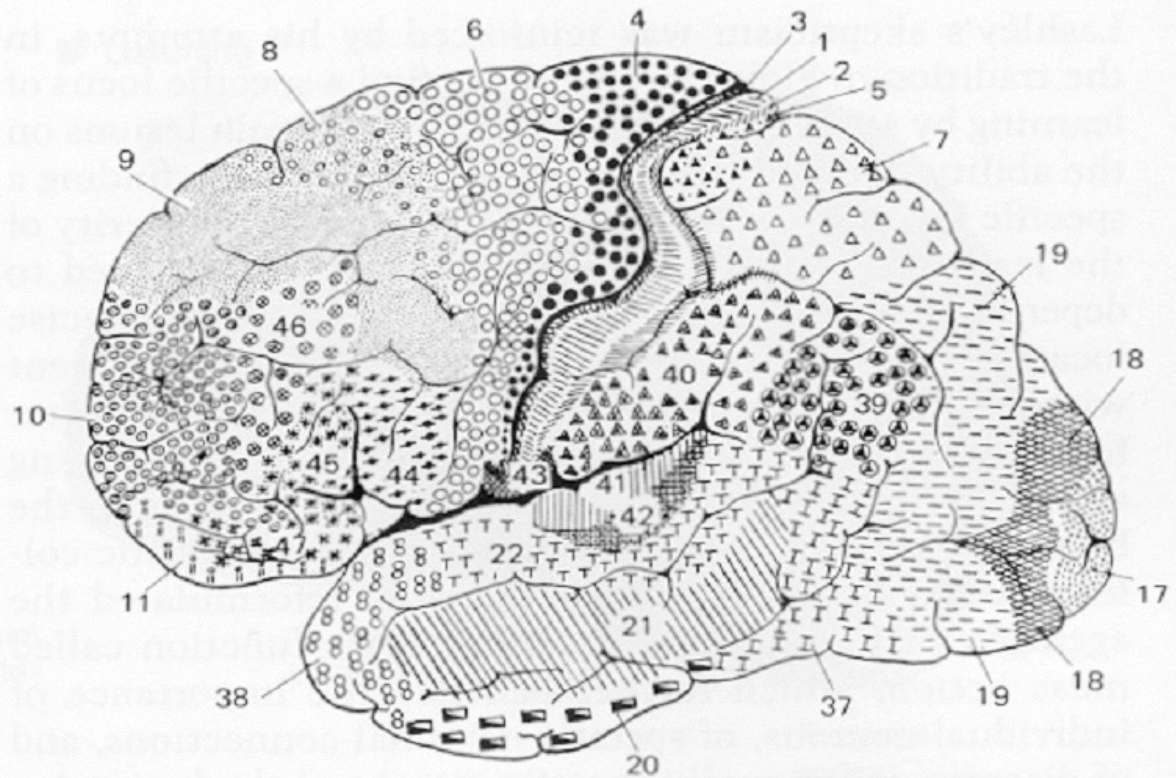




# Esecuzione dei movimenti volontari



1. Identificazione dell'obiettivo del movimento (e.g. riconoscimento di un bicchiere d'acqua e della sua posizione nello spazio 3D).
2. Pianificazione del movimento (e.g. definizione dei gradi di libertà che consentono di spostare la mano sul bicchiere - definizione del tipo di presa della mano e dei gradi di libertà relativi; coordinamento).
3. Esecuzione. Invio dei comandi motori adeguati ai centri del brain stem e da lì al midollo spinale.

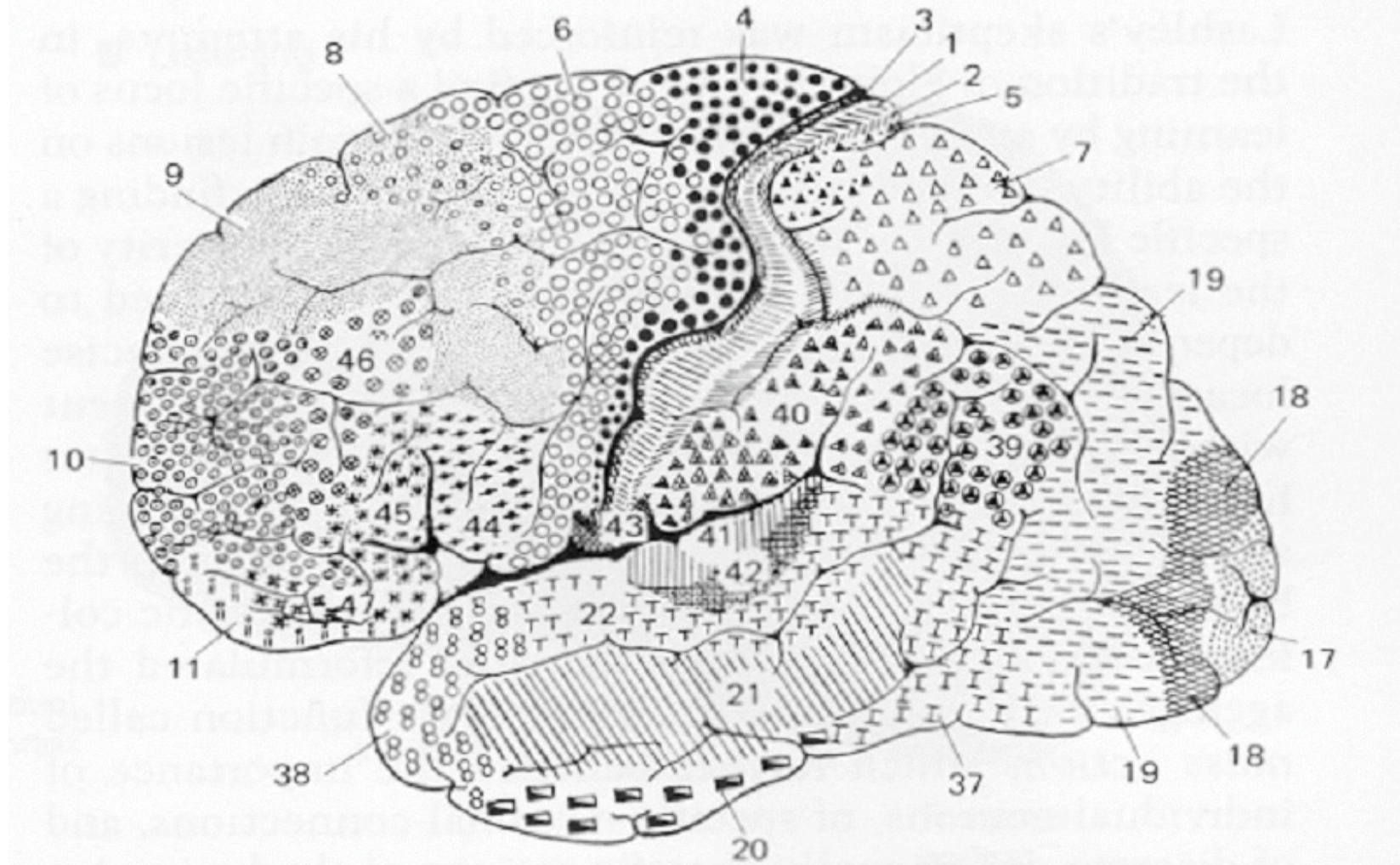


Le aree principalmente coinvolte sono: l'area parietale posteriore (area 5, 7, 39, 40), l'area premotoria (area 6), e l'area motoria (area 4).

Oltre alle aree visive 17, 18, 19, 37.

# Corteccia posteriore parietale

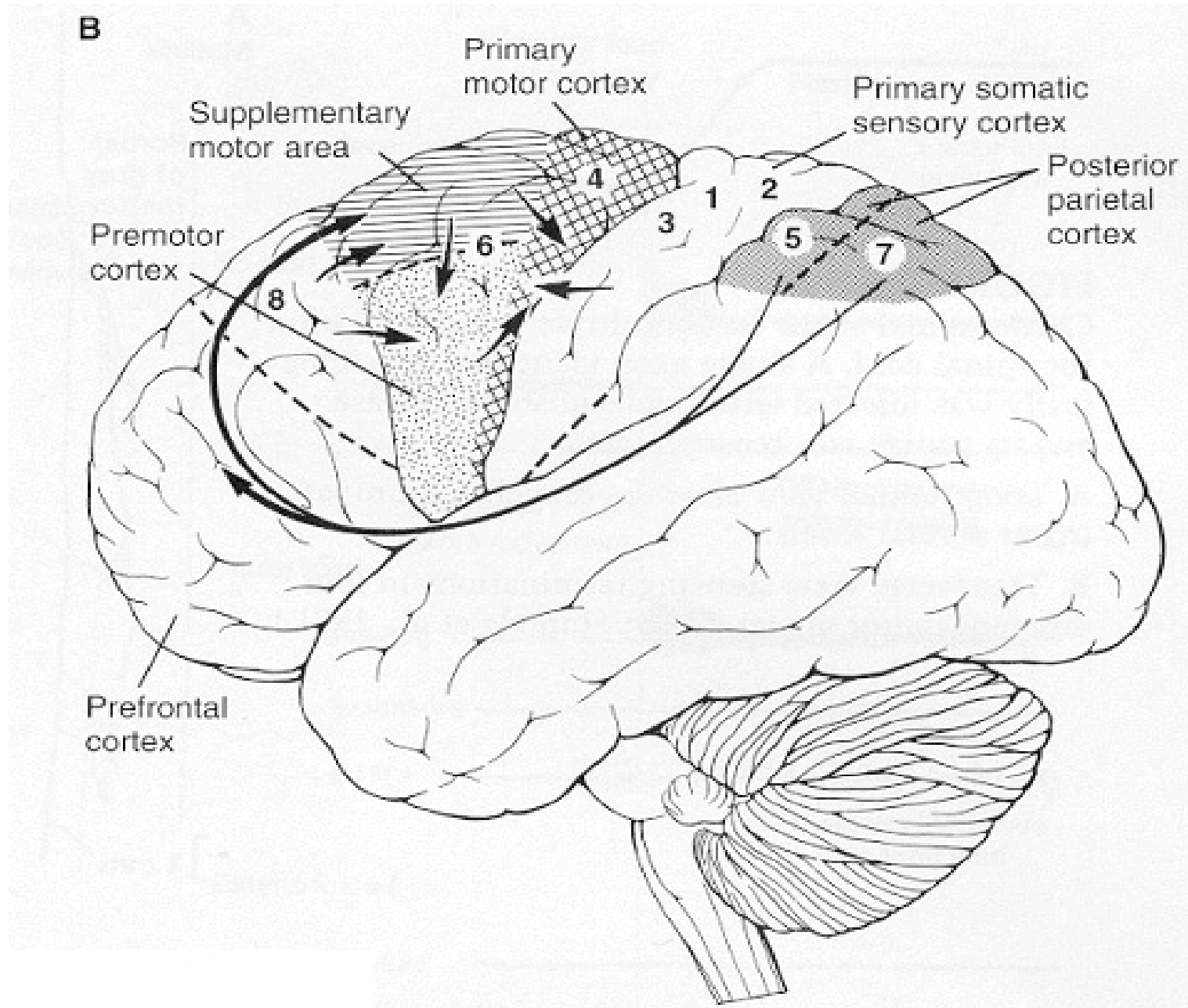
Mette in relazione la posizione di uno stimolo con la posizione del corpo e dei suoi segmenti.



Are 5, 7, 39 (supramarginal gyrus) e 40 (angular gyrus).



# Le aree motorie



# Output delle aree motorie

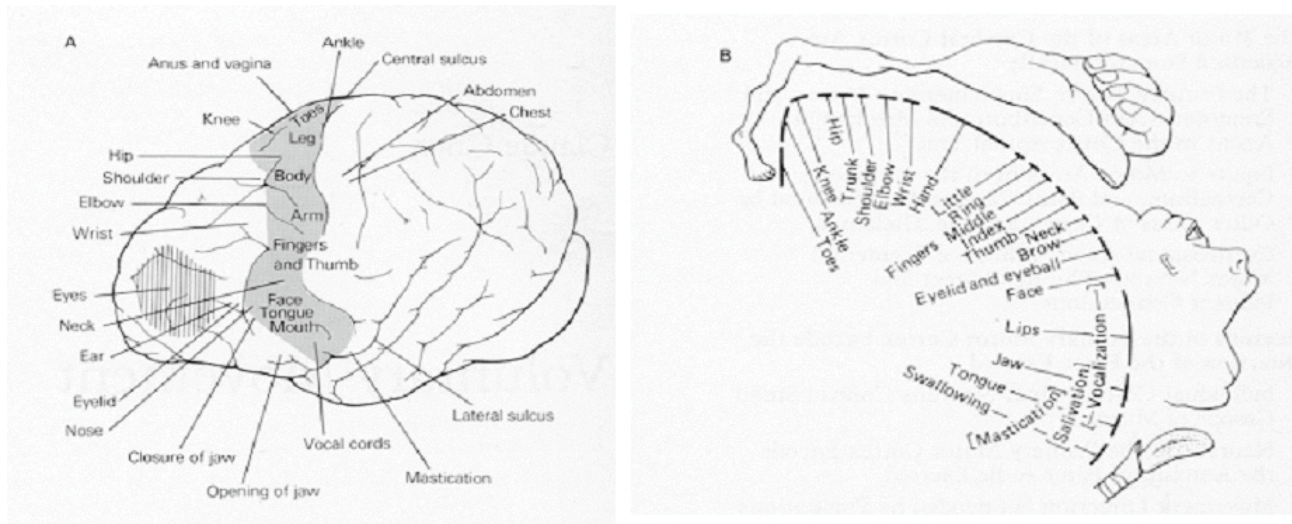
Muscoli diversi hanno regioni di attivazione diverse.

Alcuni muscoli (soprattutto i distali) hanno loci di attivazione multipli.

Pathways multipli:

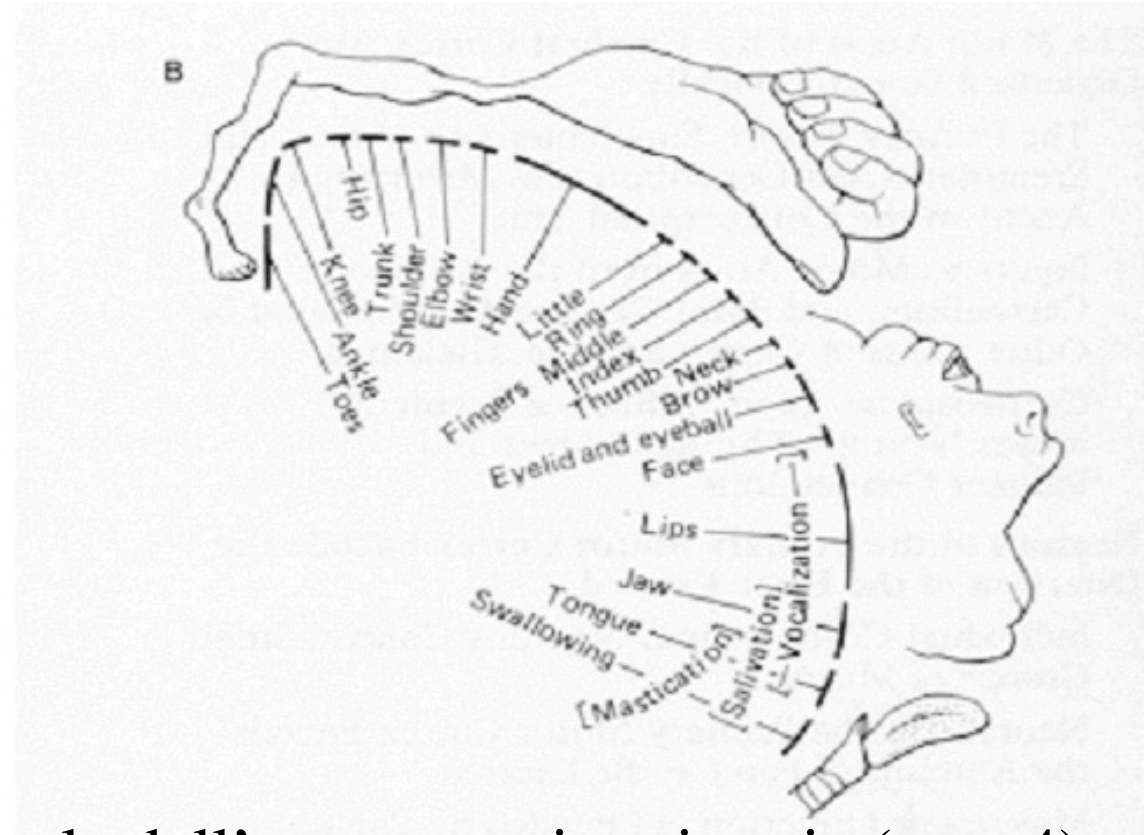
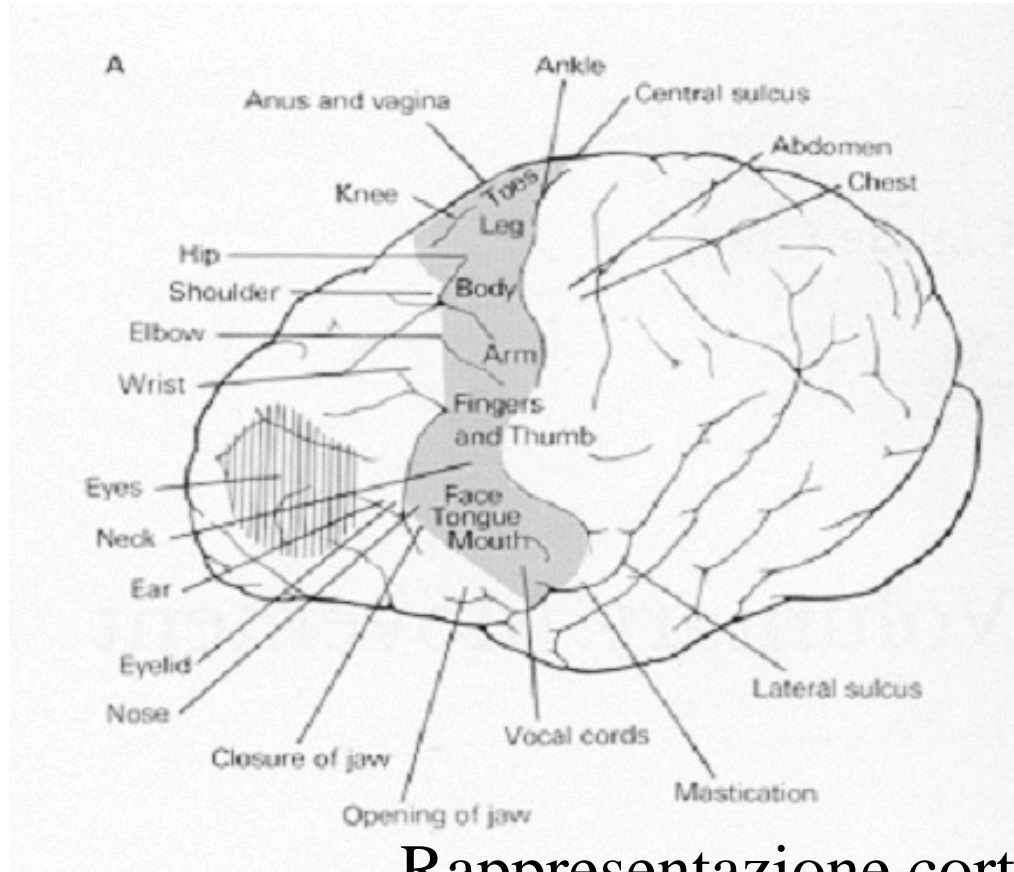
- Proiezioni sul brain stem.
- Proiezione sugli interneuroni della spina dorsale.

Attivazione di gruppi di muscoli (divergenza nelle proiezioni).





# Le mappe corticali: l'Homunculus (Penfield, 1950)



Rappresentazione corticale dell'area motoria primaria (area 4).

Mappa <- “*Mapping*”: trasformazione che mantiene nell'output la contiguità tra gli input. Cosa richiama?

Cf. Mappe di Kohonen.



# Pazienti neurologici (ictus)



- Lesioni della corteccia parietale superiore provocano atassia ottica. Tuttavia sono in grado di raggiungere oggetti mediante tatto e sono in grado di vederli. Non sono in grado di orientare e dare una forma adatta alla mano anche se sanno come deve essere orientata e che forma debba avere.
- Lesioni alla corteccia ventro-laterale occipitale sono speculari: riescono a prendere gli oggetti ma non riescono a catalogarli: non li «vedono». Agnosia percettiva. Non riconoscono alla vista neppure i parenti stretti, ma riconoscono le loro voci.

# Trasformazioni visuo-motorie

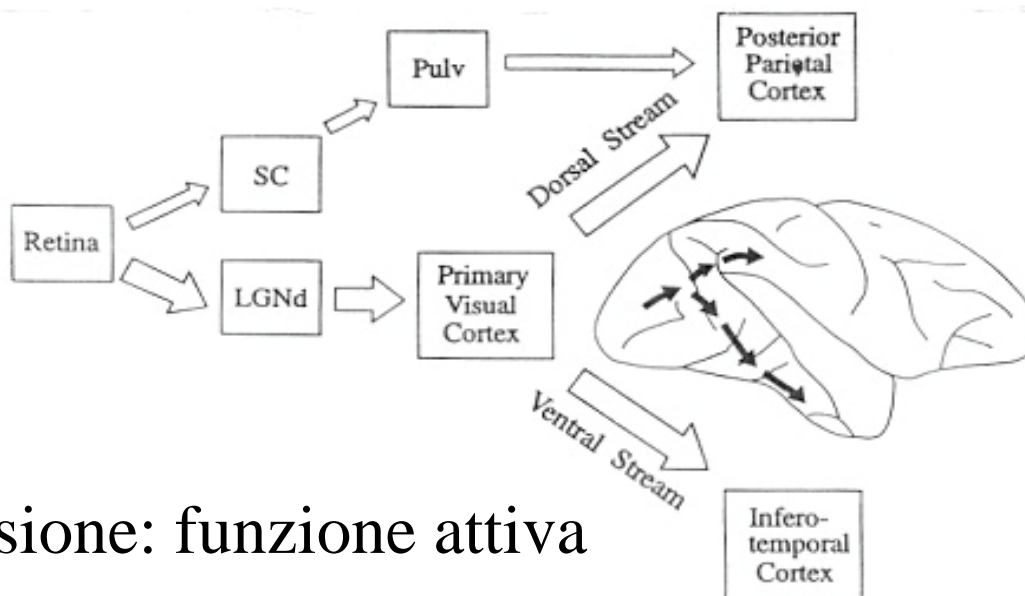
I nostri occhi sono la finestra sul mondo.

Visione per percezione (“what”).

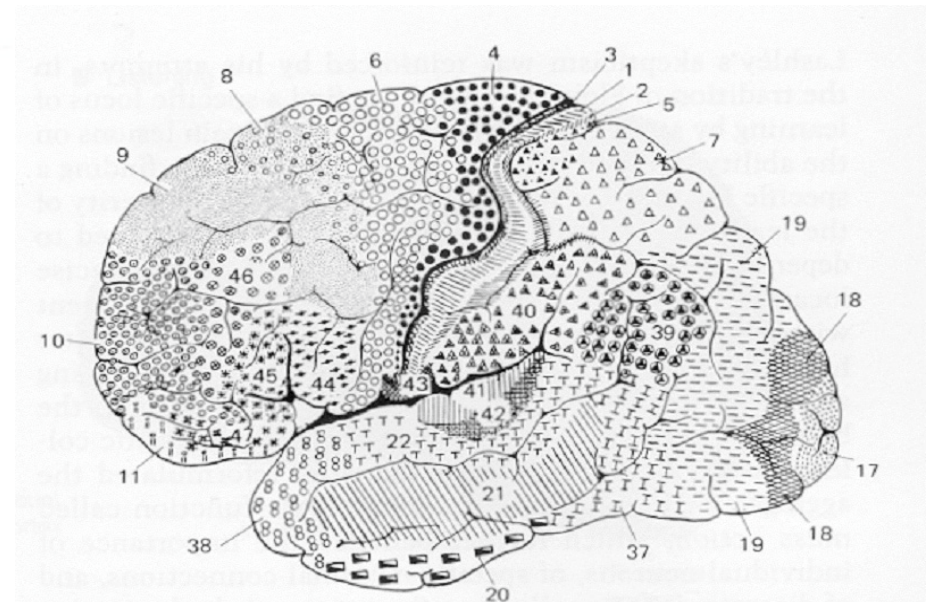
Visione per azione (“where”).

Questi circuiti occupano la gran parte del volume del SNC.

Hanno due substrati neurali diversi: sono due network distinti.



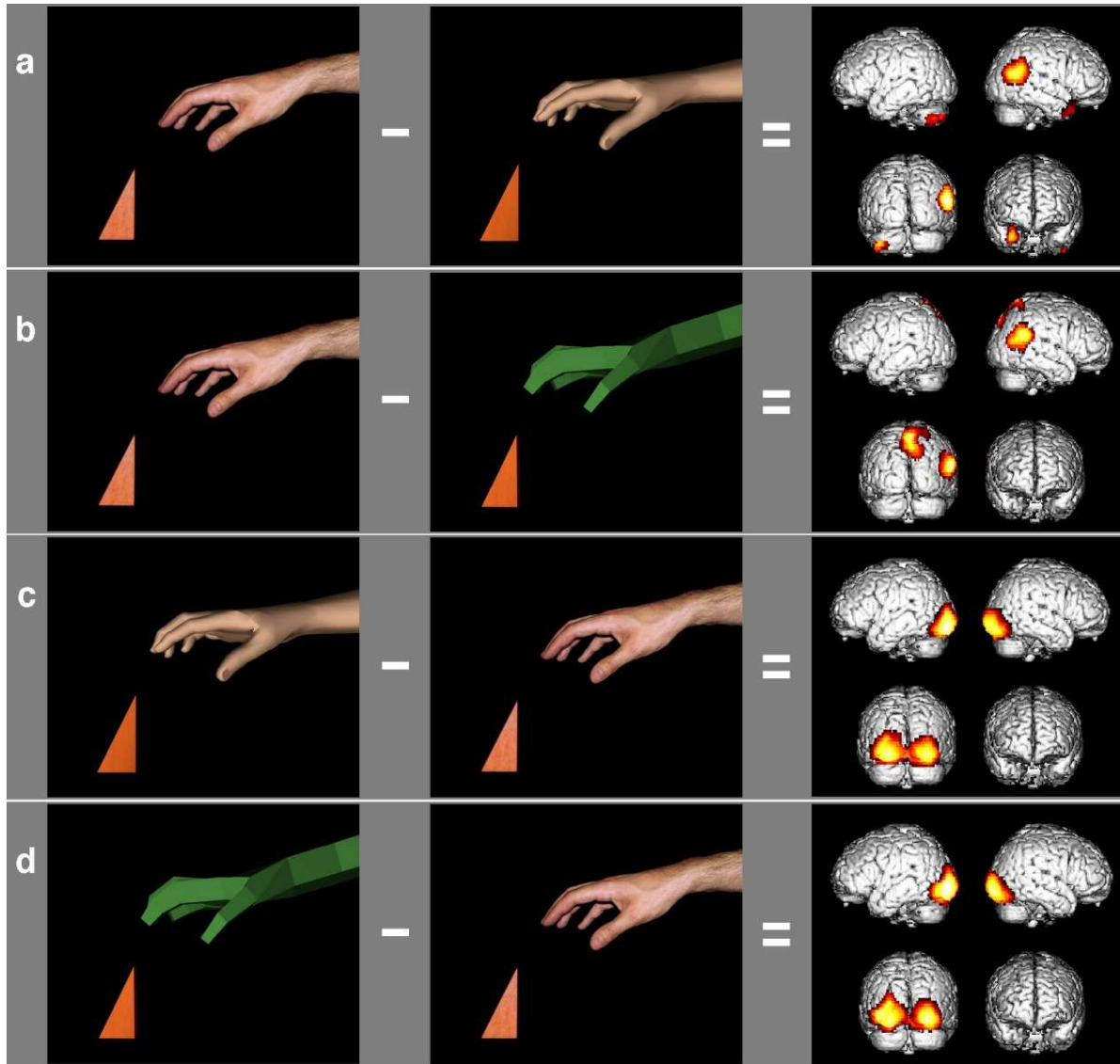
Visione: funzione attiva







# How real is virtual reality? Impact of New Technology



Viewing a grasp with a real hand, with a low-quality hand (green) and with a medium quality hand (upper right) in a Virtual Reality environment.

*How real is Virtual Reality?*

Not much at least at this level of virtualization.

This has been evaluated by comparing the brain circuits that are activated in the different conditions (through PET measurements – Perani et al, Neuroimaging, 2001).





# Riassunto



Circuiti che concatenano aree diverse.

Rappresentazione di movimenti a livello sempre più astratto, fino alla rappresentazione del movimento per sé (mirror neurons).

Circuito visuo-motorio (fornisce informazioni adatte all'esecuzione del movimento).

Circuito visuo-cognitivo (fornisce informazioni adatte all'apprendimento cognitivo).

“Deep learning” studiato nel machine learning è ispirato a queste osservazioni.

Il linguaggio ha una componente motoria ed una componente sensoriale. Viene rappresentato apparentemente in aree frontali.



# Sommario



Struttura del Sistema Nervoso Centrale

Il linguaggio

Le trasformazioni visuo-motorie

**I mirror neurons**

Esempio di processing corticale



# Dalla neuro-anatomia alla funzione



*Connessionismo cellulare* (K. Wernicke and R. Cajal, fine 1800)

- I neuroni sono connessi tra loro in gruppi funzionali.
- Le connessioni sono in numero definito.
- Gruppi funzionali diversi danno origine a funzioni intellettive diverse.

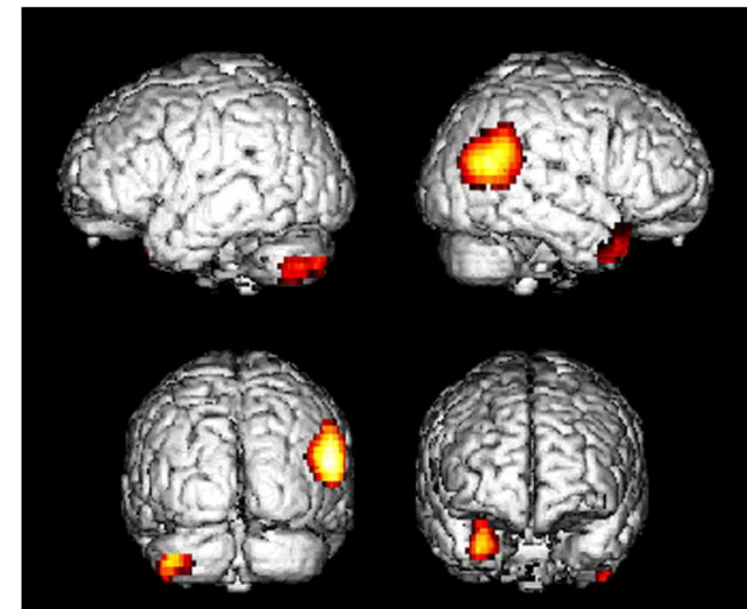
Quest'ultima e' la teoria moderna delle funzioni cognitive cerebrali.

## **Circuiti neurali.**

Ciascun circuito assembla aree che svolgono operazioni elementari e che possono lavorare in parallelo (**Parallel Distributed Processing**).

Neuroni afferenti sensoriali, neuroni efferenti motori ed interneuroni.

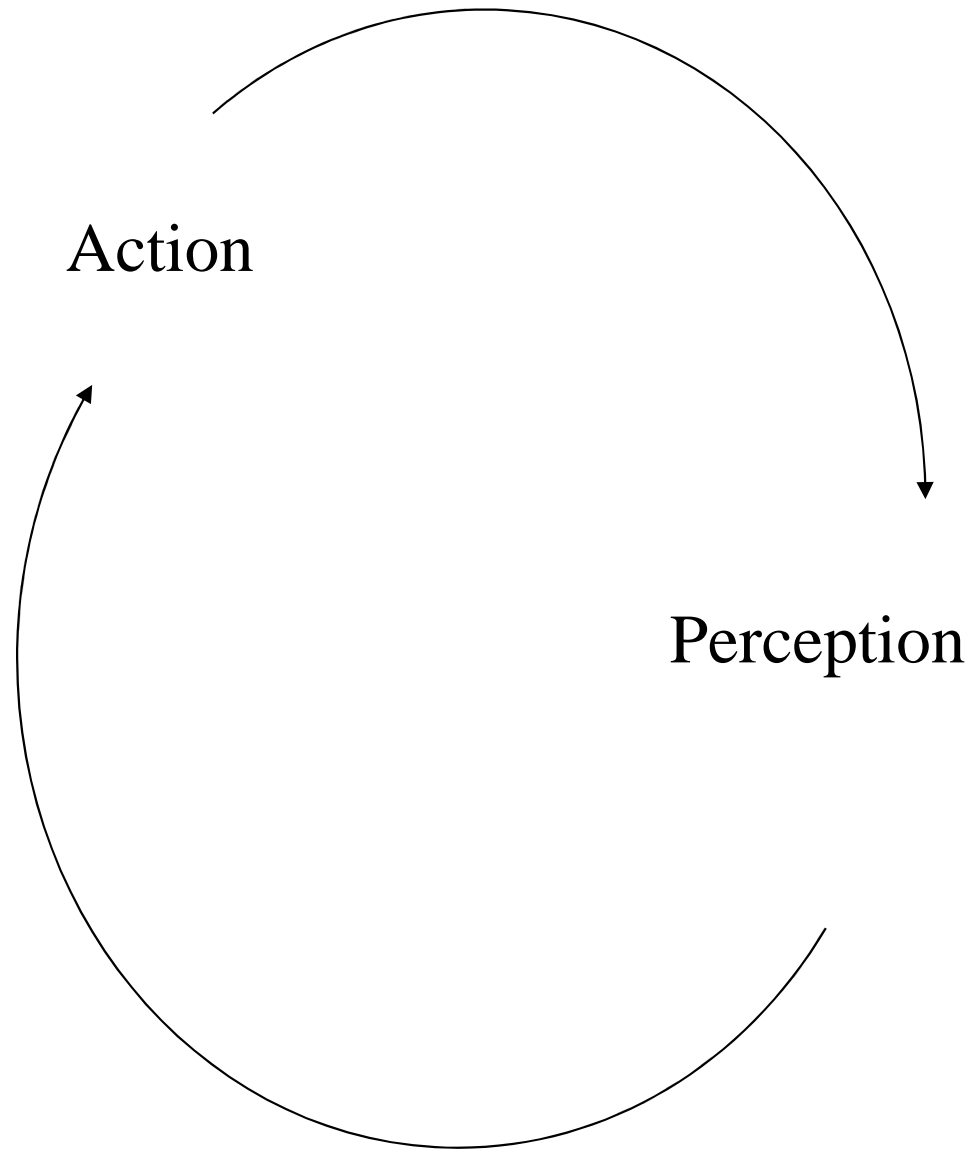
**Dall'anatomia alla funzione.**







# Piaget 1955



Circular reaction for learning in Humans.

Gestalt percettiva-esecutiva.

Rinforzo tra il dominio percettivo ed esecutivo.

“Apparato visuo-motorio” è di gran lunga il più importante del sistema nervoso centrale.

Apprendimento da esempi.



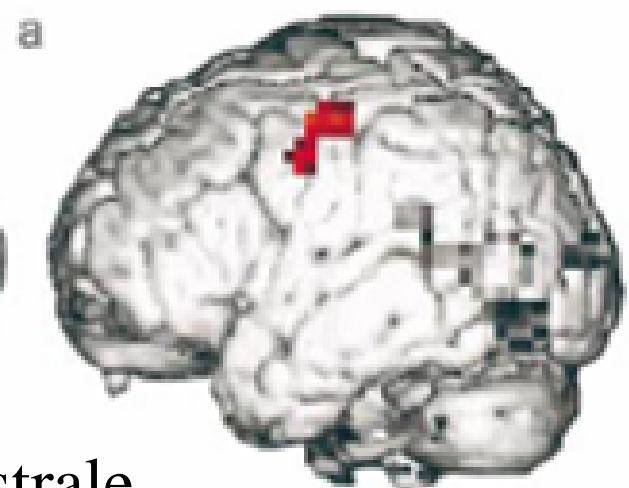
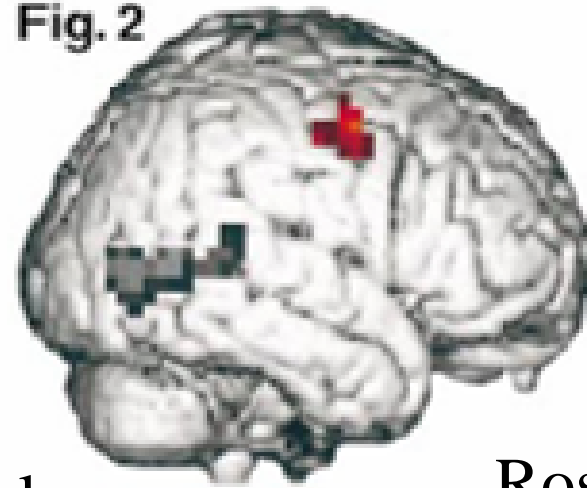
# Mirror neurons and circuits



Are prefrontal, active sia nell'osservazione che nell'immaginazione che nell'esecuzione di movimenti.

Lo sperimentatore muove le mani senza oggetto.

Fig. 2



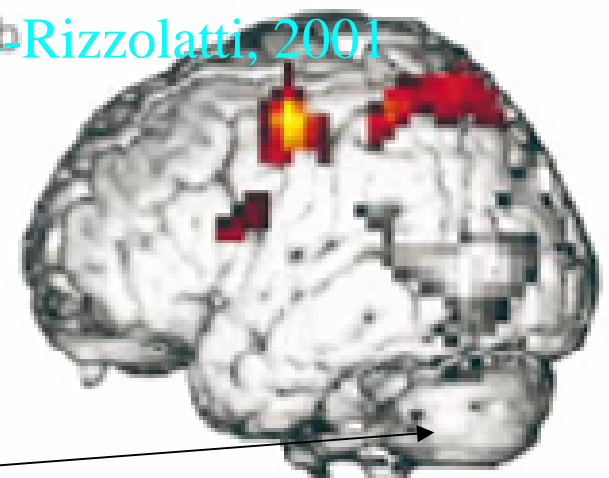
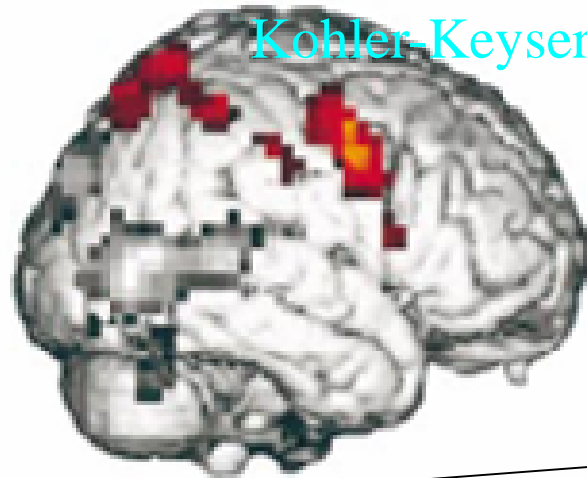
Caudale

Rostrale

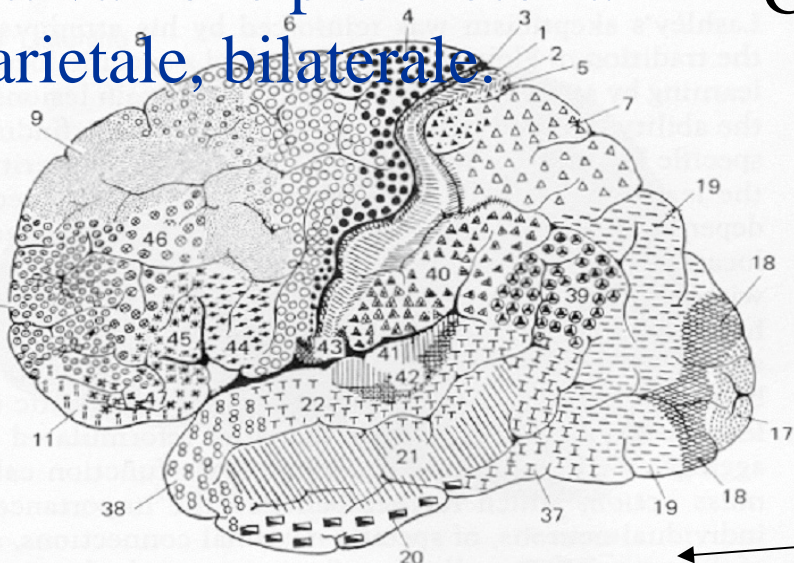
Attivazione pre-motoria.

Attivazione pre-motoria + parietale, bilaterale.

Kohler-Keysers-Rizzolatti, 2001



Lo sperimentatore muove le mani con oggetto.





# Hebbian learning



- The increase in synaptic efficacy arises from the presynaptic cell's repeated and persistent stimulation of the postsynaptic cell. **Joint firing increases the synapse:** *“Cells that fire together, wire together”*.
- From the point of view of artificial neurons and artificial neural networks, Hebb's principle can be described as a method of determining how to alter the weights between model neurons. The weight between two neurons increases if the two neurons activate simultaneously—and reduces if they activate separately. Nodes that tend to be either both positive or both negative at the same time have strong positive weights, while those that tend to be opposite have strong negative weights:  $\Delta w_{ij} = k x_i y_j$ .
- At the heart of learning in mirror neurons.

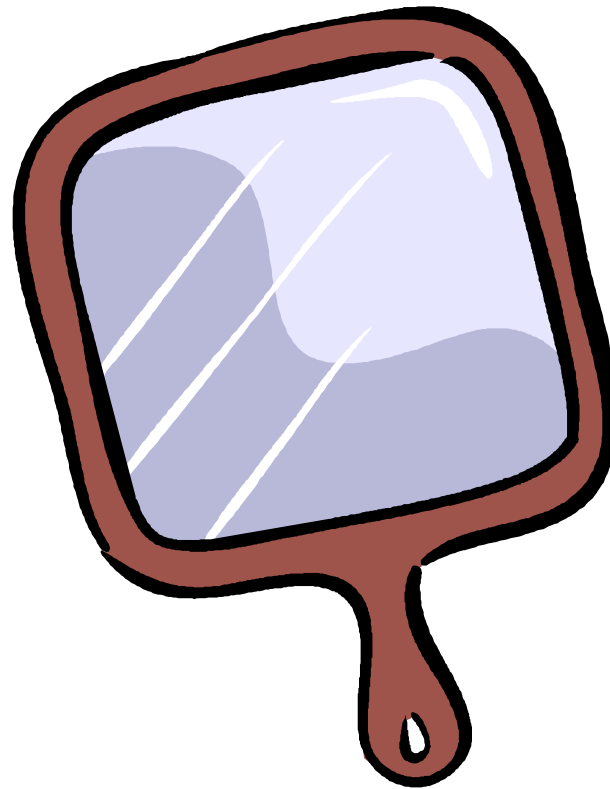




# Mirror neurons - neuroni specchio



<http://www.youtube.com/watch?v=O3-wegp1ovM>  
I Neuroni specchio

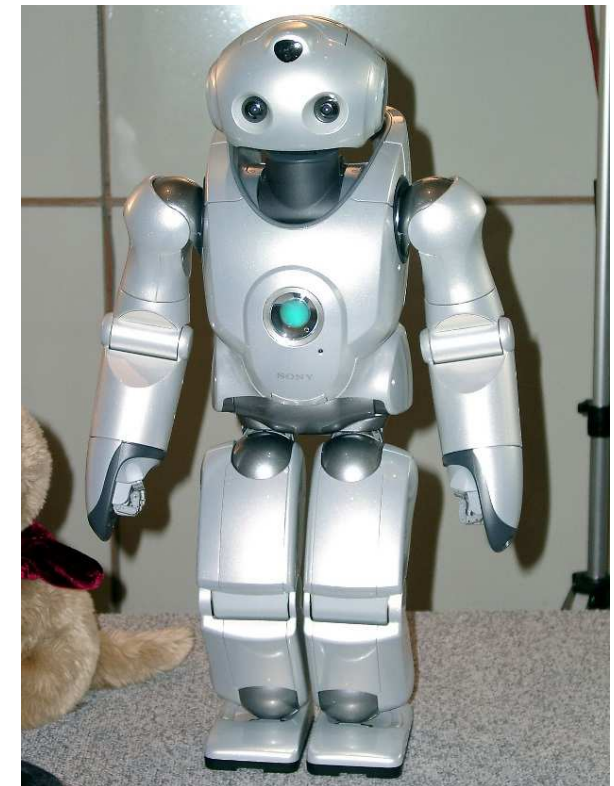




# Social robotics



«Per definizione un robot sociale dovrebbe comunicare ed interagire con gli umani o con altri esseri viventi in situazioni che possono essere definite cooperative. Ma anche comportamenti non cooperativi possono essere considerati sociali in alcune situazioni. Il robot può, ad esempio, esibire un comportamento competitivo all'interno del contesto di un gioco. Il robot potrebbe anche interagire, in alcuni casi con nessuna o con una minima comunicazione. Potrebbe ad esempio consegnare strumenti ad un astronauta che lavori su una stazione spaziale» (Wikipedia).



Video on Qrio dancing salsa



# Sommario



Struttura del Sistema Nervoso Centrale

Il linguaggio

Le trasformazioni visuo-motorie

I mirror neurons

Esempio di processing corticale





# Indagine Sperimentale (Georgopoulos et al.)



Registrazione da cellule corticali durante un task motorio di trasporto del braccio che comporti flessione ed estensione dei due segmenti del braccio.

Studio della correlazione tra frequenza di scarico ed i parametri che caratterizzano il task motorio.

Identificazione della “funzione”, della “trasformazione” operata dalle cellule corticali (area 4, motoria).



# Studio dell'attività nella corteccia motoria



9 pulsanti e luci disposte su una griglia orizzontale.

Accensione di una luce centrale e spostamento verso una delle altre luci per ottenere la ricompensa.

Registrazione dell'attività elettrica di neuroni singoli (frequenza di scarica).

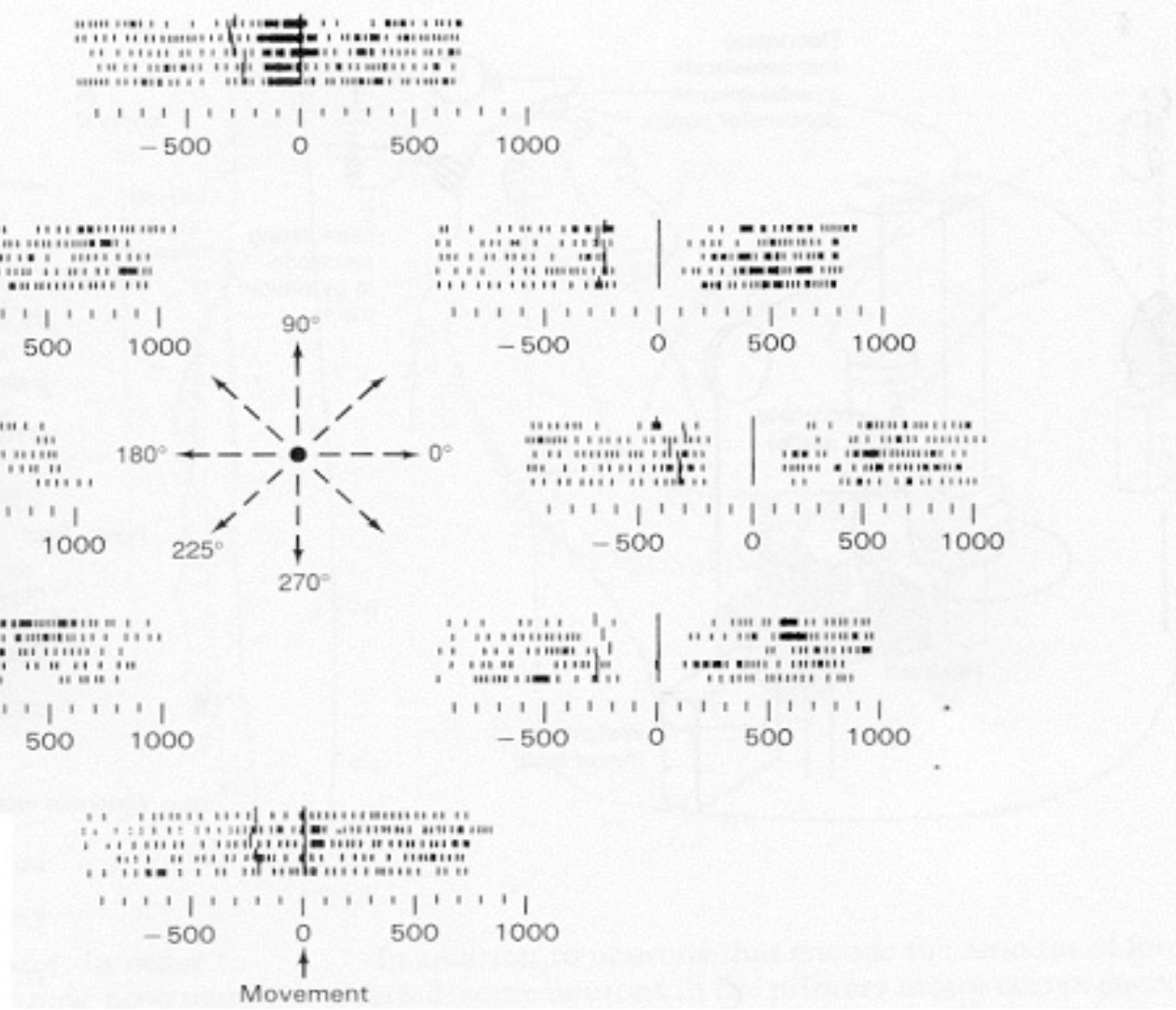
Direzione del movimento (spostamento del polso) e flessione / estensione (di braccio ed avambraccio) sono disaccoppiate.



# Direzione preferenziale (esperimenti di Georgopoulos)



Cellula con attività massima nel range da 90 a 225 gradi (la direzione è determinata in uno spazio estrinseco, quello del piano contenente gli stimoli).





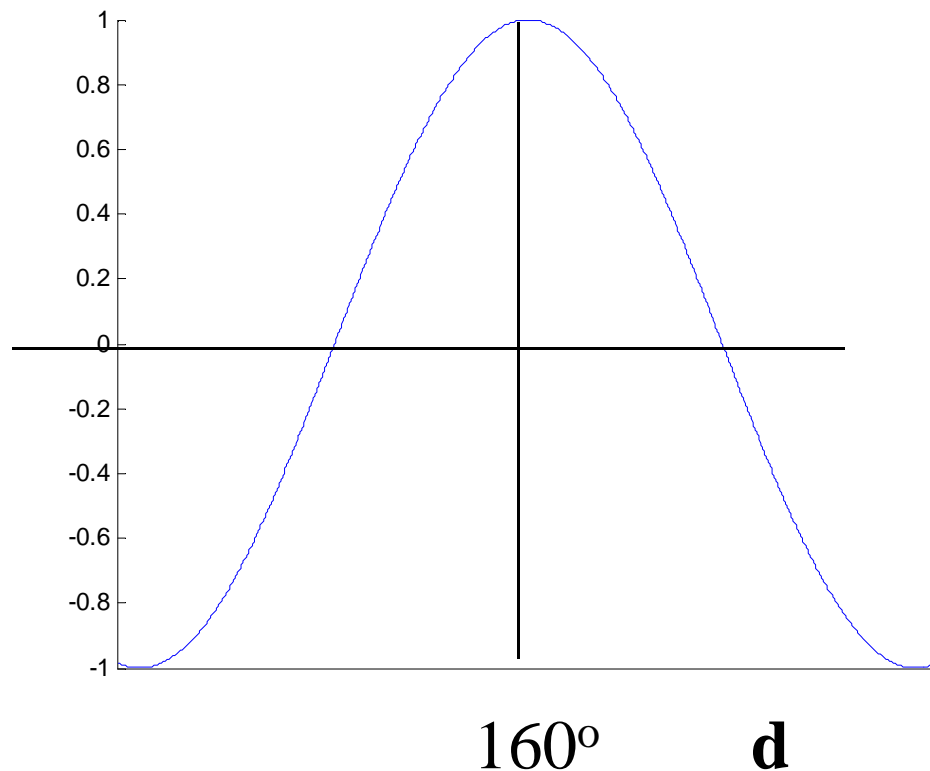


# Modellazione della frequenza di scarica

L'attività, frequenza di scarica,  $f$ , di un neurone è massima lungo la sua direzione preferenziale.

*Tuning con forma cosinusoidale, (cosa ricorda?).*

$f(\mathbf{d})$   
frequenza  
di scarica



$\mathbf{d}$  può essere misurata mediante angolo sul piano formato dal vettore spostamento rispetto all'orizzontale.



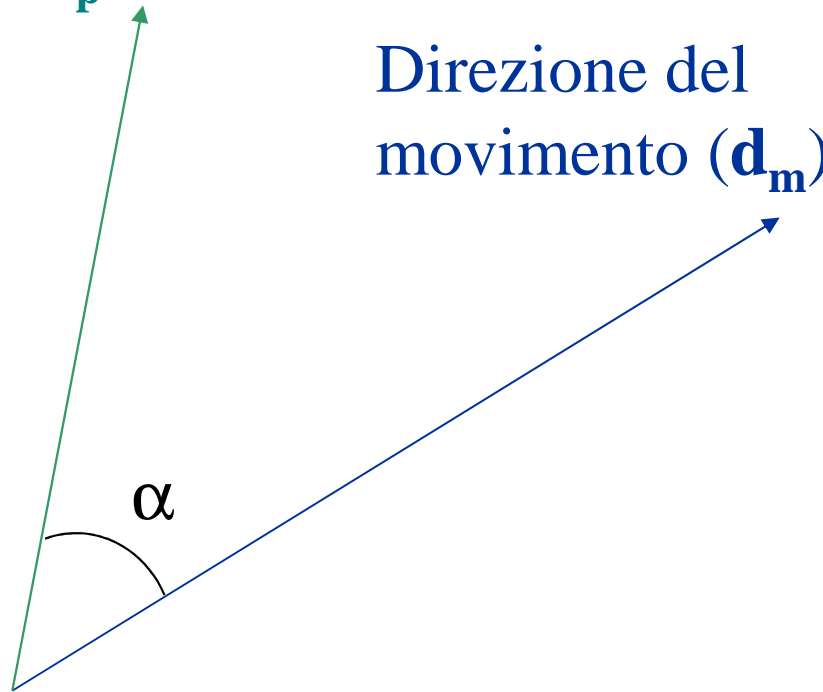
# Attività del singolo neurone



Direzione preferita del neurone ( $\mathbf{d}_p$ )

Direzione del movimento ( $\mathbf{d}_m$ )

$$f = \mathbf{d}_p \cdot \mathbf{d}_m$$



L'attività,  $f$ , di un neurone è massima lungo la sua direzione preferenziale.

*Tuning con forma cosinusoidale, (cosa ricorda?).*

L'attività del neurone decresce con l'allontanarsi della direzione del movimento dalla sua direzione “preferita”.

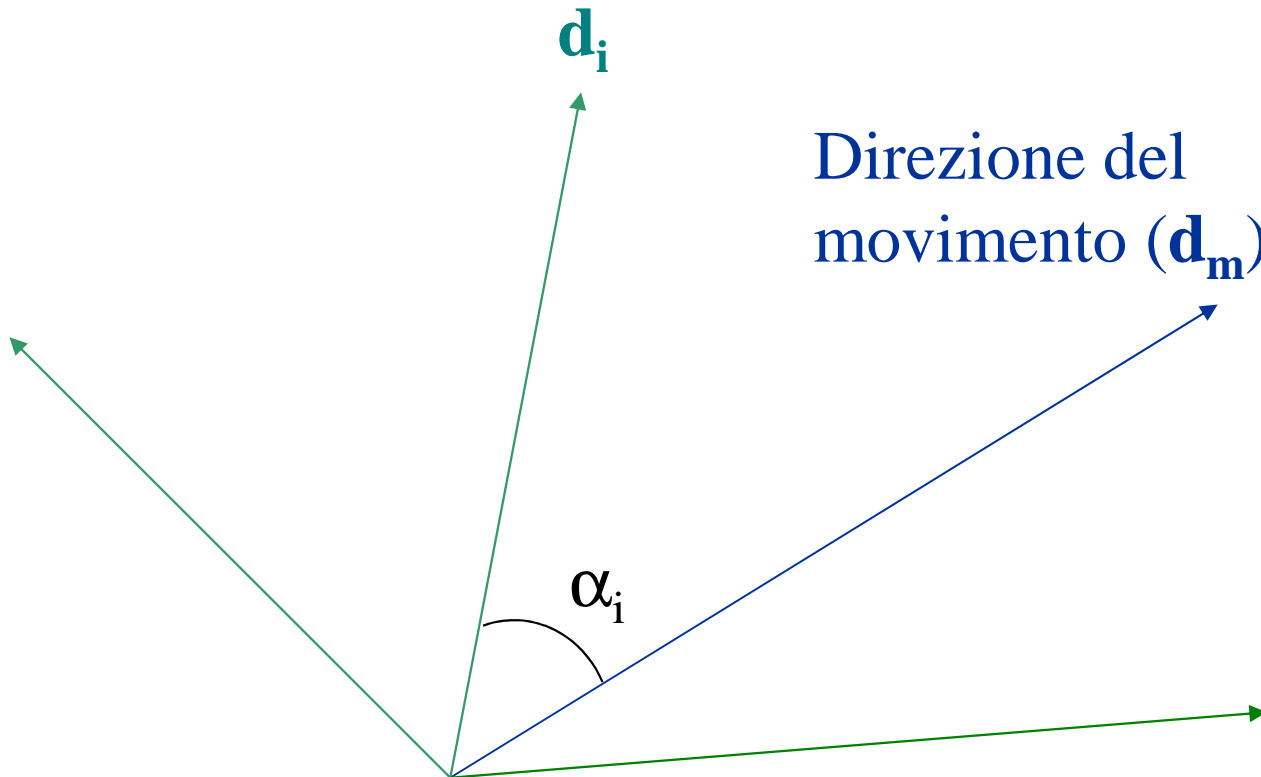


# Attività di una popolazione di neuroni



Misura di “efficacia” dell’attivazione in relazione alla direzione di movimento  $\mathbf{d}_m$ :

$$E_m = \sum_i d_i \cdot \mathbf{d}_m$$



Come può un sistema capire in quale direzione deve muoversi a partire dall’attività della popolazione?





# Somma pesata dell'attività



$d_i$  rappresenta l'attività del neurone  $i$ -esimo per il movimento nella sua direzione preferenziale.

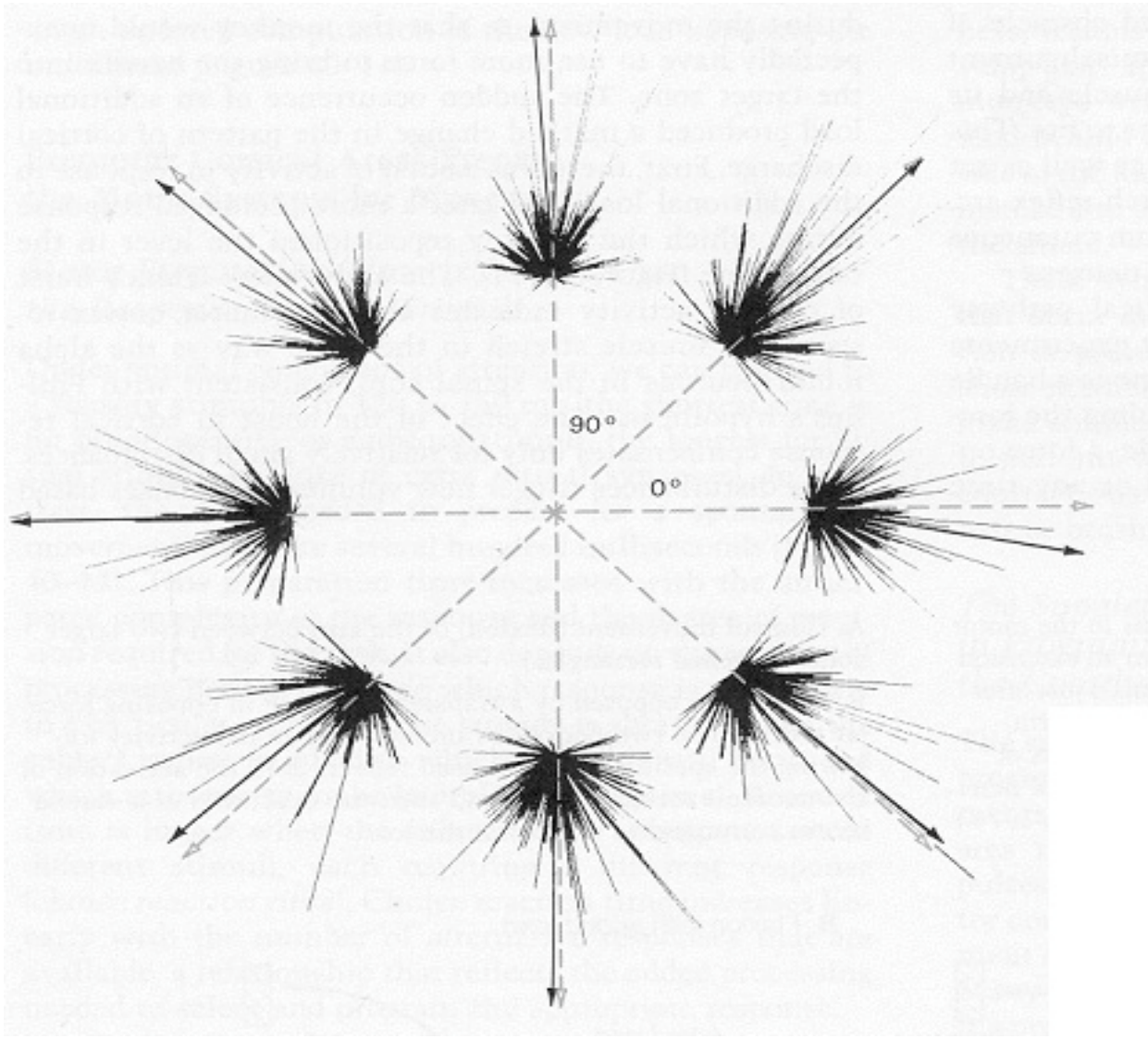
Questa attività sarà massima quando la direzione del movimento,  $d_m$ , è allineata alla direzione preferita del neurone, per decrescere allo spostamento radiale.

Quindi?

Otengo la direzione di movimento come somma pesata dei vettori di direzione preferenziale. 
$$d_m = \sum_i d_i \cos \alpha_i$$

L'uscita della popolazione è multipla, ciascuna sintonizzata su una  $d_m$  diversa.

# Codice di popolazione nella corteccia motoria



Ampiezza dell'attivazione lungo la direzione preferita di ciascun neurone.

La direzione del movimento è codificata dall'insieme dei neuroni, non dal neurone singolo!



# Osservazioni

Il codice di popolazione è robusto rispetto a guasti del singolo neurone.

La popolazione “ruota” con il ruotare della direzione del movimento.

Siti multipli per gradi di libertà distali (e.g. afferrare con due dita attiva aree diverse da quelle attivate per afferrare con il palmo).

Movimenti effettuati sotto l’impulso della collera, apparentemente non passano per l’area motoria.

Muscoli della faccia (mandibola) attivi quando un animale scatta per mordere, sono diversi da quelli che l’animale utilizza quotidianamente per mangiare.





# Sommario



Struttura del Sistema Nervoso Centrale

Il linguaggio

Le trasformazioni visuo-motorie

Esempio di processing corticale

I mirror neurons