



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TRIESTE



Dipartimento di
Scienze della vita



Corso di Laurea Magistrale in Medicina e Chirurgia

Corso di FISILOGIA UMANA

a.a. 2025-26

NEUROFISIOLOGIA 1

Sistema Motorio II

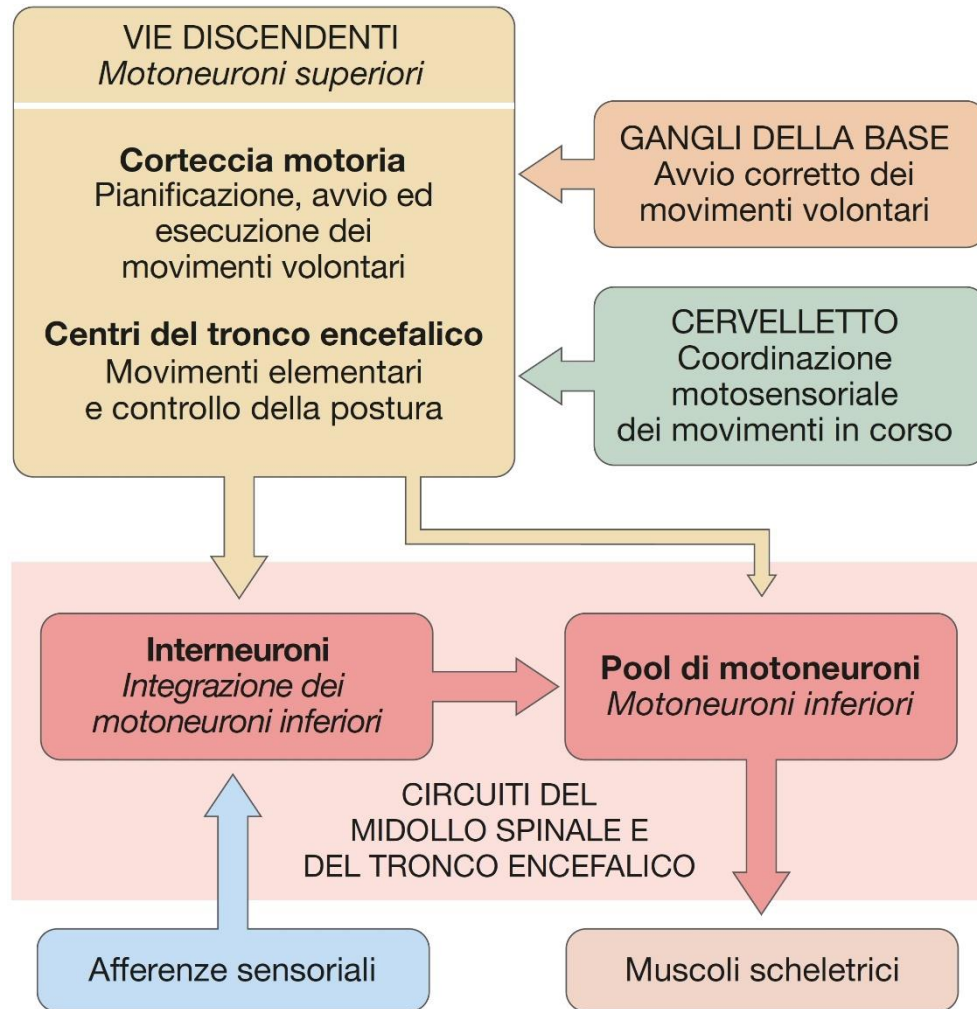
Motoneuroni superiori

Lorenzo Cingolani
lcingolani@units.it

PROGRAMMA DETTAGLIATO

- **MN superiori e controllo del movimento**
- **Corteccia motoria primaria:** Mappa somatotopica
- **Aree premotorie e supplementari**
- **Vie di controllo discendenti:** Tratti corticospinale e corticobulbare
- **La sindrome del MN superiore**
- **Centri di controllo motorio del tronco encefalico:** Nuclei reticolari e vestibolari

Organizzazione del sistema motorio



Il controllo del movimento avviene attraverso quattro vie principali:

- **Midollo spinale e circuiti del tronco encefalico**
Comprende i **motoneuroni inferiori** e interneuroni dei circuiti locali.
Questo sistema può generare movimenti riflessi in risposta a stimoli sensoriali, anche in assenza di controllo centrale.
- **Sistemi discendenti**
Comprendono i **motoneuroni superiori** nella **corteccia motoria, premotoria** e in **specifici nuclei del tronco encefalico**.
Proiettano soprattutto sugli interneuroni, solo in minima parte sui MN inferiori.
- **Cervelletto**
Corregge gli errori di movimento, confrontando i movimenti pianificati con quelli effettivamente eseguiti.
- **Gangli della base**
Inibiscono i MN superiori per impedire movimenti indesiderati e preparano i circuiti all'inizio dei movimenti voluti.

Motoneuroni superiori e controllo del movimento

- **Motoneuroni superiori**

Localizzati in varie aree corticali e del tronco encefalico, coordinano l'attività dei motoneuroni inferiori

- **MN superiori del tronco encefalico**

Controllano postura, orientamento del corpo verso stimoli specifici, locomozione e movimenti del viso

- **Regione locomotrice mesencefalica**

Innesca la locomozione

- **Complesso del nucleo vestibolare e formazione reticolata**

Contribuiscono al controllo della postura e di movimenti viscerali e somatici stereotipati

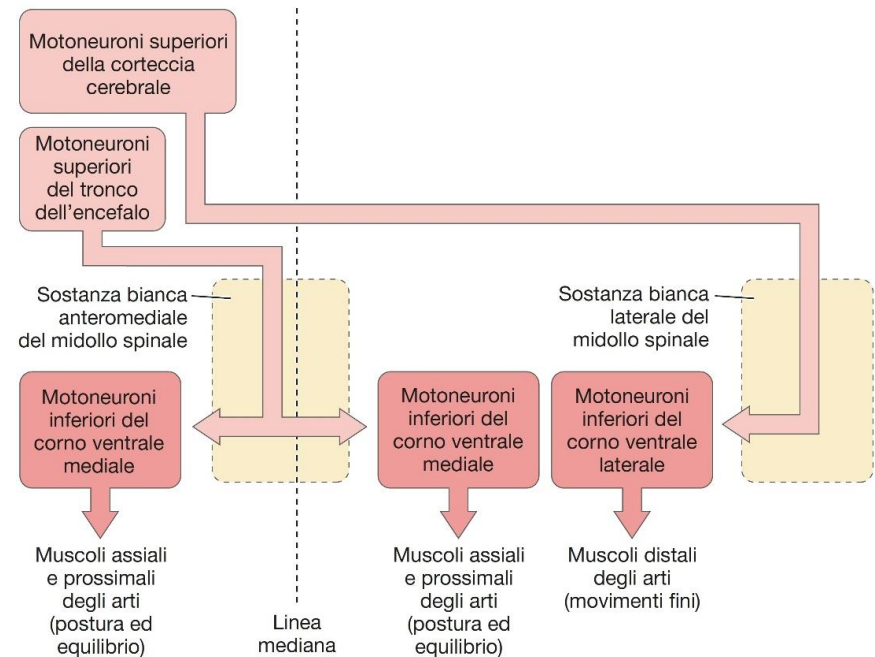
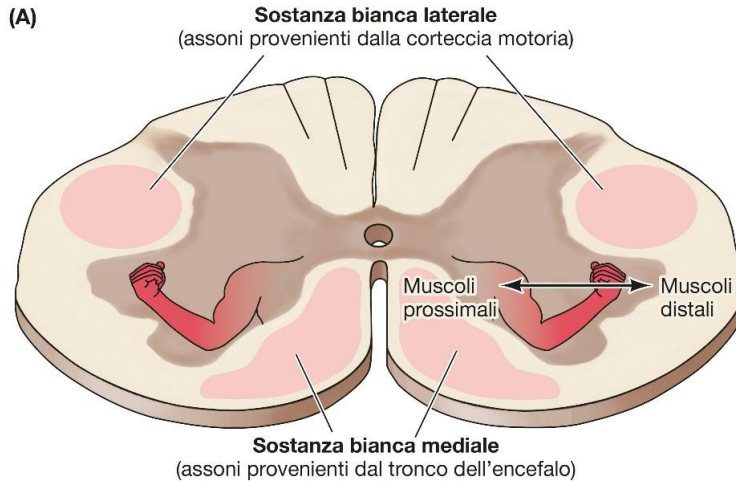
- **Collicolo superiore**

Controlla i movimenti oculari e della testa

- **La corteccia motoria primaria e aree premotorie**

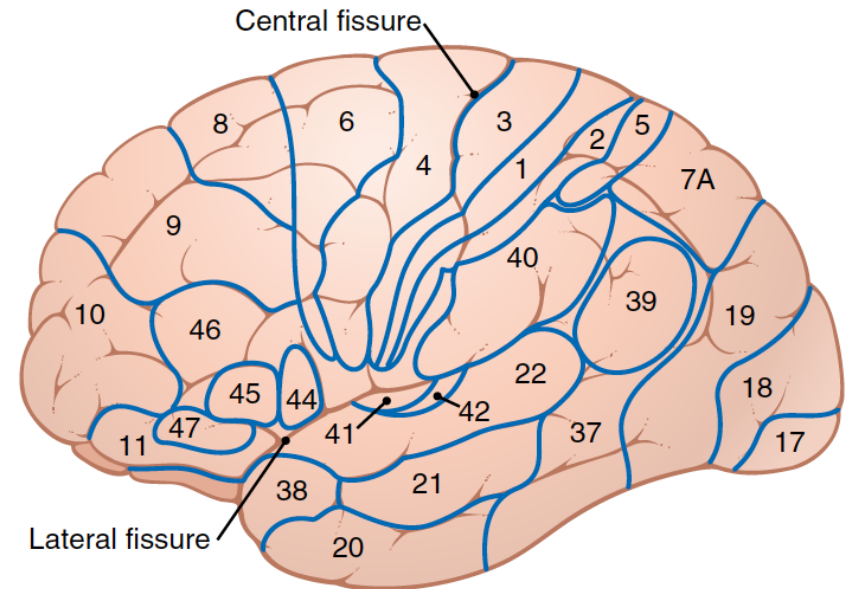
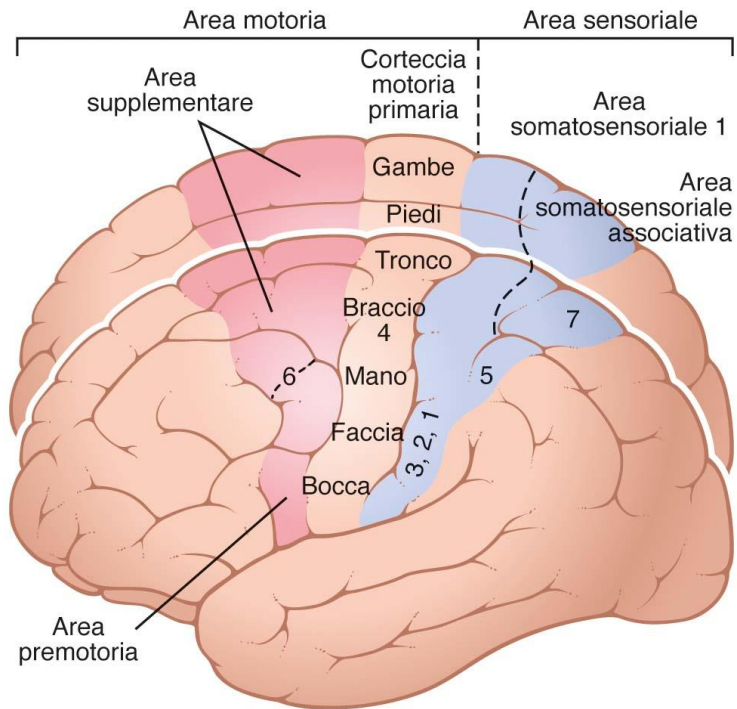
Pianificano e danno inizio ai movimenti volontari e alle espressioni facciali legate a stati emozionali

Organizzazione somatotopica vie discendenti



- L'organizzazione **mediale-distale** dei motoneuroni inferiori si riflette nell'organizzazione funzionale dei **fasci assonali discendenti** (materia bianca):
- **Proiezioni dal tronco encefalico**
 - Decorrono nella parte **anteriore e mediale** del midollo spinale
 - Contattano i **motoneuroni mediali**
 - Coinvolte nel controllo **postura ed equilibrio**
 - Attivano circuiti **CPG** per movimenti stereotipati
 - **Controllo bilaterale**
- **Proiezioni dalla corteccia motoria**
 - Decorrono nei **fasci laterali** della materia bianca
 - Contattano i **motoneuroni laterali**
 - Responsabili di **movimenti volontari di precisione**
 - **Controllo controlaterale**

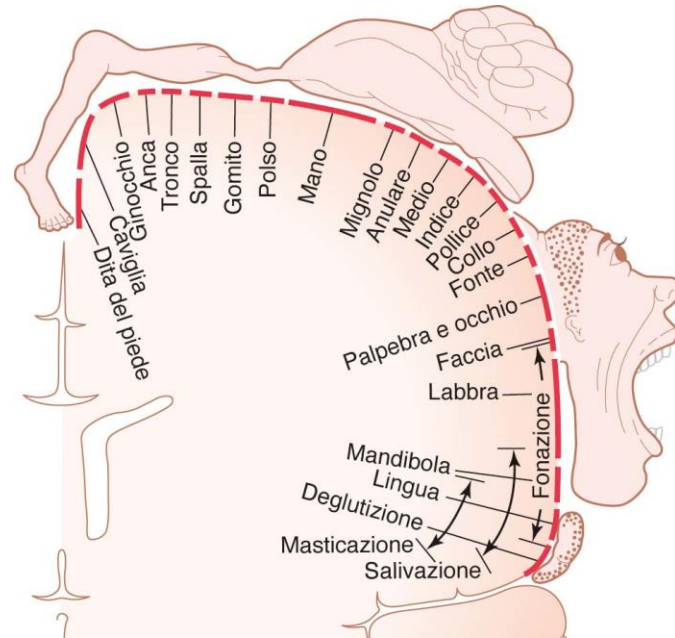
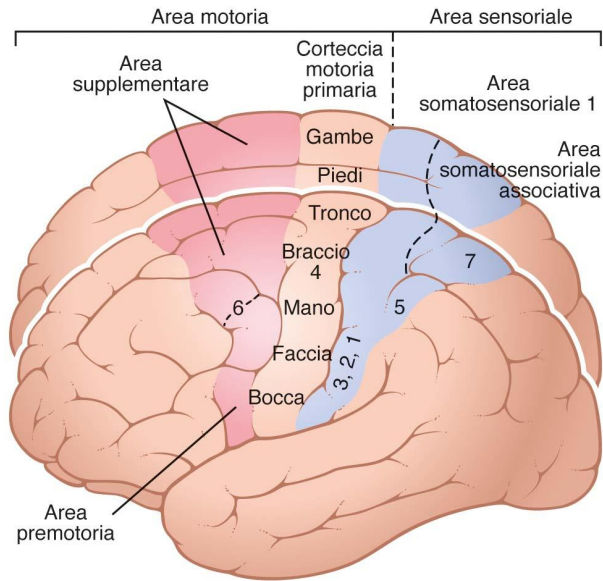
Corteccia motoria



➤ I corpi dei MN superiori corticali si trovano nella

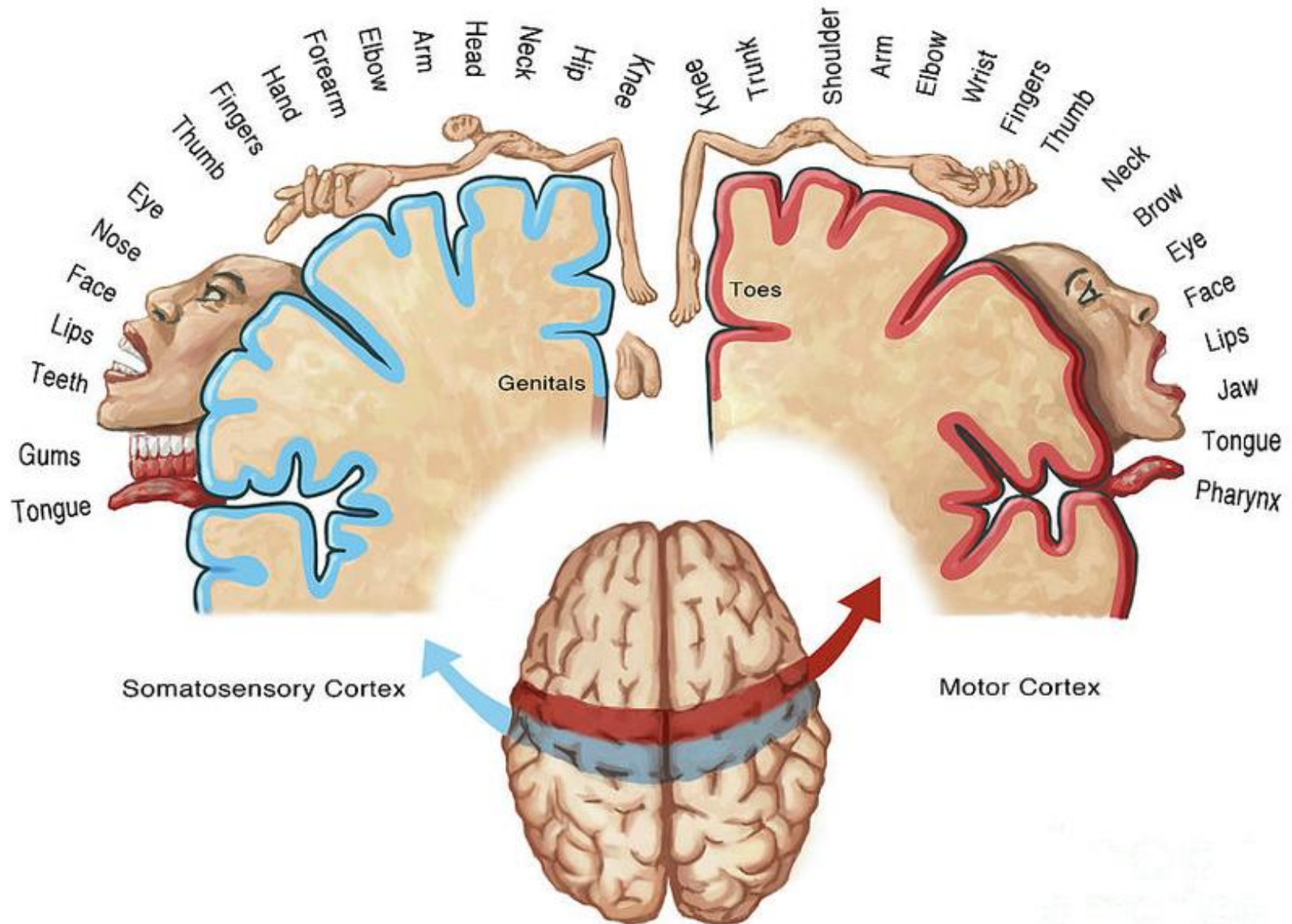
- **Corteccia motoria primaria** (area 4 di Brodmann)
- **Corteccia premotoria e motoria supplementare** (aree 6, 8, 44/45 sulla superficie del lobo frontale e parti delle aree 23 e 24 sulla superficie mediale)

Corteccia motoria primaria



- Occupa il **giro precentrale**, anteriormente al **solco centrale**
- Contiene una **rappresentazione somatotopica** del corpo (**homunculus motorio**), simile a quella sensoriale
- Questa mappa fu originariamente descritta da **Penfield e Rasmussen** mediante **stimolazione elettrica** di aree corticali in pazienti sottoposti a neurochirurgia
- Più della **metà della corteccia motoria** è dedicata al controllo dei **movimenti della mano** e dei **movimenti articolatori del linguaggio**
- La **stimolazione di un punto specifico** raramente provoca la contrazione di un **singolo muscolo**; più spesso attiva un **gruppo di muscoli** coinvolti in **movimenti coordinati**

Organizzazione dell'homunculus sensoriale e motorio

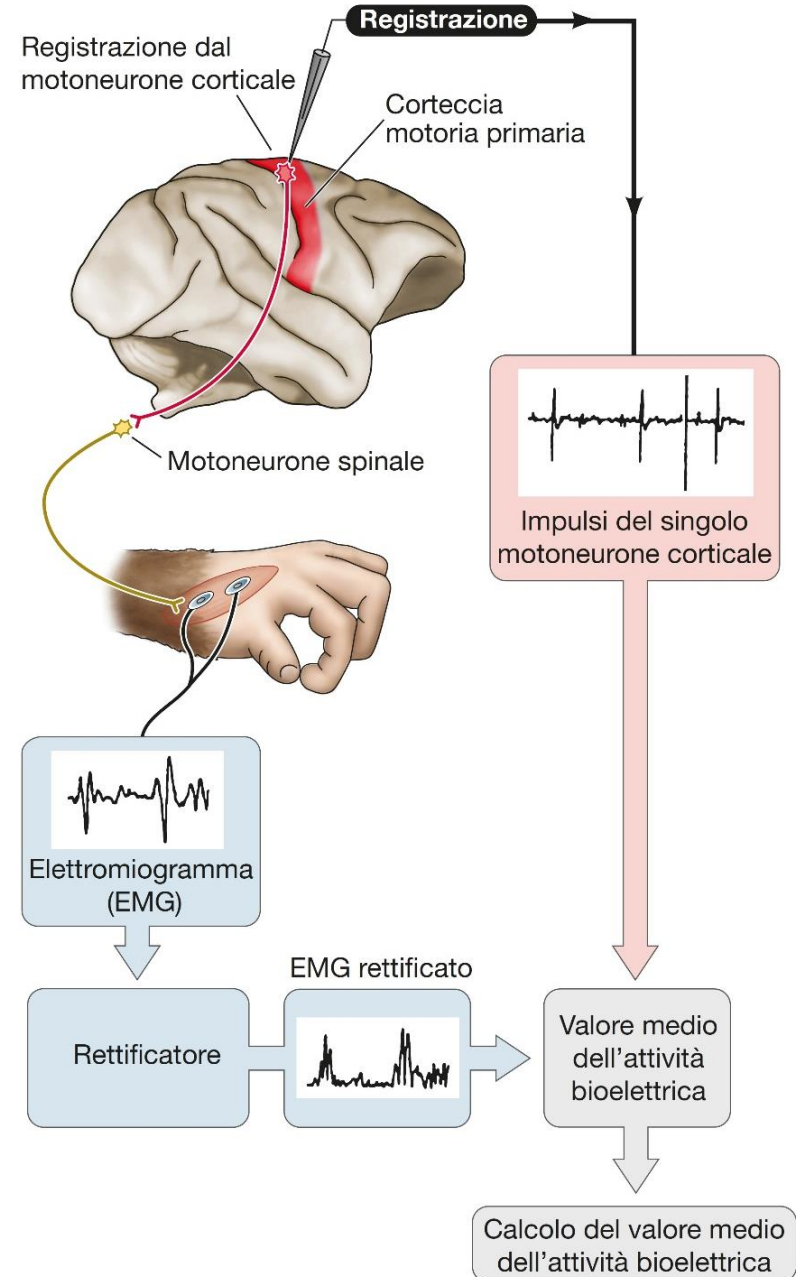


Corteccia motoria primaria

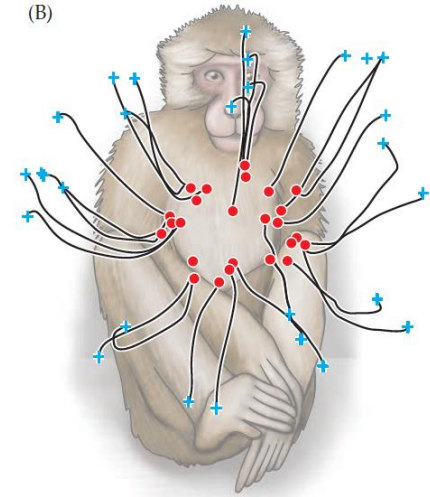
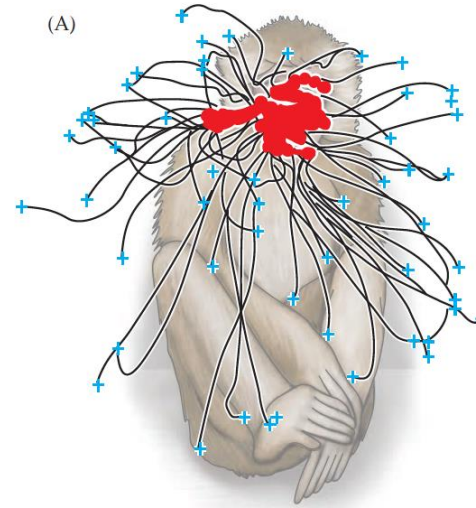
- **La corteccia motoria primaria** contiene una rappresentazione spaziale del corpo simile a quella della corteccia somatosensoriale. In questa rappresentazione, le aree del corpo coinvolte in movimenti fini, come quelli delle dita o dell volto, occupano una porzione corticale più ampia (mappa somatotopica).
- Tuttavia, la natura esatta di questa mappa è più complessa da definire rispetto a quella sensoriale. **Che cosa è realmente rappresentato nella corteccia motoria primaria?** I singoli muscoli, i tipi di movimento o le intenzioni?
- Esperimenti di **microstimolazione corticale nei primati** hanno mostrato che la corteccia motoria codifica **movimenti**, organizzati secondo la loro rilevanza etologica
- Infine, il firing di alcuni **motoneuroni superiori** precede l'inizio del movimento, suggerendo che una parte di essi possa **codificare l'intenzione motoria**

Campo muscolare

- **Registrazioni intracorticali ad alta risoluzione** hanno mostrato che l'attivazione di un singolo **MN corticale** provoca la **contrazione simultanea di più muscoli** tra loro correlati, ad esempio muscoli della mano o del polso
- L'insieme dei muscoli controllati da un singolo MN è definito **campo muscolare**, in analogia con il concetto di **campo recettivo**.
- Registrando simultaneamente l'attività del MN e la contrazione dei muscoli/EMG, è possibile **mappare il campo muscolare** di ciascun MN corticale.

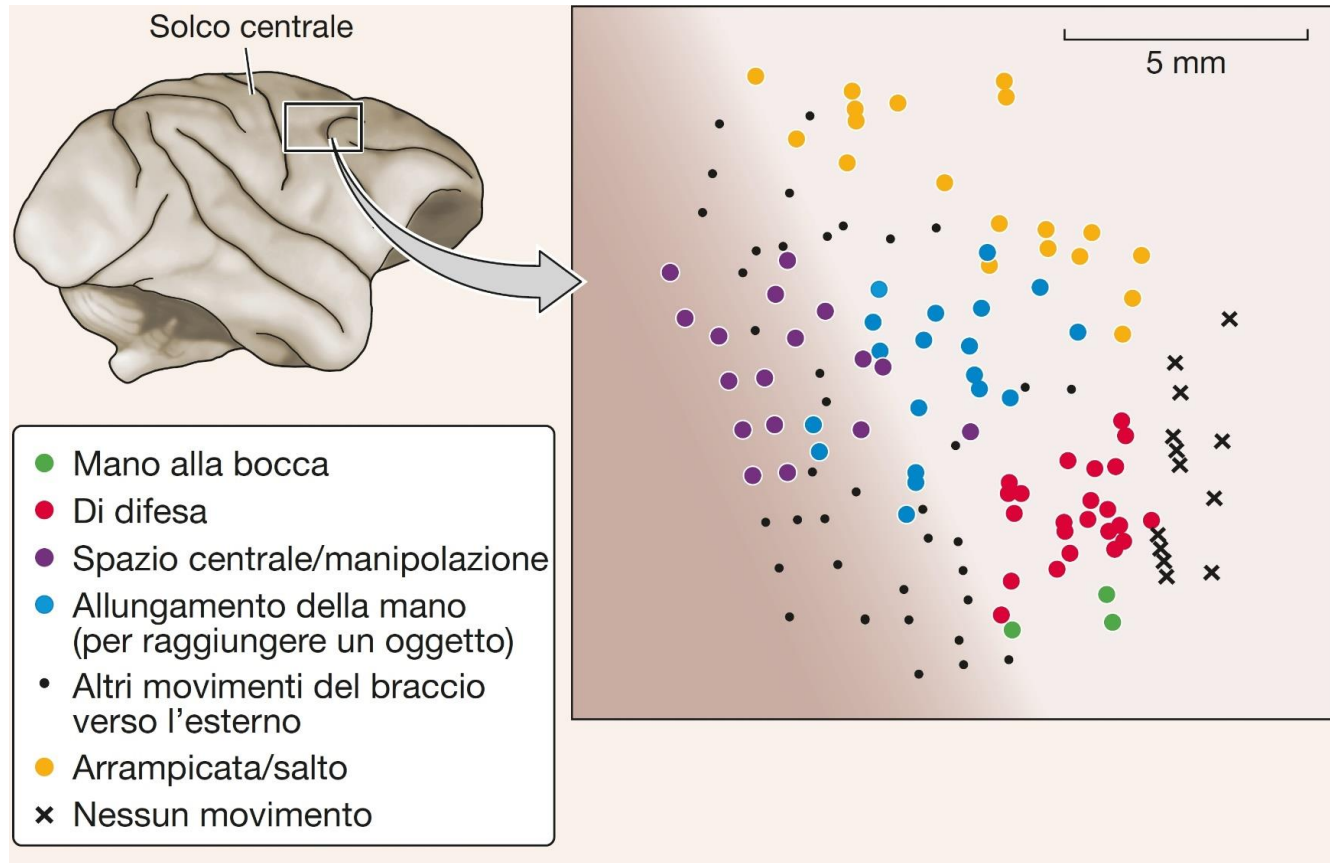


Principio del controllo motorio dei motoneuroni superiori

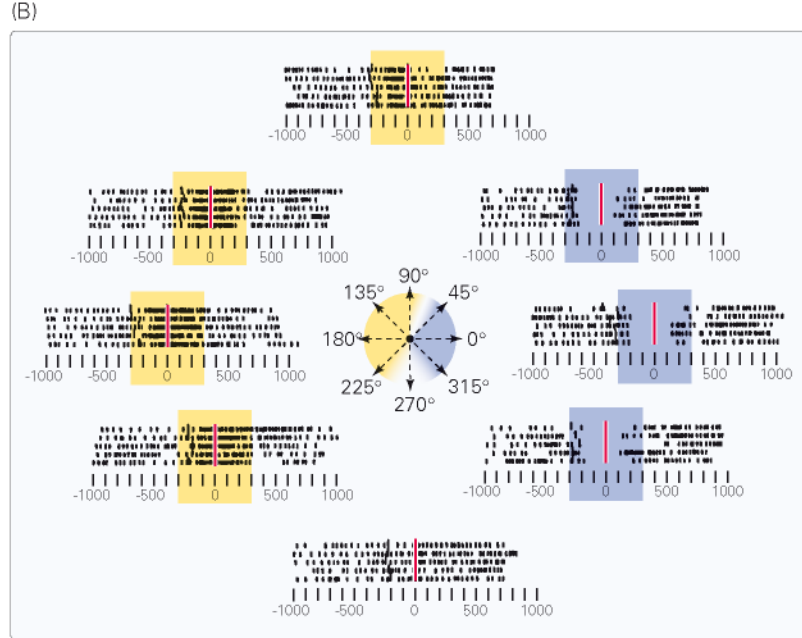
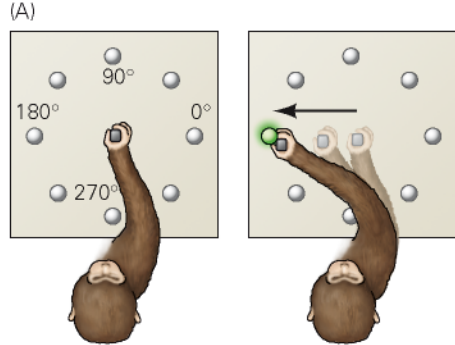


- Quando la microstimolazione è applicata nel **giro precentrale** per **diversi secondi** (cioè tempi simili a quelli dei **movimenti volontari**), i movimenti risultanti:
 - coinvolgono **più articolazioni in sequenza**
 - appaiono **coordinati e finalizzati**
- Esempi di pattern motori evocati:
 - **mano alla bocca**, come per alimentarsi
 - **mano al centro dello spazio visivo**, come per ispezionare un oggetto
 - **posture difensive**, come per proteggersi da un urto imminente
- Questi risultati indicano che:
 - **la corteccia motoria primaria organizza movimenti finalizzati**
 - **la sua organizzazione somatotopica riflette comportamenti etologicamente rilevanti**, non singoli muscoli

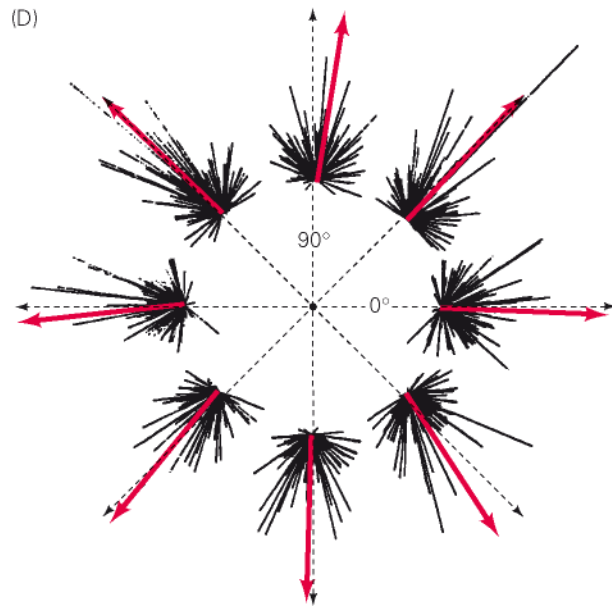
Principio del controllo motorio dei motoneuroni superiori



- Distribuzione topografica di siti di microstimolazione che evocano movimenti collegabili a comportamenti rilevanti dal punto di vista etologico (esperimento su macaco)



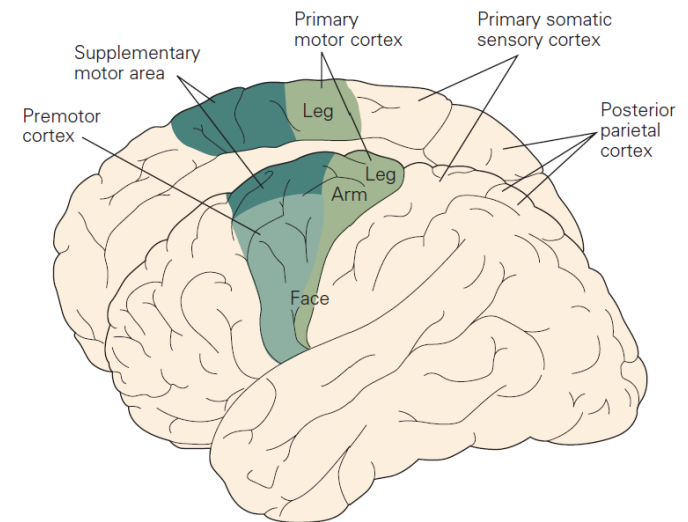
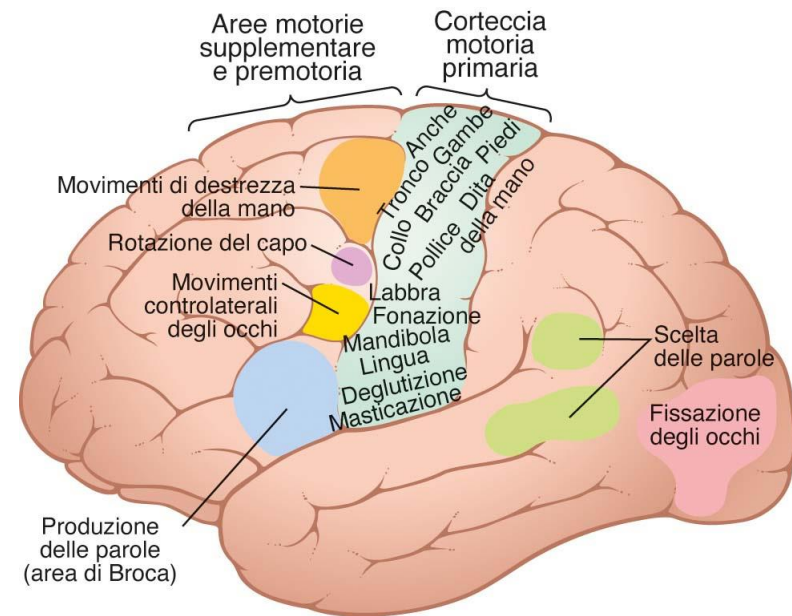
Codifica corticale dei movimenti volontari



- Nei **movimenti di raggiungimento visivamente guidati** (reaching), la **direzione del movimento del braccio** può essere prevista calcolando un **vettore di popolazione neuronale** derivato dall'attività simultanea di molti motoneuroni corticali.
- Ogni neurone è **ampiamente sintonizzato**: scarica prima di movimenti in molte direzioni, quindi **da solo non può specificare la direzione del movimento**.
- Lo **stesso sito nella corteccia motoria primaria** può rappresentare **diverse traiettorie** a seconda della **posizione iniziale dell'arto**, suggerendo che:
 - più **parametri del movimento** (direzione, posizione finale, scopo) sono rappresentati
 - la corteccia motoria **codifica il movimento in funzione dell'obiettivo comportamentale**

Corteccia premotoria

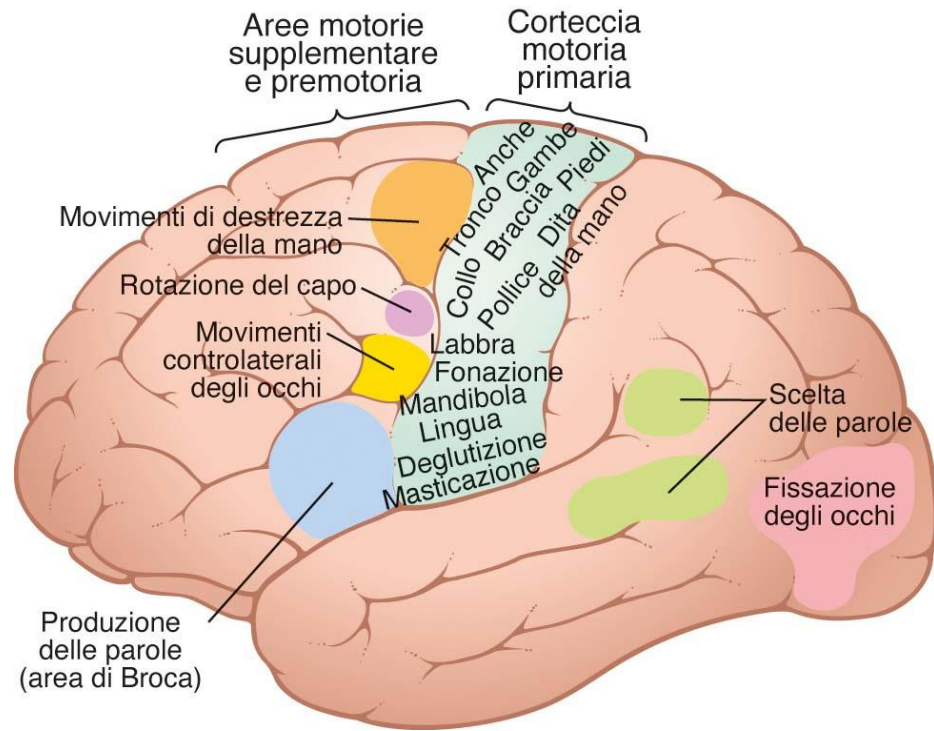
- Si estende **anteriormente alla corteccia motoria primaria**, dalla **scissura laterale di Silvio** fino alla **scissura longitudinale**, dove si trova l'**area motoria supplementare (SMA)**
- Contiene una **rappresentazione somatotopica** simile a quella della corteccia motoria primaria
- La **stimolazione** della corteccia premotoria evoca **movimenti complessi e coordinati**, come il **posizionamento del tronco, delle braccia e degli arti** per eseguire azioni specifiche
- Comunica con la corteccia motoria primaria **direttamente** e **attraverso il talamo e i gangli della base**
- Contiene i **neuroni specchio**, che si attivano quando una persona **esegue un movimento**, **osserva** qualcun altro compierlo o **ne ascolta la descrizione**
- Si ritiene che siano coinvolti nella **comprensione delle azioni altrui** e nell'**apprendimento per imitazione**



Lezione del Prof. Rizzolatti su 'Il meccanismo specchio'

<https://www.youtube.com/watch?v=6qOi5DZKpwc>

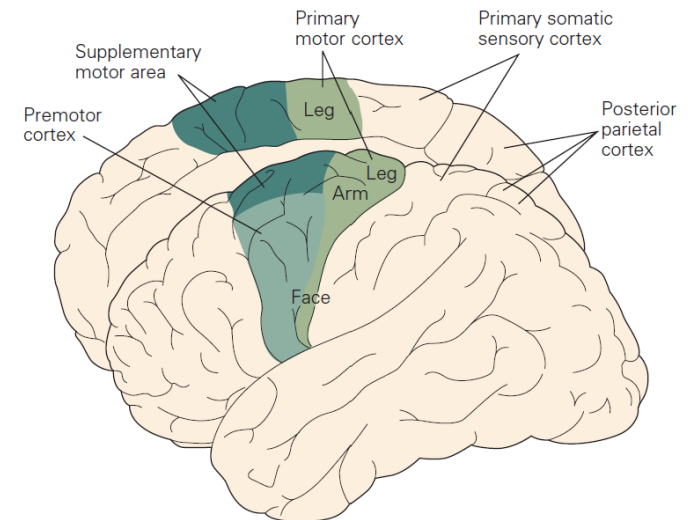
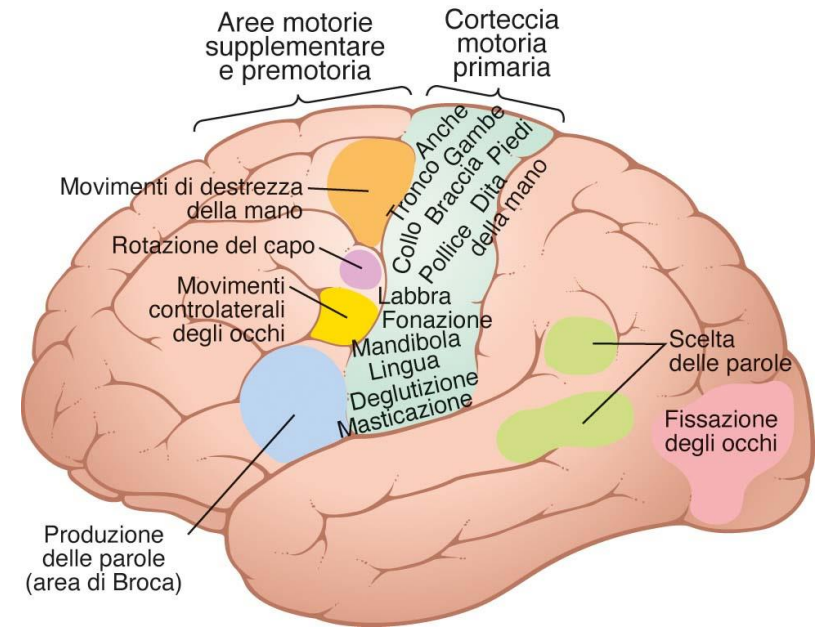
Corteccia premotoria



- **Area di Broca** (area motoria del linguaggio, nella corteccia premotoria)
 - Lesioni: **afasia motoria** (incapacità di articolare il linguaggio)
 - Area associata: **controlla la respirazione durante il parlato**
- **Aree per i movimenti volontari degli occhi e per il movimento della testa**
- **Area per i movimenti fini delle mani**
 - Situata **anteriormente all'area motoria primaria** per mani e dita
 - Lesioni: **aprassia motoria** → perdita di coordinazione e del “senso del movimento”

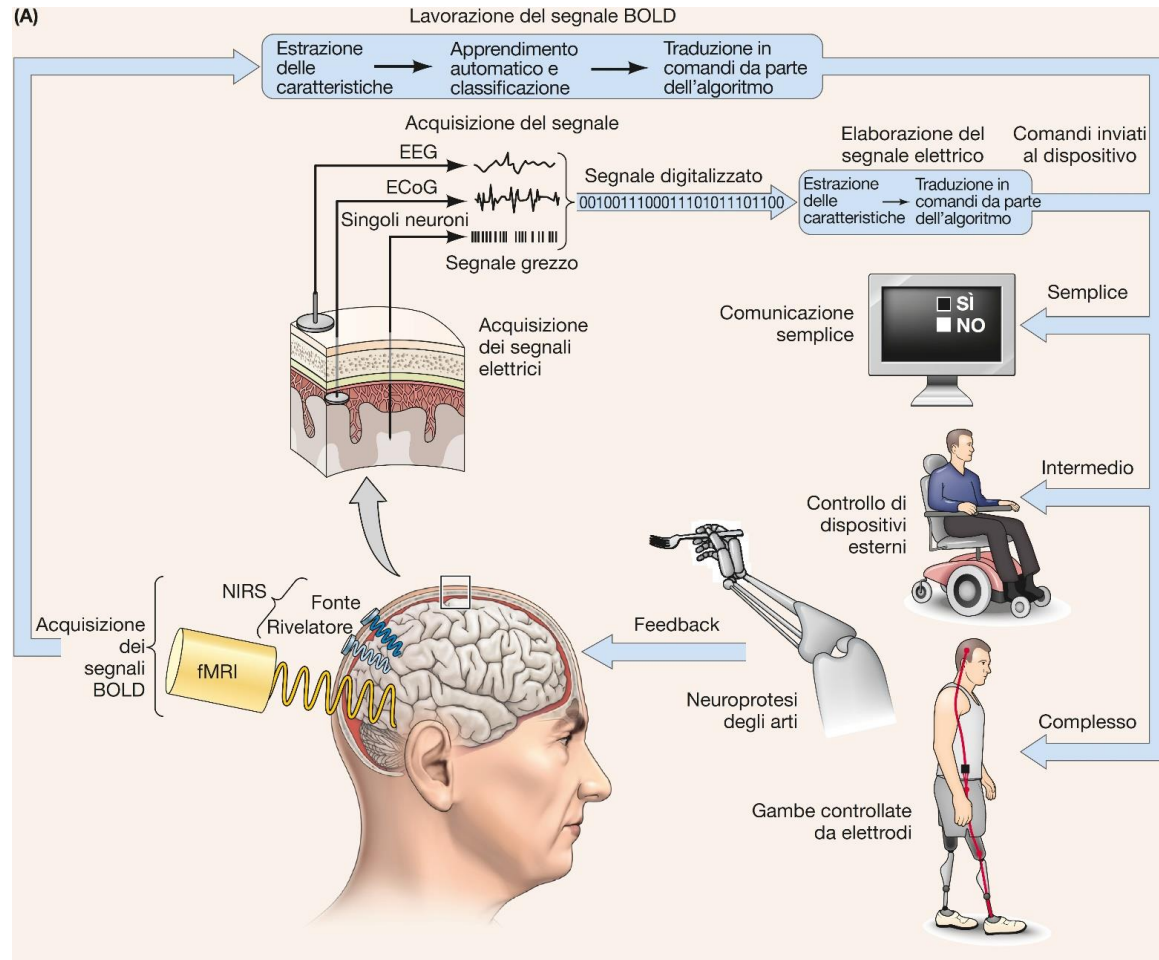
Area motoria supplementare

- Occupa la **regione mediale della corteccia frontale**, lungo la **scissura longitudinale**, estendendosi fino alla **corteccia frontale superiore**
- La **stimolazione** di questa area provoca **movimenti bilaterali**, ad esempio il **grasping simultaneo** con entrambe le mani.
- Collabora con la **corteccia premotoria** nel generare:
 - **movimenti complessi e “salienti”** che coinvolgono l'intero corpo,
 - **movimenti di fissazione di testa e occhi.**

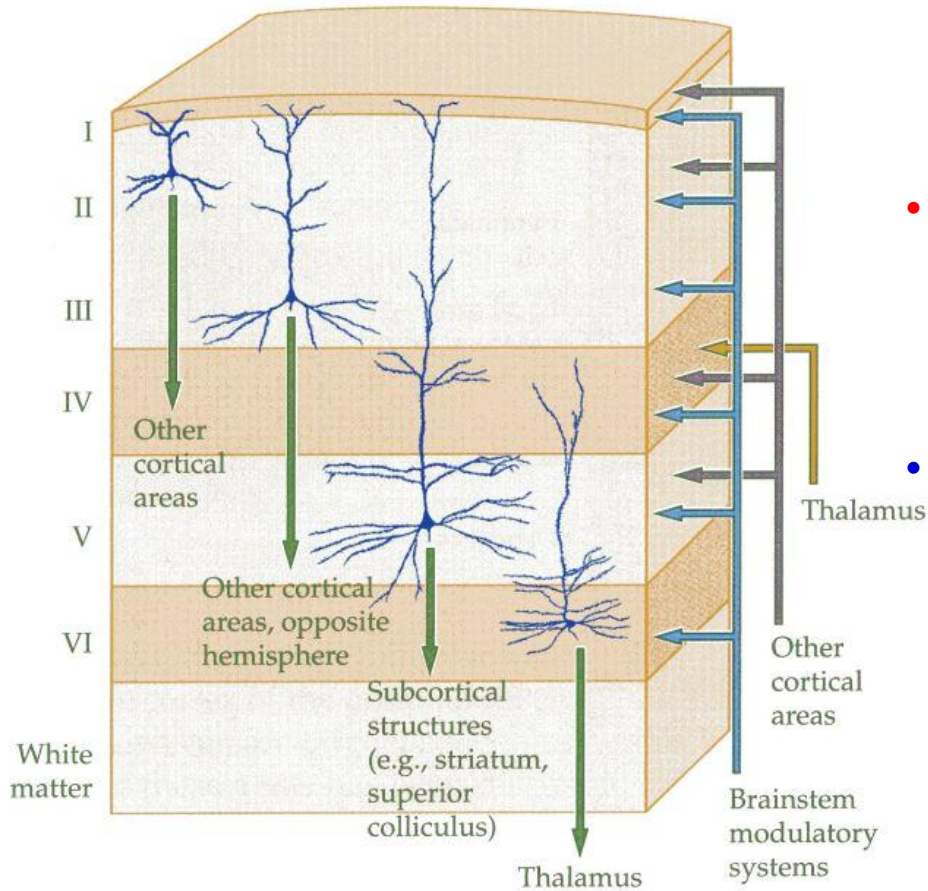


Applicazioni cliniche: Brain-machine interfaces (BMI)s

- Lo studio delle **aree corticali motorie** ha importanti implicazioni cliniche
- Le **interfacce cervello-macchina (BMI)** permettono di controllare protesi con il pensiero
- L'attività neuronale viene **registrata e decodificata**, quindi **tradotta in comandi di movimento** per dispositivi esterni



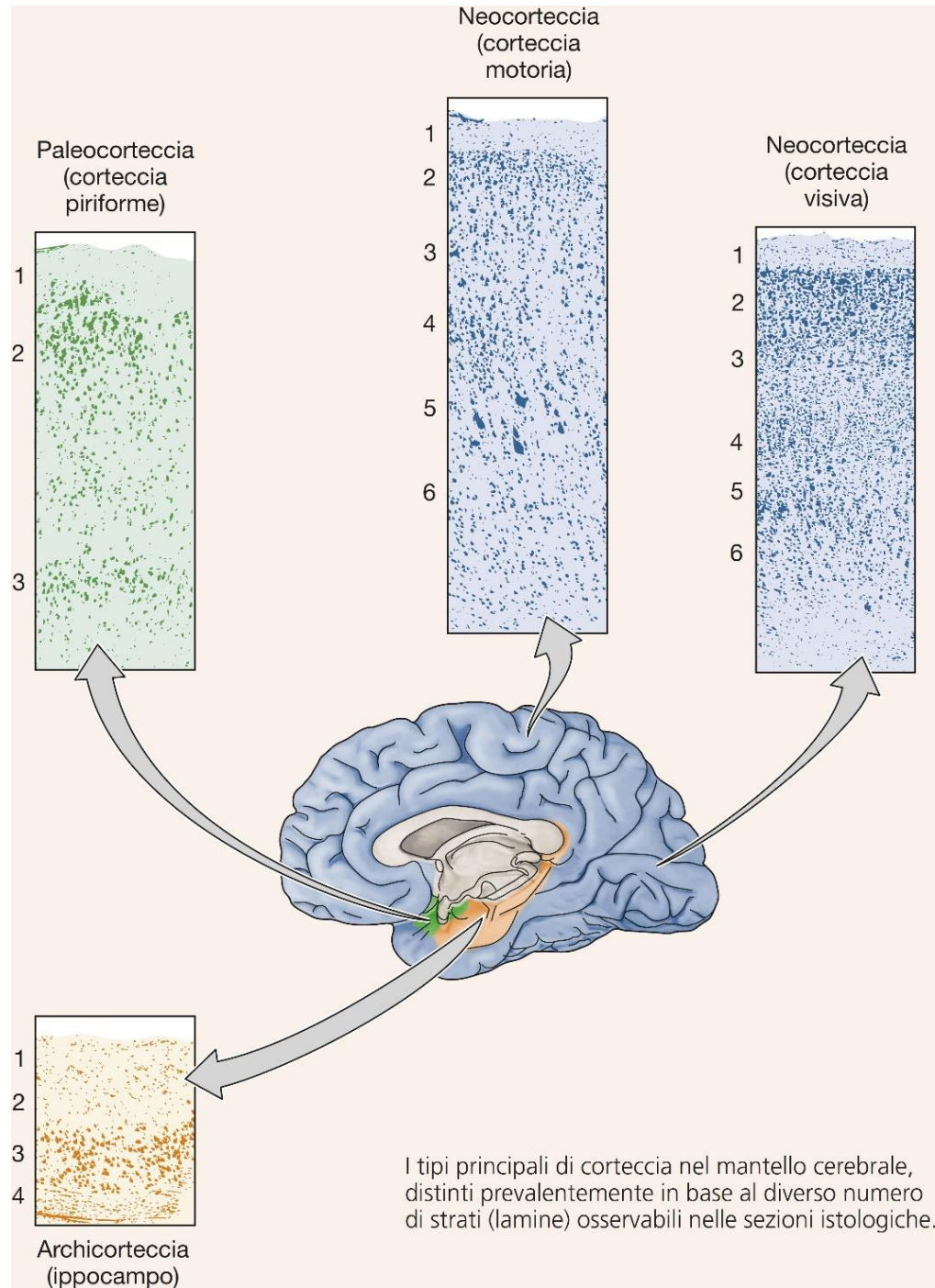
Corteccia cerebrale: Strati



- **Input** principali esterni alla corteccia arrivano dal talamo allo **strato IV**
- **Output** principali in uscita dalla corteccia dagli **strati profondi (V e VI)**

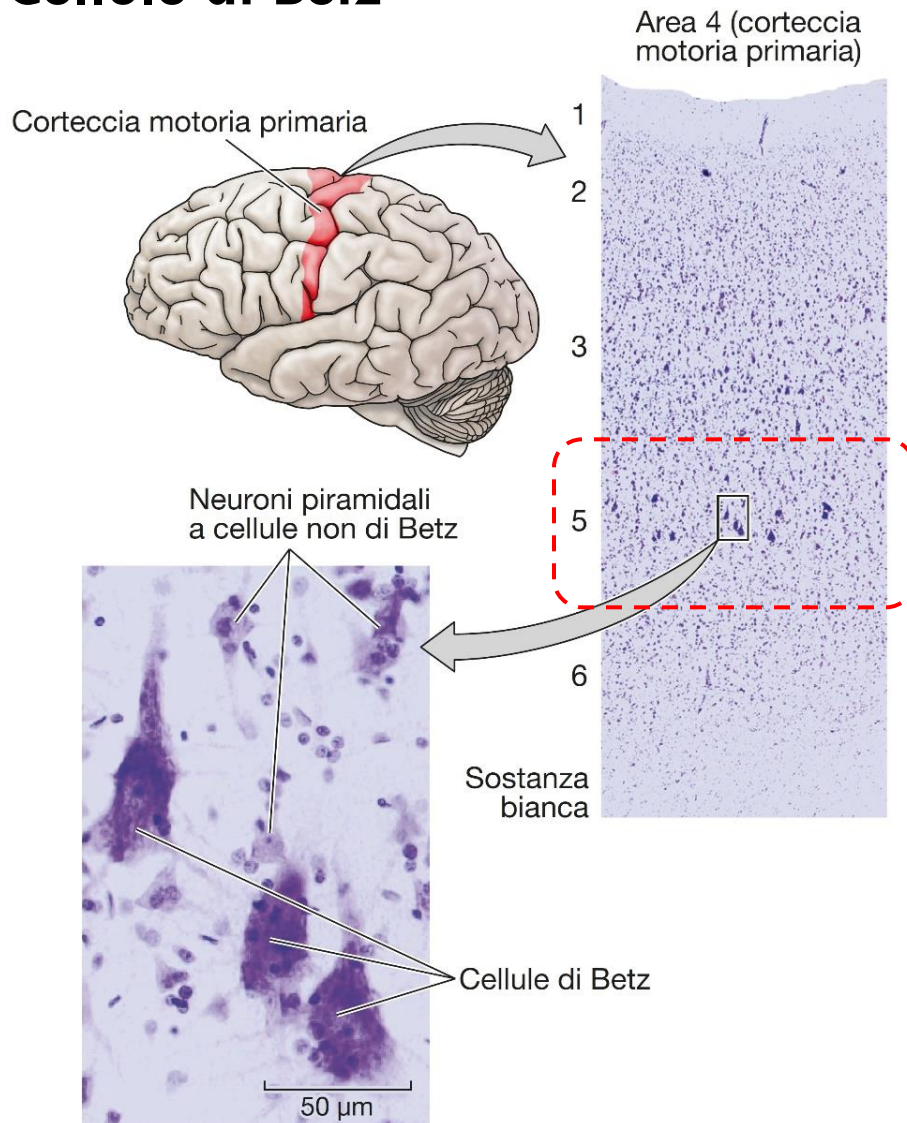
L'organizzazione della corteccia cerebrale è molto simile nelle varie aree: 6 strati, numerati dal più esterno al più interno. Ogni strato ha caratteristiche anatomiche, funzionali e di connettività distinte (neuroni con morfologie diverse ricevono / inviano input a regioni diverse).

Corteccia cerebrale



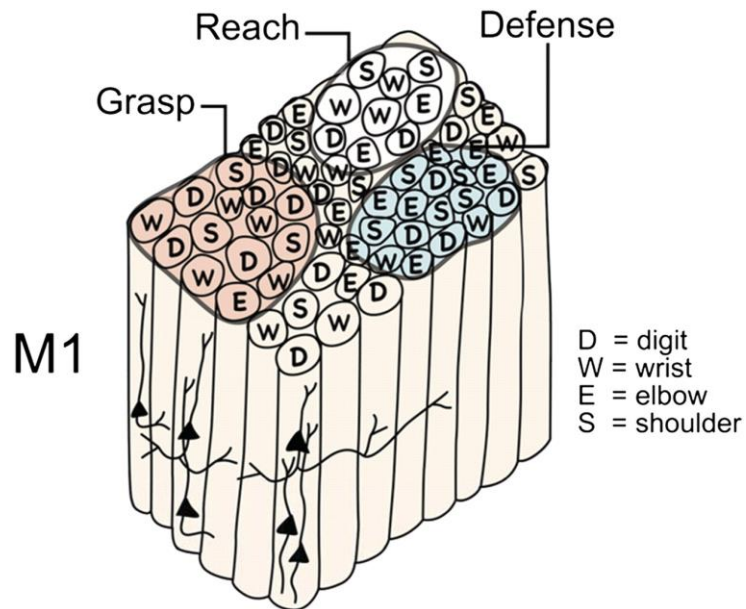
- Aree del cervello evolutivamente più 'antiche' hanno meno strati (**archicorteccia, paleocorteccia**)
- I diversi strati hanno rapporti di spessore diversi in aree diverse della neocorteccia (strato 4 più sviluppato nelle cortecce sensoriali; strato 5 più sviluppato nelle cortecce motorie)
- Queste caratteristiche sono alla base della **classificazione di Brodmann**: 52 aree basate sulla cito-architettura degli strati corticali.

Cellule di Betz



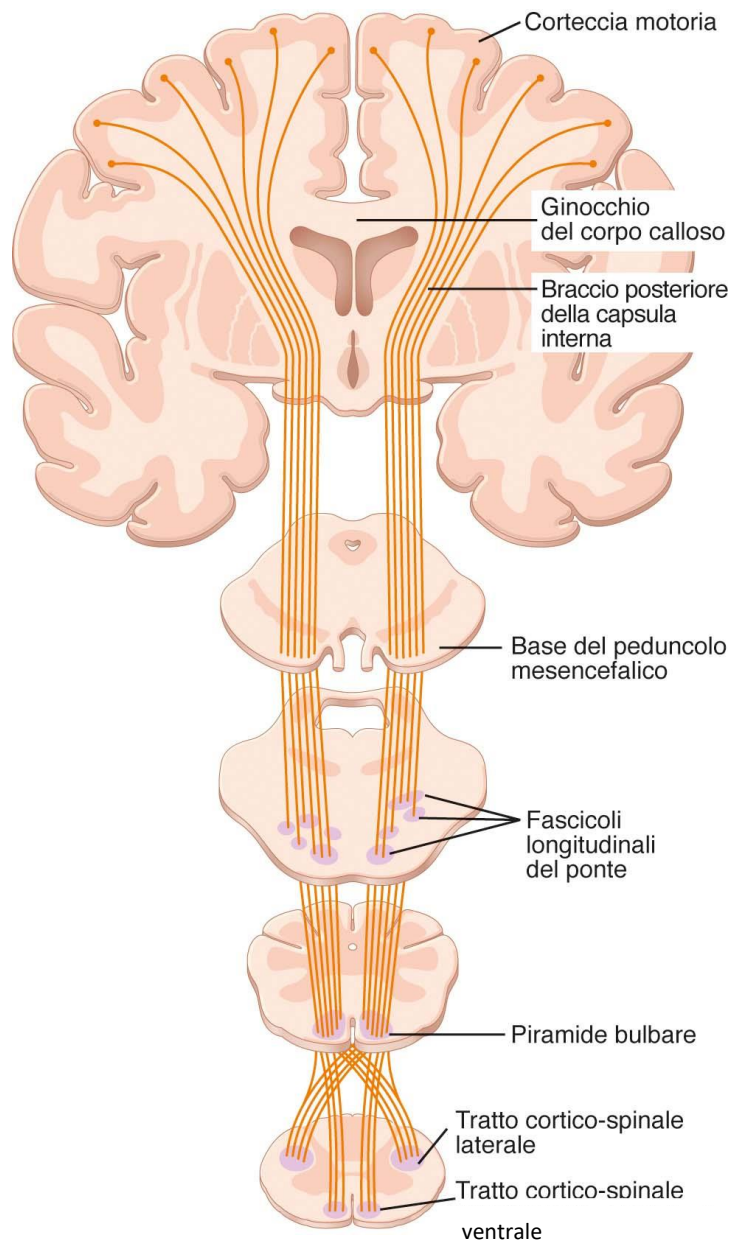
- I **neuroni piramidali dello strato V** sono i **motoneuroni superiori** della **corteccia motoria**
- Tra questi si distinguono le **cellule di Betz**
 - presenti solo nella **corteccia motoria primaria**
 - **con il corpo cellulare molto grande** ($\approx 60 \mu\text{m}$ di diametro)
 - i loro **assoni** costituiscono solo il **3-5% del tratto cortico-spinale**
 - hanno un ruolo fondamentale nel **controllo dei motoneuroni inferiori** per i **movimenti fini delle parti distali degli arti**
- La **maggioranza** dei neuroni del **tratto cortico-spinale** proviene da **altri neuroni piramidali più piccoli** situati:
 - nello **strato V** della **corteccia motoria primaria**
 - ma anche da aree **premotorie** e **cingolate**

Organizzazione della corteccia motoria



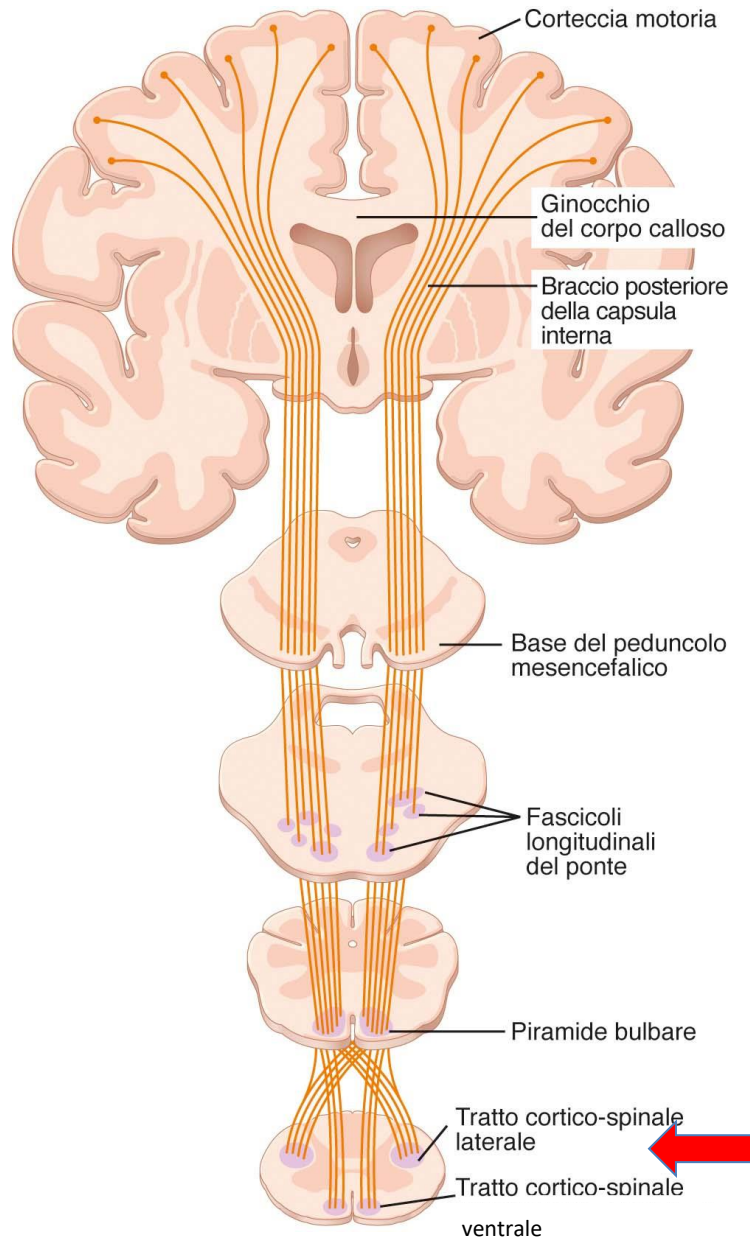
- La **corteccia motoria** è organizzata in **colonne verticali**
- Ogni colonna può attivare:
 - un **singolo muscolo**, oppure
 - un **insieme di muscoli sinergici**
- Ogni colonna rappresenta un'**unità di integrazione** che convoglia gli input verso i **neuroni dello strato V** (neuroni di output).
- **Tipi di neuroni motori corticali:**
 - **Neuroni dinamici** → si attivano **all'inizio della contrazione**, generando la forza iniziale
 - **Neuroni statici** → si attivano **per un tempo prolungato**, mantenendo la contrazione
- Durante la contrazione, informazioni di feedback provengono da:
 - **Fusi neuromuscolari e organi tendinei del Golgi** (co-attivazione $MN\alpha$ – $MN\gamma$),
 - **Recettori tattili cutanei** attorno ai muscoli in contrazione (es. presa di un oggetto).

Vie di controllo motorio discendenti: tratti cortico-bulbare e cortico-spinale



- Gli assoni che costituiscono il tratto **corticospinale** originano:
 - per il **30%** dalla **corteccia motoria primaria**
 - per il **30%** dalla **corteccia premotoria e supplementare**
 - per il **40%** dalle **aree somatosensoriali**
- Dalle aree corticali, i fasci assonali scendono lungo la **capsula interna** (tra nucleo caudato e putamen), quindi attraversano il tronco encefalico formando:
 - i **peduncoli cerebrali** (*crus cerebri*) del mesencefalo
 - i **fasci longitudinali** del ponte
 - e infine le **piramidi bulbari** nel midollo allungato

Vie di controllo motorio discendenti: tratti cortico-bulbare e cortico-spinale



- A livello del **midollo allungato**, la **maggior parte delle fibre decussa** e scende lungo il midollo spinale formando i **tratti corticospinali laterali**
- Questi tratti forniscono innervazione **diretta*** o **indiretta** (tramite interneuroni locali) ai **MN α laterali**, che controllano i movimenti dei **muscoli distali degli arti**
- *Le sinapsi dirette tra MN superiori (neuroni corticospinali) e MN α si osservano quasi esclusivamente nei motoneuroni che innervano i muscoli distali dell'arto superiore, in particolare della mano e delle dita*
- Le fibre che **non decussano** scendono nella **parte ventro-mediale** del midollo spinale, formando i **tratti corticospinali ventrali (anteriori)**
- Innervano **motoneuroni mediali** in modo **bilaterale**, con una parte che decussa a livello **cervicale o toracico**
- Controllano i **muscoli del tronco** e i **muscoli prossimali degli arti**.