

# L'intelligenza biologica Computazione nel sistema nervoso

Alberto Borghese  
Università degli Studi di Milano  
Laboratorio di Applied Intelligent Systems  
(AIS-Lab)  
Dipartimento di Scienze dell'Informazione  
[borgnese@dsi.unimi.it](mailto:borgnese@dsi.unimi.it)



A.A. 2007-2008

1/44

<http://homes.dsi.unimi.it/~borgnese>



## Sommario



### Struttura del Sistema Nervoso Centrale

Il linguaggio

Le trasformazioni visuo-motorie

Il codice di popolazione come esempio di processing corticale

A.A. 2007-2008

2/44

<http://homes.dsi.unimi.it/~borgnese>



## Computazione nel SNC



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

A.A. 2007-2008

3/44

<http://homes.dsi.unimi.it/~borgese>



## 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.

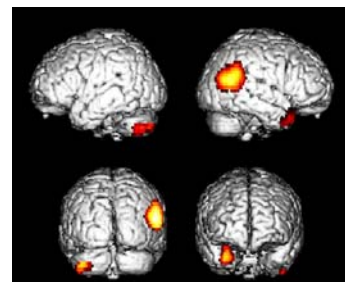
### **Circuiti neurali.**

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.

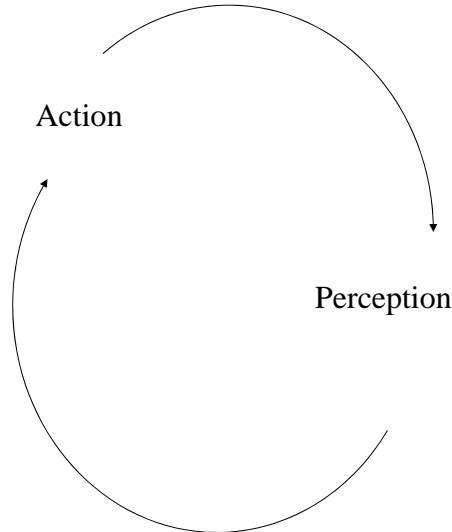
**Dall'anatomia alla funzione.**

4/44





## 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.

A.A. 2007-2008

5/44

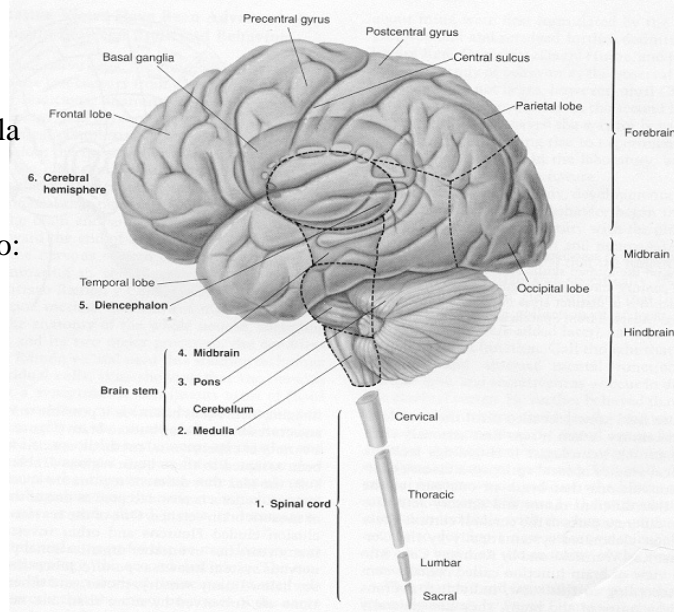
<http://homes.dsi.unimi.it/~borgnese>



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

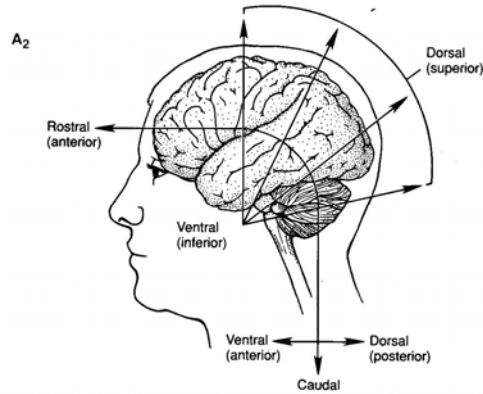
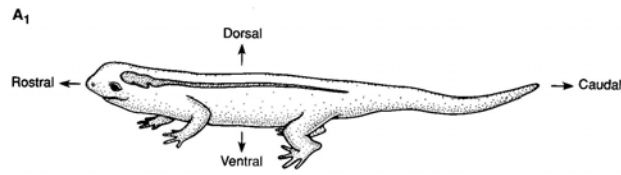
Sistema nervoso periferico:  
nervi e gangli; parte  
somatica ed autonoma.

*Parallel,  
Distributed  
processing.*



## Struttura del Sistema Nervoso

A.A. 2007-2008



## I punti cardinali del SNC

A.A. 2007-2008

res.dsi.unimi.it/~borgnese



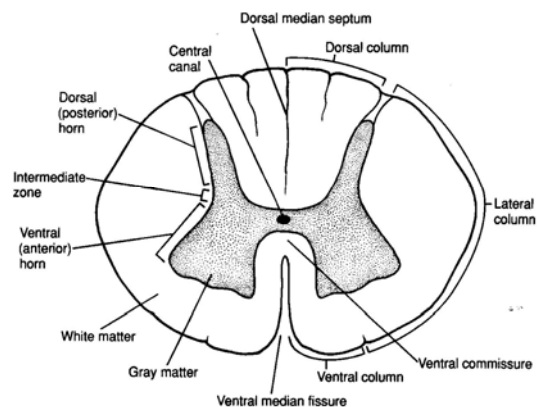
## La spina dorsale

*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).



A.A. 2007-2008

8/44

http://homes.dsi.unimi.it/~borgnese



## I 2 emisferi cerebrali

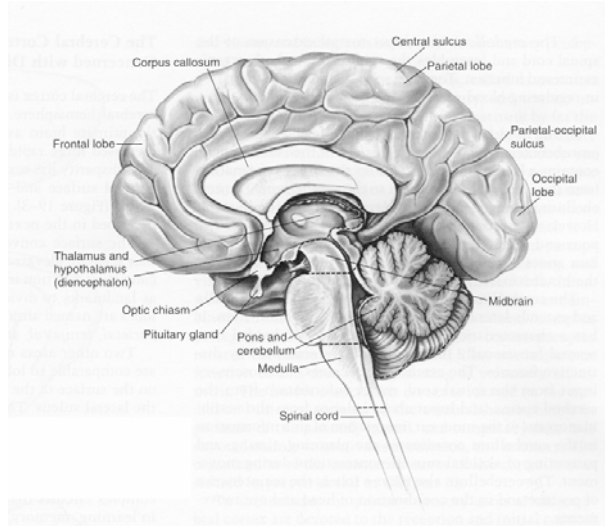


Emisferi simmetrici  
bilateralmente.

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.



A.A. 2007-2008

9/44

<http://homes.dsi.unimi.it/~borgnese>



## Le convoluzioni cerebrali.

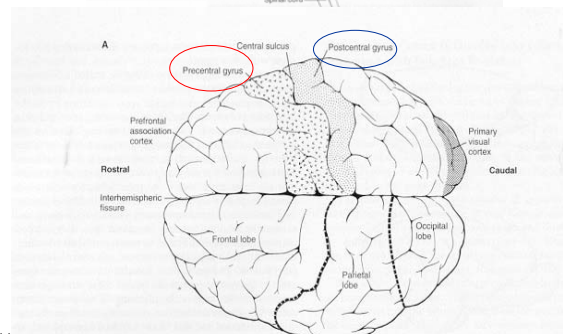
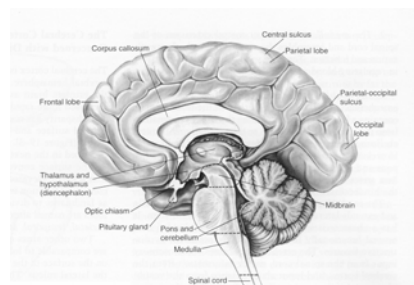


Struttura convoluta sotto la  
pressione dell'evoluzione.

Gyri e solci.

Alcuni solchi sono elementi di  
contrassegno.

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

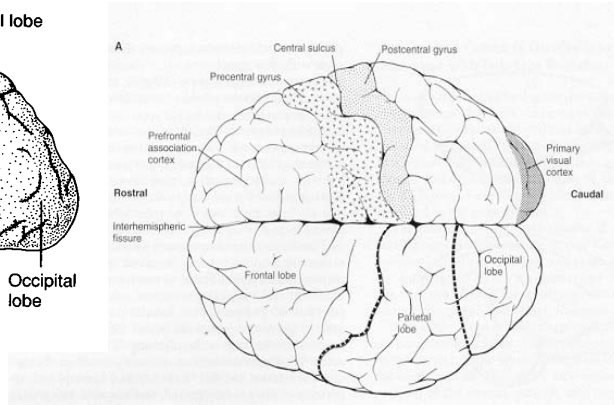
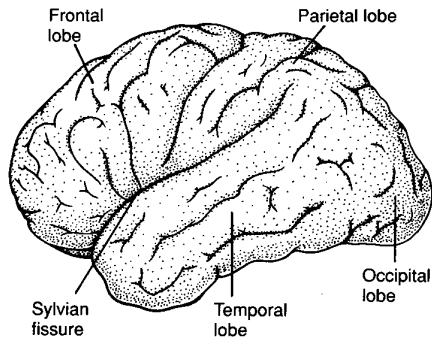


A.A. 2007-2008

10/44



# I lobi cerebrali



A.A. 2007-2008

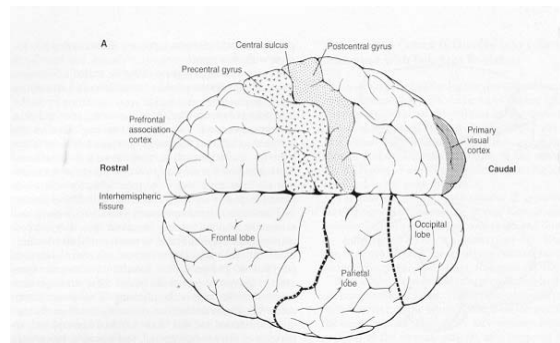
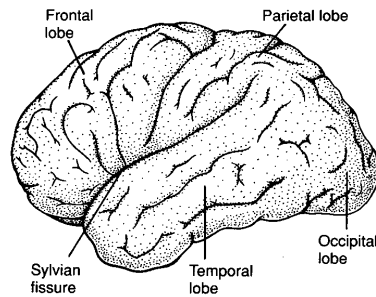
11/44

<http://homes.dsi.unimi.it/~borgnese>



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

D



I 4 lobi cerebrali classici

A.A. 2007-2008

12/44

<http://homes.dsi.unimi.it/~borgnese>



## 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.

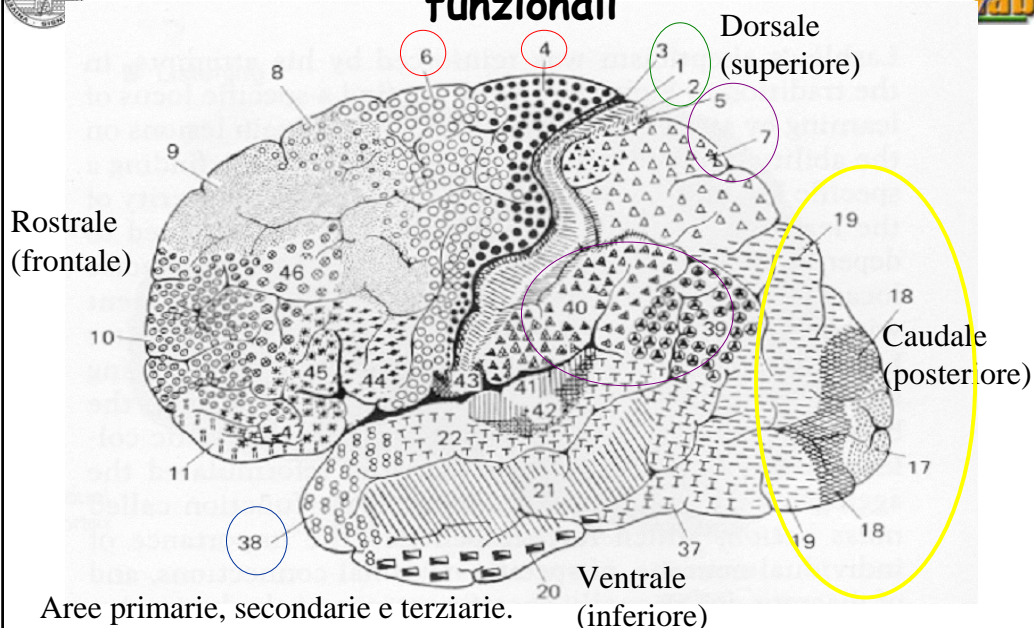
A.A. 2007-2008

13/44

<http://homes.dsi.unimi.it/~borgnese>



## Suddivisione cito-architetturale in aree funzionali



A.A. 2007-2008

14/44

<http://homes.dsi.unimi.it/~borgnese>

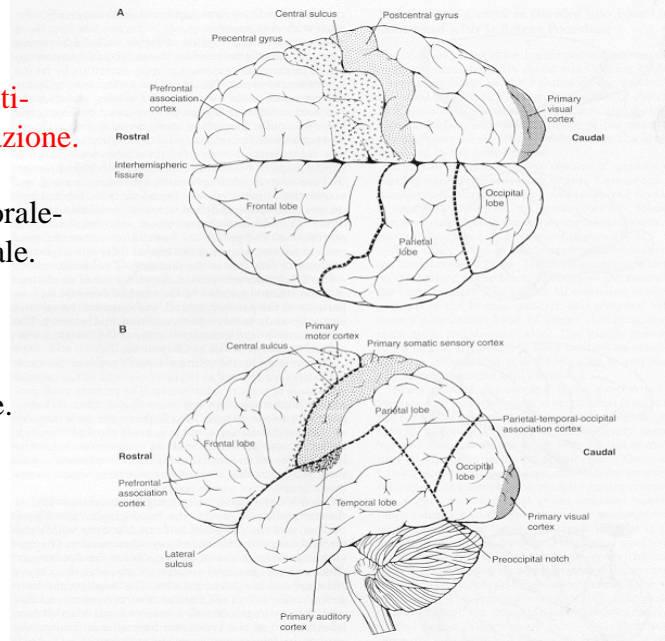


**Integrazione multi-sensoriale per l'azione.**

Giunzione temporale-parietale-occipitale.

Area limbica.

Area pre-frontale.



**Areae associative**



## Sommario



Struttura del Sistema Nervoso Centrale

**Il linguaggio**

Le trasformazioni visuo-motorie

Il codice di popolazione come esempio di processing corticale





## Linguaggio ed afasia



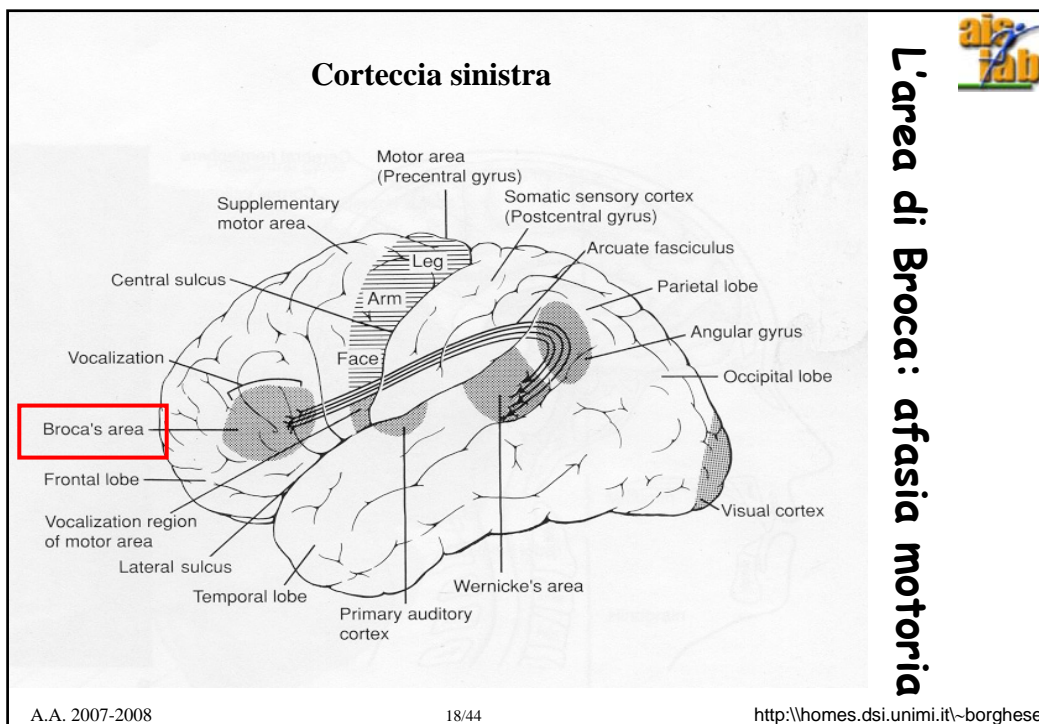
Afasia – genericamente, disordine del linguaggio.

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

A.A. 2007-2008

17/44

<http://homes.dsi.unimi.it/~borgese>



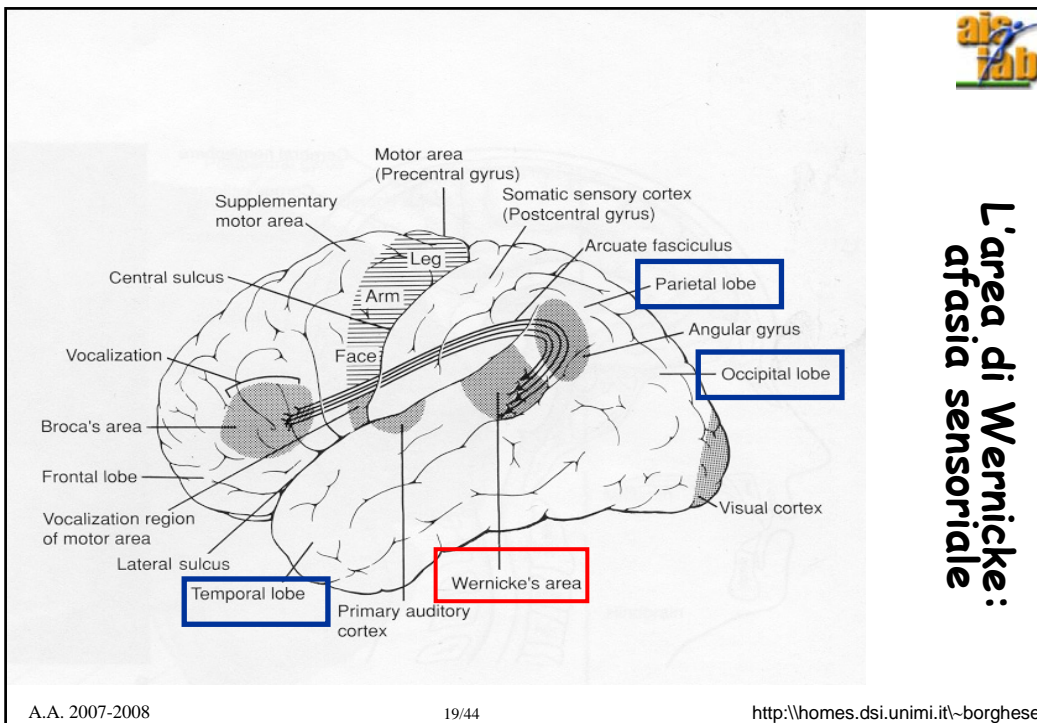
A.A. 2007-2008

18/44

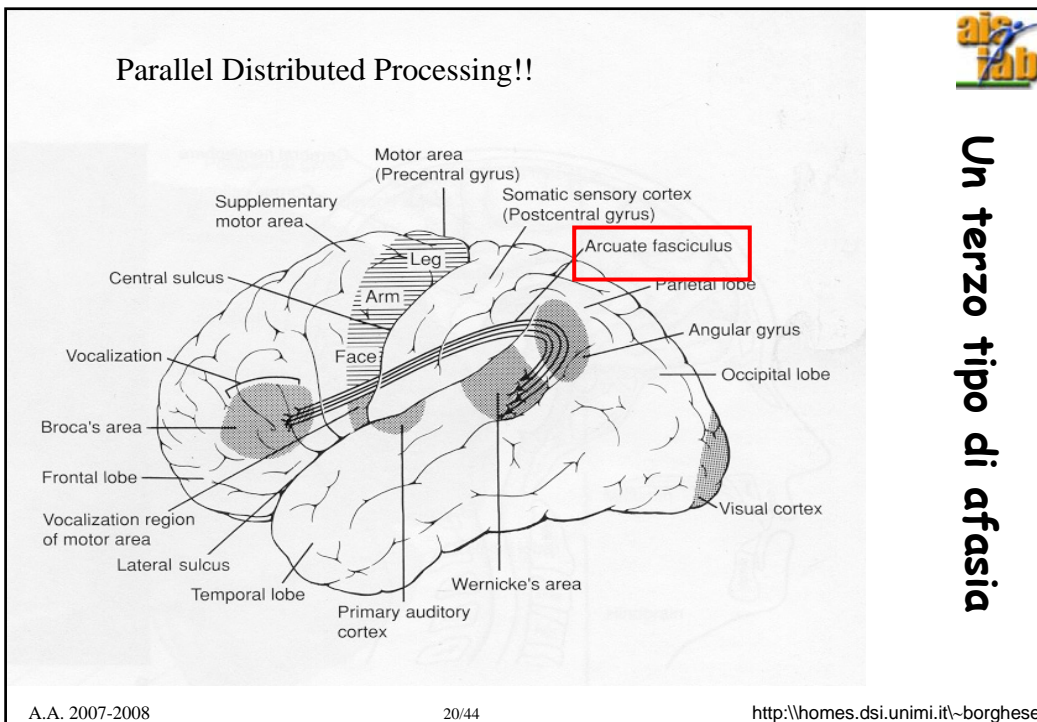
<http://homes.dsi.unimi.it/~borgese>



## L'area di Wernicke: afasia sensoriale

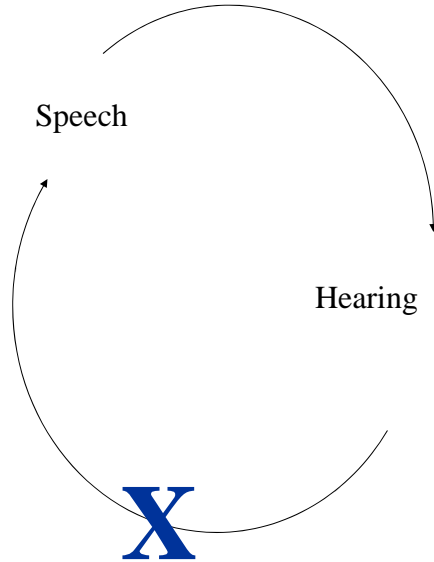


## Un terzo tipo di afasia





## 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

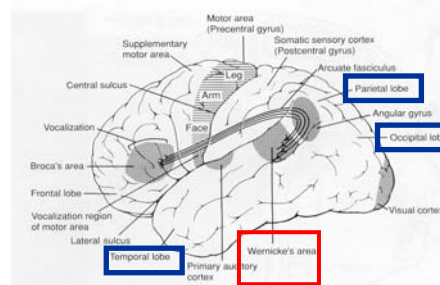
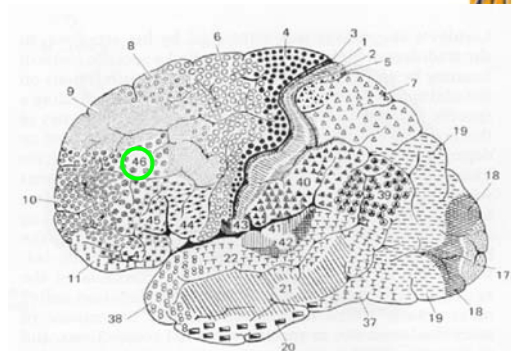


Parallel Distributed Processing.

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

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

Prosodia (corteccia destra).





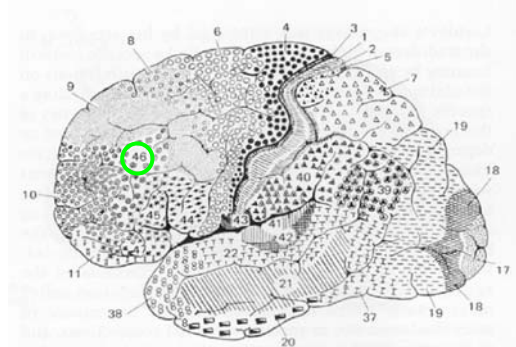
## Apprendimento del linguaggio



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

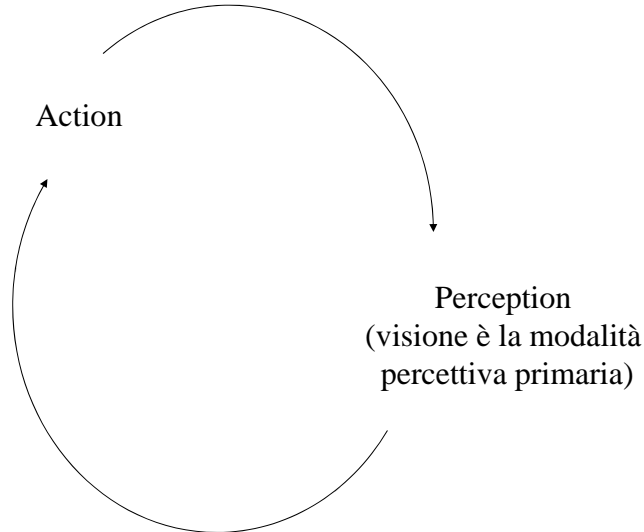
Il linguaggio

**Le trasformazioni visuo-motorie**

Il codice di popolazione come esempio di processing corticale



## Trasformazioni visuo-motorie



A.A. 2007-2008

25/44

<http://homes.dsi.unimi.it/~borgese>



## Il movimento volontario

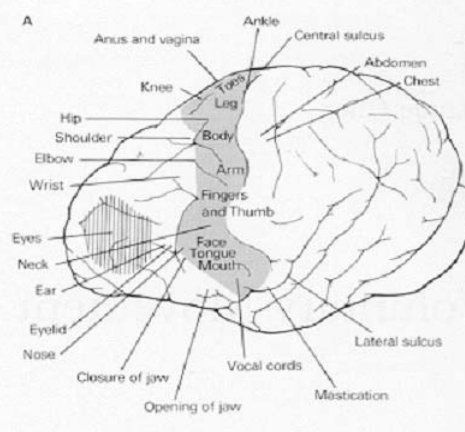


### Movimenti volontari.

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.



A.A. 2007-2008

26/44

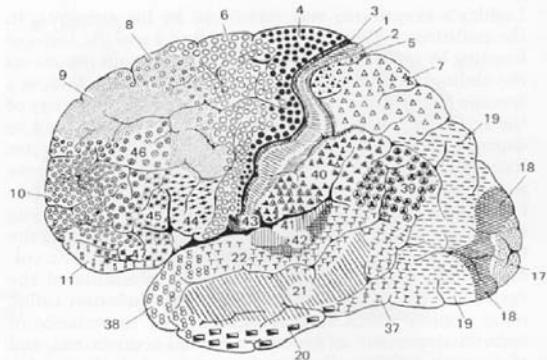
<http://homes.dsi.unimi.it/~borgese>



## 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.

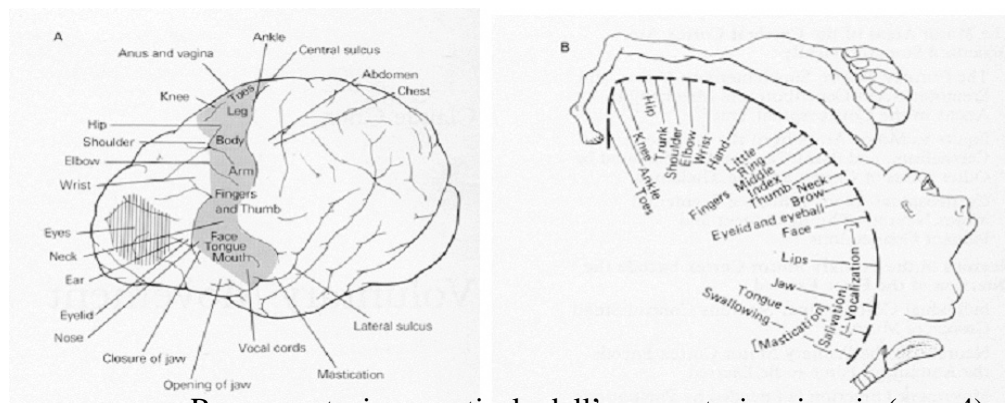
A.A. 2007-2008

27/44

<http://homes.dsi.unimi.it/~borgnese>



## 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.

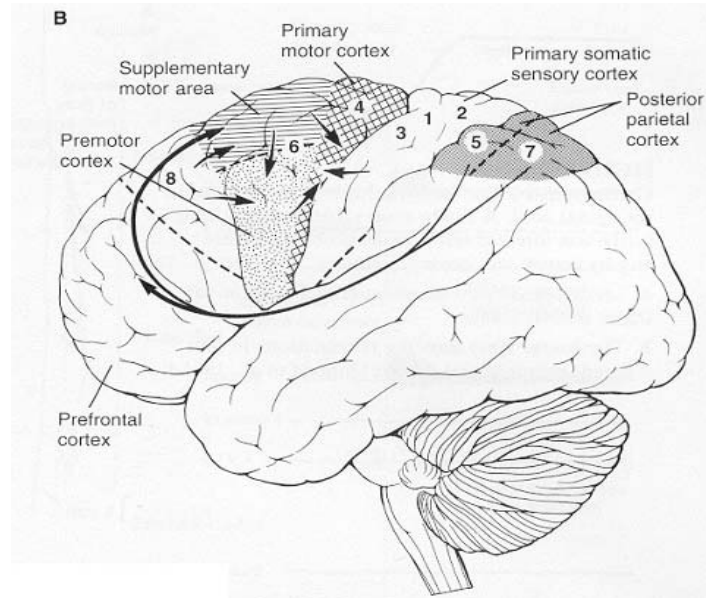
A.A. 2007-2008

28/44

<http://homes.dsi.unimi.it/~borgnese>



## Le aree motorie



A.A. 2007-2008

29/44

<http://homes.dsi.unimi.it/~borgnese>



## Output delle aree motorie

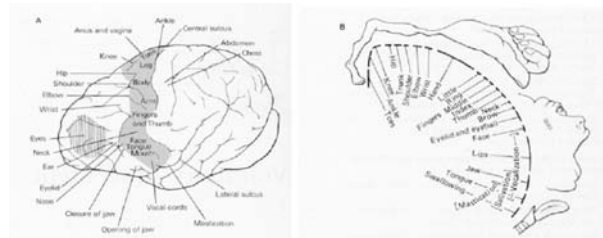
Muscoli diversi hanno regioni di attivazione diverse.

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).



A.A. 2007-2008

30/44

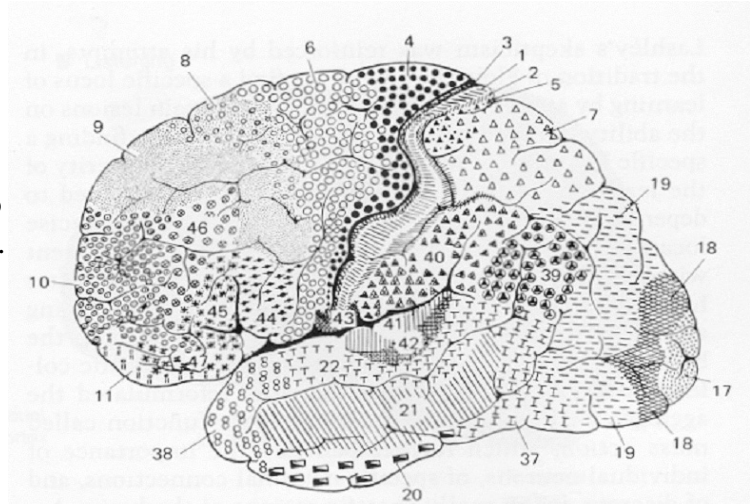
<http://homes.dsi.unimi.it/~borgnese>



## Corteccia posteriore parietale



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



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

A.A. 2007-2008

31/44

<http://homes.dsi.unimi.it/~borgnese>



## Mirror neurons and circuits

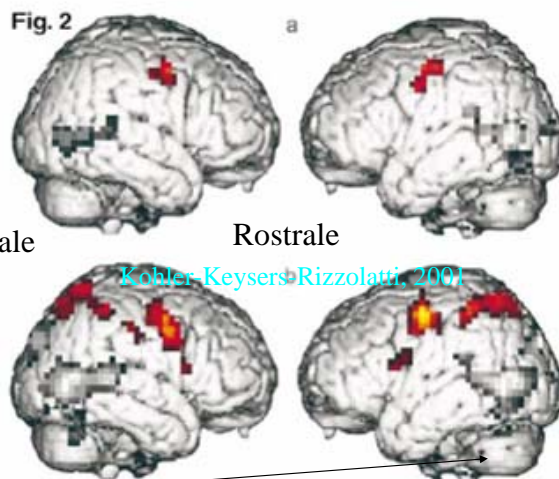


Aree prefrontali, attive sia nell'osservazione che nell'immaginazione che nell'esecuzione di movimenti.

Lo sperimentatore muove le mani senza oggetto.

Attivazione pre-motoria.

Attivazione pre-motoria + parietale, bilaterale.



Lo sperimentatore muove le mani con oggetto.

A.A. 2007-2008

32/44

<http://homes.dsi.unimi.it/~borgnese>





## Trasformazioni visuo-motorie

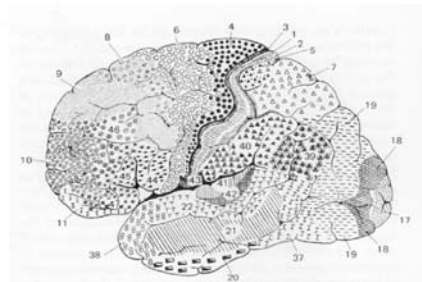
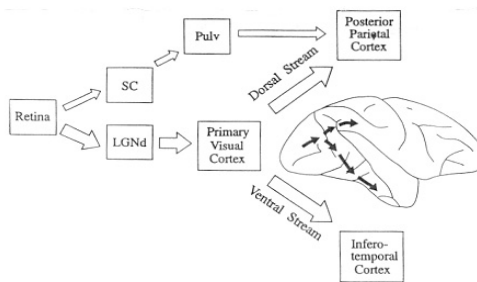


I nostri occhi sono la finestra sul mondo.

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.



A.A. 2007-2008

33/44

<http://homes.dsi.unimi.it/~borgnese>



## Riassunto



Circuiti che concatenano aree diverse.

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

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

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

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

A.A. 2007-2008

34/44

<http://homes.dsi.unimi.it/~borgnese>



## Sommario



Struttura del Sistema Nervoso Centrale

Il linguaggio

Le trasformazioni visuo-motorie

**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.

A.A. 2007-2008

37/44

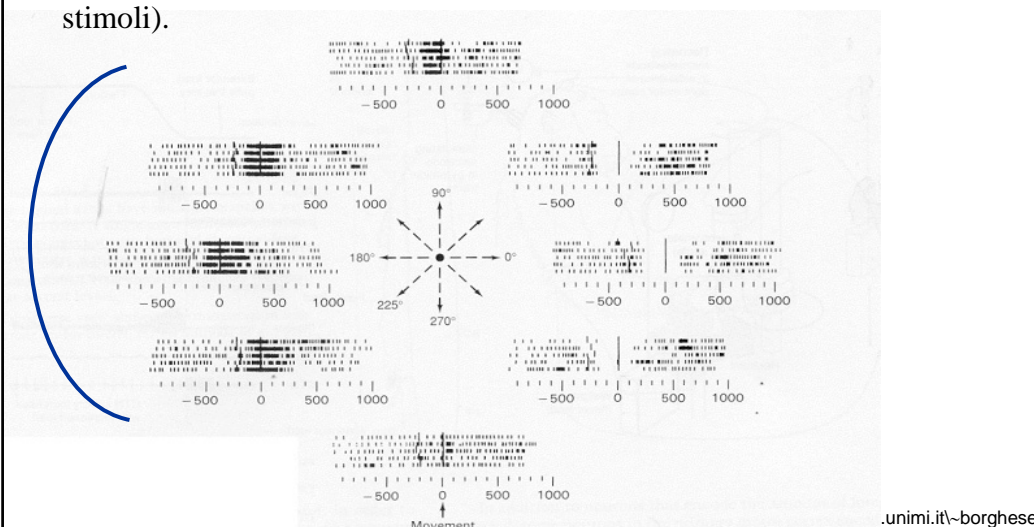
<http://homes.dsi.unimi.it/~borgese>



## 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).



[.unimi.it/~borgese](http://homes.dsi.unimi.it/~borgese)



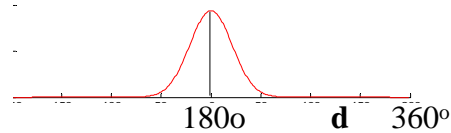
## Modellazione della frequenza di scarica



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

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

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



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

A.A. 2007-2008

39/44

<http://homes.dsi.unimi.it/~borgese>



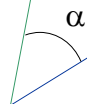
## Attività del singolo neurone



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, "a campana" (cosa ricorda?).*

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

A.A. 2007-2008

40/44

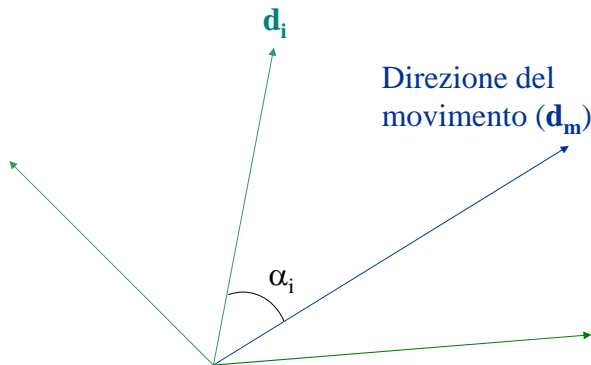
<http://homes.dsi.unimi.it/~borgese>



## Attività di una popolazione di neuroni



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



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

A.A. 2007-2008

41/44

<http://homes.dsi.unimi.it/~borgnese>



## Somma pesata dell’attività



$\mathbf{d}_i$  rappresenta l’attività del neurone  $i$ -esimo per il movimento nella sua direzione preferenziale.

Questa attività sarà massima quando la direzione del movimento,  $\mathbf{d}_m$ , è allineata alla direzione preferita del neurone, per decrescere allo spostamento radiale.

Quindi?

Ottingo la direzione di movimento come somma pesata dei vettori di direzione preferenziale.  $\mathbf{d}_m = \sum_i \mathbf{d}_i \cos \alpha_i$

L’uscita della popolazione è multipla, ciascuna sintonizzata su una  $\mathbf{d}_m$  diversa.

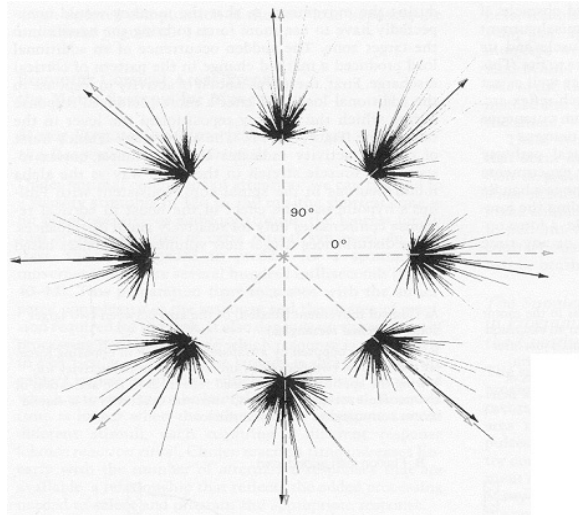
A.A. 2007-2008

42/44

<http://homes.dsi.unimi.it/~borgnese>



## Attivazione dei neuroni della 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!

A.A. 2007-2008

43/44

<http://homes.dsi.unimi.it/~borghese>



## 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 attive 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.

A.A. 2007-2008

44/44

<http://homes.dsi.unimi.it/~borghese>



## Sommario



Struttura del Sistema Nervoso Centrale

Il linguaggio

Le trasformazioni visuo-motorie

Il codice di popolazione come esempio di processing corticale