

# Neurone ed informazione: essere o non essere?

## Premessa:

E' difficile introdurre un concetto come quello di informazione nell'essere umano, anche asserendo in via generica che possa essere ciò che oggettivamente percepiamo dall'esterno, ovvero i dati confluenti nei nostri sistemi adibiti alla memorizzazione: dati che rappresentano un punto di partenza per interfacciarci con il mondo che ci circonda. Se c'è una cosa infatti che abbiamo imparato a comprendere di come ciò che sia posizionato fisicamente al di fuori del nostro apparato intellettuale possa imprimere un ricordo nel suo interno, è che lo stesso rilasci informazioni da noi captate e contemporaneamente entrate nella nostra reminiscenza. Non sono necessariamente solo oggetti di cui debba essere presente una forma materiale, ovvero direttamente rilevata dal nostro apparato sensoriale innato: difatti sebbene sia vero che visualizziamo nel nostro pensiero ad esempio il colore del cielo o il verso di un animale, allo stesso tempo possiamo assegnare valori numerici a determinati elementi, come peso e misura ed anche concettualizzare forme astratte come economia, politica o addirittura lo stesso oggetto di questa disquisizione: difatti la stessa parola "informazione" ha per proprio significato etimologico la dicitura "che non ha forma". Potremmo proporre altri infiniti esempi, ma (come ci suggeriscono coloro che prima di noi si sono imbattuti in questo problema), è impossibile interloquire in un qualsiasi argomento senza avere un termine comune di riferimento inequivocabile. Per applicare questa definizione a ciò di cui stiamo parlando potremmo formulare la seguente domanda: di cosa si compone di preciso un'informazione e come questa può essere definita in modo univoco?

## L'approccio classico

Per inquadrare dunque cosa sia un'informazione potremmo riprendere dalla definizione citata all'inizio ed asserire che si componga di ciò che sappiamo, ovvero ciò che abbiamo imparato memorizzando una determinata quantità di dati elaborata in un rispettivo arco temporale, limitatamente alle nostre capacità acquisitive ed assimilative. Asseriamo dunque che lo stadio finale di questa procedura possa creare i nostri ricordi: un pensiero classico, formulato dall'alba dei popoli. Difatti da quando appunto è a noi pervenuta informazione (tanto per rimanere in tema) di civiltà esistite nel passato, gli esseri umani hanno sempre avuto una certa curiosità nell'ubicazione dei propri ricordi, arrivando ad identificarli con il nostro *io cosciente*. Curiosità più che legittima, dato che all'atto pratico per molti rappresenta il confine fra ciò che definiamo esistenza e inesistenza. Volendo citare un po' di storia, in passato l'unico studio attuabile è stato per secoli la sola disquisizione sugli stessi (data la limitatezza di strumenti tecnologici per calcolare tali dati), in modalità generalmente inquadrate in termini di filosofia, teologia, esoterismo e così via (tanto per citare alcune fra le molteplici dottrine che si siano occupate di tale problema). Ovviamente un modo che potrebbe da alcuni essere additato come riduttivo e privo di riprova scientifica, che però ci indica l'ingente sforzo compiuto: difatti per ogni popolo di cui abbiamo scoperto l'esistenza si sono sempre rinvenute prove, sia di trasmissione scritta che orale, dei quesiti riguardanti vita, morte, aldilà. Altrettanta cautela nel parlarne ne è stata prestata abbondantemente a qualsiasi livello. Si può citare il piano religioso, che nella maggioranza delle sue dottrine pone un dualismo tra la fisicità di un individuo e la sua anima incorporea, senza porsi il problema (talvolta asserendo come non rispettoso o

proibito il poter dibattere sull'argomento) di dove si trovi tangibilmente la sua eventuale collocazione spaziotemporale. Dal lato filosofico, pur potendosi in linea di massima dialogare senza dogmi prefissati, si sono comunque approvate soluzioni approssimative (senza entrare nei dettagli): da Parmenide a Socrate, da Platone ad Aristotele, dal cartesiano "Cogito ergo sum" al finito/infinito di Hegel, (tanto per citarne alcuni); soluzioni che di fatto, pur non rispondendo al problema della definizione ed ubicazione fisico/biologica strumentalmente verificata dell'informazione, sono sempre però state accettate con una sorta di convinzione positivista che si fossero percorsi notevoli passi in avanti, sebbene siano di fatto poco o nulla attinenti alle basi di sussistenza informativa precedentemente poste come incipit della ricerca e dal definirle in una modalità inequivocabile.

## L'approccio matematico

Il pensiero classico precedentemente esposto, sebbene sia per noi intuitivo, rimane deficitario di innumerevoli dettagli, a partire da come possiamo estrapolare un determinato elemento contenuto in un insieme di origine, ovvero circoscrivere nel totale quella parte a noi utile: questo per molteplici fini, a cominciare dal poter essere in grado di riprodurlo e comunicarlo meglio ad un terzo ricevente. Ad esempio poniamo il seguente problema: ricavare da un'osservazione satellitare di una foresta l'informazione dei soli alberi con le foglie ingiallite, rispetto al totale di tutto ciò che l'ambiente contenga. Per dare un approccio con un'infarinatura più tecnica (senza mettere in secondo piano gli innumerevoli matematici, ingegneri, fisici e studiosi che vi si siano cimentati) potremmo citare un frammento della teoria formulata da Shannon nella prima metà del XX secolo, dove per la prima volta si iniziarono a coniare termini come *entropia informativa*, *autoinformazione*, *sorgente di un evento*. L'informazione totale (nel caso specifico rappresentata da tutto l'ambiente forestale) può a sua volta essere divisa in sottoinsiemi informativi (animali, corsi d'acqua, pesci e così via) che a loro volta sono scomposte in *unità comunicative*, ovvero in parti sotto le quali si pone l'assioma che non si possa scendere. Nel caso esemplificativo della foresta, se si scoprisse durante le osservazioni una macchia giallastra composta di sole foglie appassite a terra, sebbene si intenda sempre in via probabilistica, questa potrebbe indicare la presenza di alberi con le foglie ingiallite, ovvero che soddisfino in modo parziale o totale il quesito. Questa condizione di probabilità viene definita *entropia informativa*: si potrebbe dire quindi che la macchia gialla possiede un valore di entropia molto più alto rispetto alle comuni macchie verdi, la cui probabilità di essere osservate in un ambiente composto da alberi è maggiore, quasi scontata. Ovviamente possono essere introdotti ulteriori elementi informativi come ad esempio un bollettino meteo che segnali un'improvvisa tempesta di neve: questo modificherebbe sostanzialmente l'*entropia informativa* delle zone verdi, in quanto diverrebbe più probabile osservare zone bianche innevate, senza contare che a sua volta il bollettino stesso assumerebbe un'*entropia informativa* alta. Riassumendo, più la sorgente informativa contiene ripetizioni, meno entropia probabilmente possiederà. Dunque l'informazione  $I(x)$  viene calcolata da  $I(x) = -\log_2 P(x)$  dove  $P(x)$  è la probabilità che quell'informazione sia verificata: tra l'informazione stessa e la sua probabilità vi è una relazione inversamente proporzionale (un'alta probabilità porta ad una bassa quantità di informazione e viceversa). Come detto precedentemente, le *unità comunicative* provenienti da una fonte casuale emissiva non possono essere rappresentate con un numero di elementi inferiori a quelli necessari al mantenimento della loro

*entropia informativa*: questo per evitare la perdita parziale o totale dell'unità e quindi dell'informazione stessa.

Senza soffermarci troppo sui dettagli, Shannon definì in *nat* l'unità di misura base per l'*entropia*: questa è basata su logaritmi naturali e potenze, rispetto ai logaritmi in base 2 che definiscono il bit (questa voluta associazione si deve al fatto che fra gli scopi della teoria informativa vi era quello di applicarla ai sistemi binari dei calcolatori elettronici), pertanto si fece corrispondere un *nat* a circa 1,44 bit ovvero  $\left(\frac{1}{\ln 2}\right)$ .

D'altronde lo stesso Shannon scrisse: "*N* variabili casuali, ognuna con *entropia*  $H(x)$  possono essere compresse in più  $NH(X)$  bit con una probabilità di perdita di informazione piccola a piacere, al tendere di *N* all'infinito; al contrario, se sono compresse in meno di  $NH(X)$  bit è virtualmente certo che una parte dell'informazione andrà persa".

Si può dunque introdurre il concetto di *autoinformazione* ovvero l'informazione ottenuta dall'affermazione certa della realizzazione dell'evento stesso; per cambiare prospettiva la si può definire anche come la quantità di incertezza associata alla realizzazione di un evento, ovvero un evento si realizza quando si rimuove l'incertezza che non possa realizzarsi. Il legame esistente tra incertezza e probabilità è infatti strettamente correlato: senza incertezza non c'è informazione, e quanta più incertezza c'è nel segnale aleatorio, tanto più informativo è rivelare quale sia la natura del segnale (ovvero è a sua volta informazione capire cosa lo sia e cosa no). Per capire lo stretto legame tra il concetto di *autoinformazione* rispetto alla sua probabilità di realizzarsi si può porre la seguente associazione: l'*autoinformazione* di un evento A che abbia probabilità  $p(a)$  di accadere è la quantità

$I : A \rightarrow \log \frac{1}{p_A}$  ovvero  $I : A \rightarrow -\log p_A$ . Tale definizione soddisfa tutti gli elementi del calcolo probabilistico in oggetto. Come detto sopra se il logaritmo è in base 2, l'*autoinformazione* è misurata in bit, se invece viene usato il logaritmo naturale, si misura in *nat*. Per passare dalla prima alla seconda quantità, basta moltiplicare per  $\ln 2$ . A sua volta la probabilità dell'informazione emessa può dipendere da eventi occorsi in precedenza: si parla in questo caso di sorgente con *memoria informativa*, ovvero con dipendenza dallo stato della sorgente, (sorgente con memoria). L'*entropia informativa* delle sorgenti con memoria è ovviamente minore di quella di una sorgente che non ne abbia, poiché in questo contesto eventi emessi possono dipendere (in una certa quantità) da quelli emessi precedentemente, il che li rende più prevedibili.

Senza scendere in ulteriori approfondimenti matematici, da questo modello si evince che l'informazione di un evento può essere vista come la quantità di elementi certi che definiscono l'evento stesso, ovvero propriamente accaduto, rispetto a tutti gli altri possibili. Probabilità logaritmica poiché si considerano eventi separati la cui possibilità di realizzarsi è il prodotto delle singole probabilità affinché l'*entropia informativa* totale sia la somma delle *entropie informative* dei singoli eventi. Da questo approccio si inizia a definire inequivocabilmente come, da qualsivoglia sfaccettatura la si possa identificare, ciò che sia stato individuato come forma di esistenza non solo debba obbligatoriamente possedere *entropia informativa*, ma che la modalità attraverso la quale si possa catalogare debba necessariamente anche essere stata definita inconfontabilmente; condizioni che rappresentano un cardine tanto ineludibile quanto delineante per il nostro stesso universo. Diviene dunque possibile a questo punto ampliare lo spettro di definizione e manifestazione della realtà stessa: da ciò che possiamo percepire direttamente (il calore o la luce limitatamente alle temperature e frequenze rilevabili dal nostro campo sensoriale e

visivo), a ciò che non possiamo neppure scorgere (la luce infrarossa o ultravioletta), da ciò che è possibile rilevare con l'ausilio della nostra tecnologia (le forme di vita invisibili ad occhio nudo presenti nel microcosmo), a ciò che non possiamo a data attuale rilevare ma se ne sono ipotizzati gli effetti (i fenomeni che definiamo materia ed energia oscura nel macrocosmo fanno parte di questa categoria): in tutti questi elementi si può infatti rilevare *entropia informativa* a in qualsivoglia forma e grandezza, quindi informazione.

## Entropia informativa nei neuroni

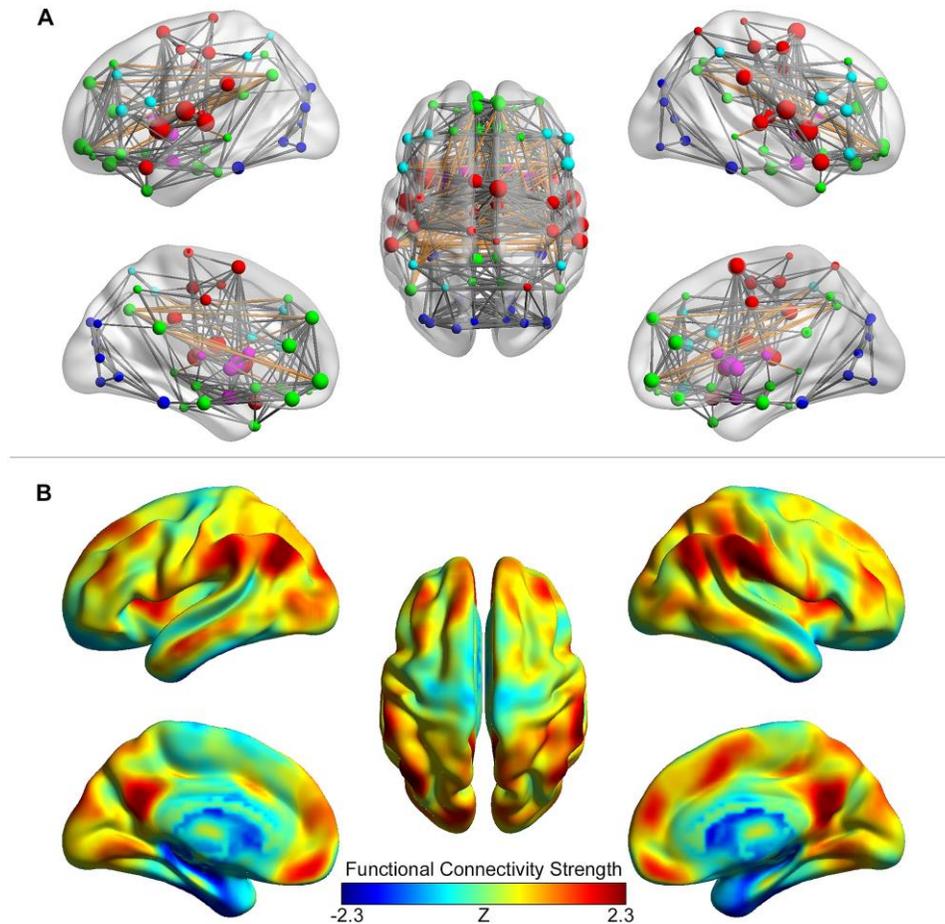
Per rendersi conto di come l'applicazione della teoria dell'entropia informativa possa facilitare lo studio e l'analisi selettiva dell'attività sinaptica del cervello, è utile immaginare un insieme di neuroni come un sistema che risieda in uno stato di base: ovvero supponiamo che la maggioranza dei neuroni siano in uno stato di sinapsi attive, rispetto a quelli che si trovino nel potenziale di riposo (la premessa che l'area neurale in oggetto sia sempre con percentuale maggiore attivata deriva dalla condizione fisiologica nella quale normalmente le sinapsi attive sono sempre presenti in un grandissimo numero, e quelle a riposo vengono attivate da una risposta ad stimolo esterno indipendente dalla condizione già esistente). Una tale semplificazione astratta aiuta a catturare l'essenza dell'interpretazione entropica della funzione del cervello in assenza di stimoli di attivazione. Associando quindi l'attivazione del neurone in concezione booleana (si tenga presente la similitudine stessa dell'impulso neurale *all-or-none* ad un sistema binario), si può porre lo stato in potenziale di riposo a "0" e lo stato attivato in "1". In un insieme neurale di grandezza N potranno quindi esistere  $2^N$  modi possibili in cui gli schemi di attivazione dell'insieme stesso si possano combinare: se N=3 ci saranno 3 neuroni ( $n_1, n_2, n_3$ ) ed il loro percorso di attivazione potrà organizzarsi in  $2^3$  ovvero ( $n_1=0, n_2=0, n_3=0$ ), ( $n_1=0, n_2=0, n_3=1$ ), ( $n_1=0, n_2=1, n_3=1$ ), fino ad arrivare a ( $n_1=1, n_2=1, n_3=1$ ). Se si assume che solamente un numero minimo di queste possibilità possa rappresentare lo stato di una specifica area cerebrale in potenziale di riposo, risulta evidente che le disposizioni dello stato dell'area attivata superi di gran lunga la rappresentazione della funzione del cervello al suo stato di riposo. Continuando su questa linea di astrazione, saranno dunque molti gli stati in cui neuroni attivi possano provocare l'attivazione neurale del piccolo sottoinsieme rappresentante la funzione del cervello al suo stato di riposo. Supponiamo dunque che in questo sistema avvengano uno o più stimoli: si avrebbe una maggiore probabilità che l'insieme dei neuroni preso come riferimento possa attivare anche la zona a riposo. Facendo ad esempio riferimento all'equazione dell'entropia contenuta in una sorgente informativa con variabile dell'insieme dei valori a numero finito (o *discreto*,

matematicamente parlando) 
$$H = - \sum_{p_i} p_i \log_2 (p_i)$$
, dove con **H** possiamo intendere l'entropia già calcolata e ***p<sub>i</sub>*** è la possibilità che un evento informativo ***i*** possa accadere (ovvero un evento possedente entropia informativa maggiore), si evidenzia la correlazione fra evento singolo con alta entropia informativa ed entropia dell'insieme che aumenta durante la risposta allo stimolo stesso. Usando il logaritmo base 2 (che così come proposto da Shannon è anche facilmente adattabile in modelli informatici) si potrà ad esempio individuare la correlazione fra impulso neurale, la risposta neurale scaturente e l'entropia informativa presente prima e dopo.

Senza scendere in ulteriori matematici dettagli, partendo da questo primo approccio fino ad arrivare alla correlazione fra le aree cerebrali attraverso funzioni con variabili continue (ovvero non finite), è stato

possibile definire in termini numerici la differenza fra gli stadi di attivazione neurale da una corteccia cerebrale “a riposo” a quando si trovi in stato di attivazione in aree specifiche, partendo dalle funzioni motorie fino ad arrivare alle ragioni recettive, sensoriali, cognitive, come ampiamente dimostrato dai molteplici studi effettuati tramite rilevamento dell’attività elettrica del cervello stesso e risonanza magnetica funzionale, dati che hanno rappresentato la base per la definizione moderna dell’*entropia cerebrale* stessa.

Applicazione di “entropia informativa” calcolata nella corteccia in base alle connessioni funzionali attive (software BrainNet Viewer)



## Il Sistema Nervoso Centrale:

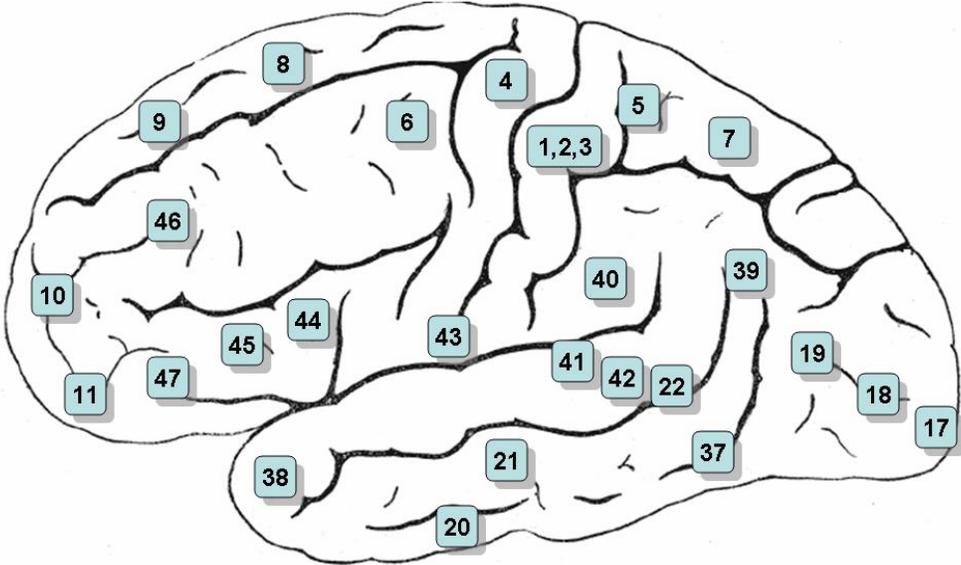
Dunque si può definire un’esagerazione la delicatezza da una parte o il tecnicismo dall’altra con cui si è sempre trattato il tema del nostro essere, a prescindere dalla natura delle asserzioni su di esso elaborate (ovvero se possano essere scaturite tanto da riprove scientifiche esigue quanto da più accurate basi matematiche o fisiche)? La scienza moderna potrebbe rispondere a questo interrogativo: la localizzazione dei nostri ricordi, anche secondo le più recenti analisi, è fra le cose più complicate in cui ci siamo mai imbattuti (come d’altronde la sua stessa struttura funzionale), pertanto non sembra ingiustificata la precauzione dell’approccio nella dottrina del pensiero, essendo universalmente, nel significato letterale del termine (è proprio il caso di dirlo), un argomento di assai difficile disquisizione

rispetto a qualsiasi altro termine di paragone. Per fortuna, grazie ad una visione più razionale e meno dogmatica (che parte da rappresentazioni tramite modelli matematici come quelli esposti prima, fino ad arrivare agli ultimi strumenti tecnologici in nostro possesso), di passi in avanti se ne sono fatti, almeno ad un livello biologico cellulare e medico: è ormai universalmente accettato dalla comunità scientifica che i nostri pensieri, i nostri ricordi e pertanto la nostra esistenza, siano contenuti in ciò che viene definito *corteccia cerebrale* (con particolare riferimento alla zona ippocampale), altresì chiamata materia grigia, con uno spessore che va dai 2mm ai 5mm. Essa è uno strato continuo che tende ad estendersi sul piano, rappresentando la parte più esterna, ovvero il *telencefalo* (cioè stratificato nella zona terminale) in tutti gli esseri vertebrati: è costituita dai *neuroni* (ovvero le cellule definite cerebrali), dalle cellule *gliali* (che hanno compiti nutritivi per i neuroni stessi ed assicurano l'isolamento dei tessuti nervosi e la protezione da corpi estranei in caso di lesioni) e da fibre nervose *amieliniche* (ovvero senza isolanti lipido-proteici). La corteccia cerebrale è il perno focale di tutte le nostre funzioni mentali cognitive complesse dal pensiero alla memoria, dai recettori sensoriali al linguaggio e così via; questa fa parte di una più ampia struttura: il cervello, che a sua volta fa parte del sistema nervoso centrale. In natura tutto è delineato da un peculiare schema strutturale e la modalità in cui si forma il nostro sistema sinaptico non fa eccezione né per precisione temporale costitutiva né per complessità. Premettendo, a data attuale, l'assenza di un unisono accordo nella comunità scientifica su quando effettivamente possa iniziare l'attività elettrica neurale (questo anche a causa delle difficoltà nell'individuazione della stessa con metodi non invasivi, anche se l'esame tramite elettroencefalogramma ha evidenziato dati non sempre stabili dalla terza settimana in poi), risulta invece più compreso il processo di *neurogenesì*, ovvero la formazione dei neuroni. Quest'ultimo inizia già dalla *gastrulazione* cellulare (fase in cui le cellule si dividono per formare gli organi vitali) che avviene dalla seconda settimana di gestazione, dopo la quale inizia a formarsi la *placca neurale*. Fra la terza e la quarta settimana si evidenzia la *neurulazione*, fenomeno in cui la *placca neurale* gradualmente si espande (piegandosi ed infossandosi all'interno dell'embrione dando origine al *tubo neurale*, che formerà il sistema nervoso centrale e la colonna vertebrale) definendo le regioni nelle quali le cellule si differenziano per compiti e funzioni. Dopo la chiusura del *tubo neurale* avviene la *neurogenesì* vera e propria, partendo dalle cellule staminali cerebrali stesse che si delineano nei diversi tipi di neuroni conosciuti. Il sistema nervoso centrale è composto dall'*encefalo* (costituito da *cervello*, *diencefalo*, *cervelletto* e *tronco encefalico* con neuroni disposti generalmente in zona *supracorticale*) e dal *midollo spinale* (anch'esso ricco di neuroni che però inversamente alla corteccia cerebrale sono situati principalmente in zona *sottocorticale* e coperti dalla cosiddetta *sostanza bianca*). Il ritmo di produzione neurale aumenta dalla settima-ottava settimana fino agli ultimi mesi di gestazione arrivando ad un limite di 250.000 neuroni al minuto circa; nell'ultimo mese questo processo rallenta e si iniziano a creare le connessioni neurali, scartando contemporaneamente i neuroni che non riescono a creare sinapsi fra di loro. In tutto questo periodo si sono formate dagli 80 ai 100 miliardi di cellule neurali, un numero tutt'altro che trascurabile se si considera che sono contenute in una media di 1200cm<sup>3</sup> con un peso di 1,4kg. Ancora in discussione è la *neurogenesì* negli individui dopo la nascita e dopo la maturità, ovvero la produzione e la finalità di nuove cellule cerebrali nel corso della vita: se da una parte ne sono state osservate alcune più recenti rispetto all'età biologica di un individuo, dall'altra si è constatato che il loro numero è limitato rispetto all'immensa produzione sviluppata prima della nascita. Anche il numero di connessioni sinaptiche è tutt'altro che esiguo: considerando che ogni neurone dei primati umani effettua da 1000 a 10000 giunzioni con i neuroni in

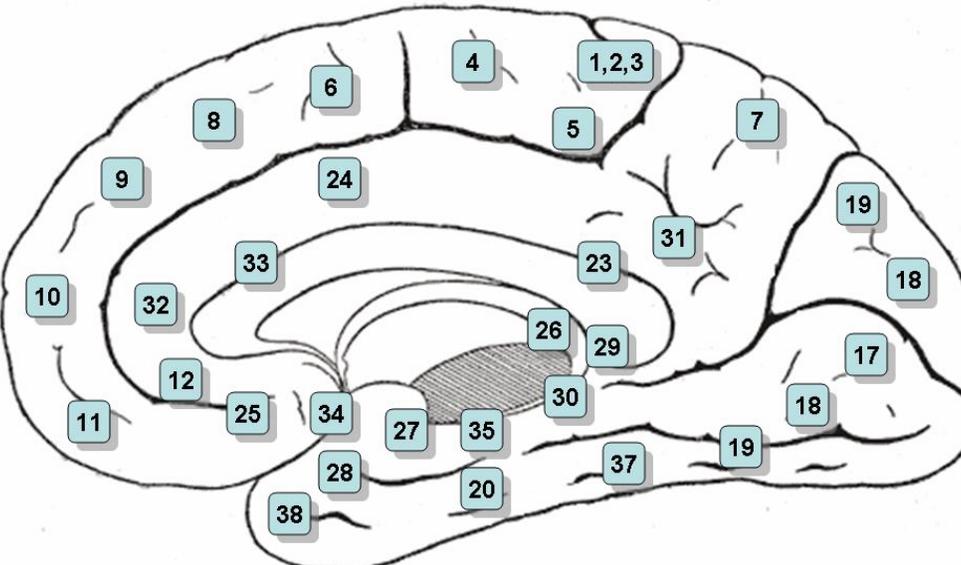
prossimità, si può facilmente intuire l'immensa quantità di connessioni gestite, ovvero un numero che va dalle  $10^{14}$  alle  $10^{16}$  sinapsi.

Come accennato in precedenza, la corteccia cerebrale si occupa di tutte le nostre funzioni neurali complesse: tali funzioni sono svolte in aree delineate con funzioni specifiche altresì chiamate *aree di Brodmann*. Sebbene queste rappresentino una differenziazione del sistema organizzativo della corteccia cerebrale dei primati ampia ed esaustiva c'è comunque da aggiungere che sono oggetto di dibattito scientifico fin da quando si è ipotizzata la localizzazione settoriale delle funzioni sinaptiche, in quanto definite solo in base all'organizzazione neurale generica e non strettamente correlate dalle funzioni corticali specifiche: infatti a data attuale per stabilire con esattezza a quale area appartenga una porzione della corteccia di un singolo individuo si rende necessario un esame istologico. In aggiunta alcune aree non sono state del tutto confermate poiché rilevate solo da esami neurofisiologici o di risonanza magnetica: questo ad ulteriore conferma di quanto sia complessa l'organizzazione cerebrale. Segue uno schema esemplificativo con le relative aree di interesse; tale schema si riferisce alla denominazione originale con alcune aree a loro volta suddivise in sottozone correlate per compiti.

Rappresentazione della superficie laterale del cervello con le aree di Broadmann numerate



Rappresentazione della superficie mediale del cervello con le aree di Broadmann numerate



Area 3, 1 e 2 - Corteccia somestesica primaria (vengono elencate nella sequenza: "aree 3, 1, 2" per convenzione).

Area 4 - Corteccia motoria primaria.

Area 5 - Corteccia associativa somatosensoriale.

Area 6 - Corteccia premotoria e corteccia motoria supplementare (corteccia motoria secondaria) (area motoria supplementare).

Area 7 - Corteccia associativa somatosensoriale.

Area 8 - Include i campi oculari frontali.

Area 9 - Corteccia prefrontale dorsolaterale.

Area 10 - Corteccia anteriore prefrontale (la parte più rostrale della circonvoluzione frontale superiore e media).

Area 11 - Area orbitofrontale (circonvoluzione orbitale e circonvoluzione retta, più parte dell'area rostrale della circonvoluzione frontale superiore).

Area 12 - Area orbitofrontale (precedentemente inclusa nella BA11, è l'area tra la circonvoluzione frontale superiore e il solco rostrale inferiore).

Area 13 e Area 14 - Parte del lobo dell'insula.

Area 15 - Lobo temporale, parte anteriore.

Area 16 - Area presente nei Cercopitechi (famiglia di scimmie presente in Africa).

Area 17 - Corteccia visiva primaria (V1).

Area 18 - Corteccia visiva secondaria (V2, V3 e V3A).

Area 19 - Corteccia visiva associativa (V4 e V5).

Area 20 - Circonvoluzione temporale inferiore.

Area 21 - Circonvoluzione temporale media.

Area 22 - Circonvoluzione temporale superiore, la sua parte caudale viene considerata come la sede dell'area di Wernicke.

Area 23 - Corteccia posteriore del giro cingolato, parte ventrale.

Area 24 - Corteccia cingolata anteriore, parte ventrale.

Area 25 - Corteccia subgenuale (coinvolta nella depressione, facente parte della corteccia prefrontale ventrocentrale).

Area 26 - Area ectosplenica della regione retrosplenica della corteccia cerebrale.

Area 27 - Corteccia piriforme.

Area 28 - Corteccia entorinale, parte posteriore.

Area 29 - Giro cingolato, parte retrosplenica.

Area 30 - Parte del giro cingolato.

Area 31 - Corteccia cingolata posteriore, parte dorsale.

Area 32 - Corteccia cingolata anteriore, parte dorsale.

Area 33 - Parte della corteccia cingolata anteriore.

Area 34 - Corteccia entorinale anteriore (nella circonvoluzione paraippocampale).

Area 35 - Corteccia peririnale (nella circonvoluzione paraippocampale).

Area 36 - Area utorinale, adesso parte della corteccia peririnale (solco rinale).

Area 37 - Circonvoluzione fusiforme.

Area 38 - Area temporopolare (è la parte più rostrale delle circonvoluzioni temporale superiore e media).

Area 39 - Giro angolare, considerata da alcuni come parte dell'area di Wernicke (parola udita).

Area 40 - Circonvoluzione sopramarginale considerata da alcuni come parte dell'area di Wernicke.

Aree 41 e 42 - Corteccia uditiva.

Area 43 - Corteccia gustativa, area subcentrale (tra l'insula e la circonvoluzione post precentrale).

Area 44 - Opercolo, parte della circonvoluzione frontale inferiore e parte dell'area di Broca.

Area 45 - Parte triangolare, parte della circonvoluzione frontale inferiore e parte dell'area di Broca.

Area 46 - Corteccia prefrontale dorsolaterale.

Area 47 - Porzione orbitale, parte della circonvoluzione frontale inferiore.

Area 48 - Area retrosubiculare (piccola parte della superficie mediale del lobo temporale).

Area 49 - Area parasubiculare nei roditori.

Area 50 - Collegata alla circonvoluzione temporale, non ancora chiaro se integrativa delle aree 22 e 23 o con funzioni specifiche.

Area 51 - Area prepiriforme presente nel Cercoletto, mammifero della famiglia dei procionidi.

Area 52 - Area parainsulare (nella giunzione del lobo temporale con il lobo dell'insula, presente solo in alcuni primati non umani con funzioni di richiamare l'attenzione).

*Nota: le aree 16 e 52 appartengono a primati non umani, l'area 49 è stata identificata in alcune famiglie di mammiferi roditori, mentre l'area 51 è stata osservata in alcuni procionidi.*

Ad integrazione si osservi che il telencefalo non è un unico strato ma è a sua volta diviso in due formazioni, chiamate emisferi e collegati fra loro da ciò che viene definito *corpo calloso*. La funzione principale del *corpo calloso* è di permettere lo scambio di informazioni motorie, sensitive e cognitive tra i vari lobi dei due emisferi cerebrali: è infatti formato da un fitto fascio di *assoni*, che si comportano come canali conduttori di impulsi cerebrali. Gli emisferi sono praticamente identici e speculari da un punto di vista fisico/volumetrico, ma con funzioni differenti (o invertite come la corteccia visiva ed uditiva) rispetto alle corrispettiva parte sinistra o destra.

Sommariamente le funzioni dell'emisfero cerebrale sinistro sono:

I movimenti volontari della parte destra del corpo umano.

La capacità di articolare un discorso e di produrre un testo scritto. Questa abilità risiede nell'area di Broca, dal nome del neurologo Paul Broca (area 44 e 45 secondo la nomenclatura di Broadmann).

La comprensione del linguaggio; tale abilità si spartisce tra l'area di Broca e l'area di Wernicke, dal nome del lo psichiatra Carl Wernicke (area 22 secondo la nomenclatura di Broadmann).

Il ragionamento logico.

La capacità di calcolo. Questa abilità prende posto sul lobulo parietale inferiore del lobo parietale;

Il pensiero analitico.

Le funzioni dell'emisfero cerebrale destro sono invece :

I movimenti volontari della parte sinistra del corpo umano.

La capacità di identificare gli oggetti.

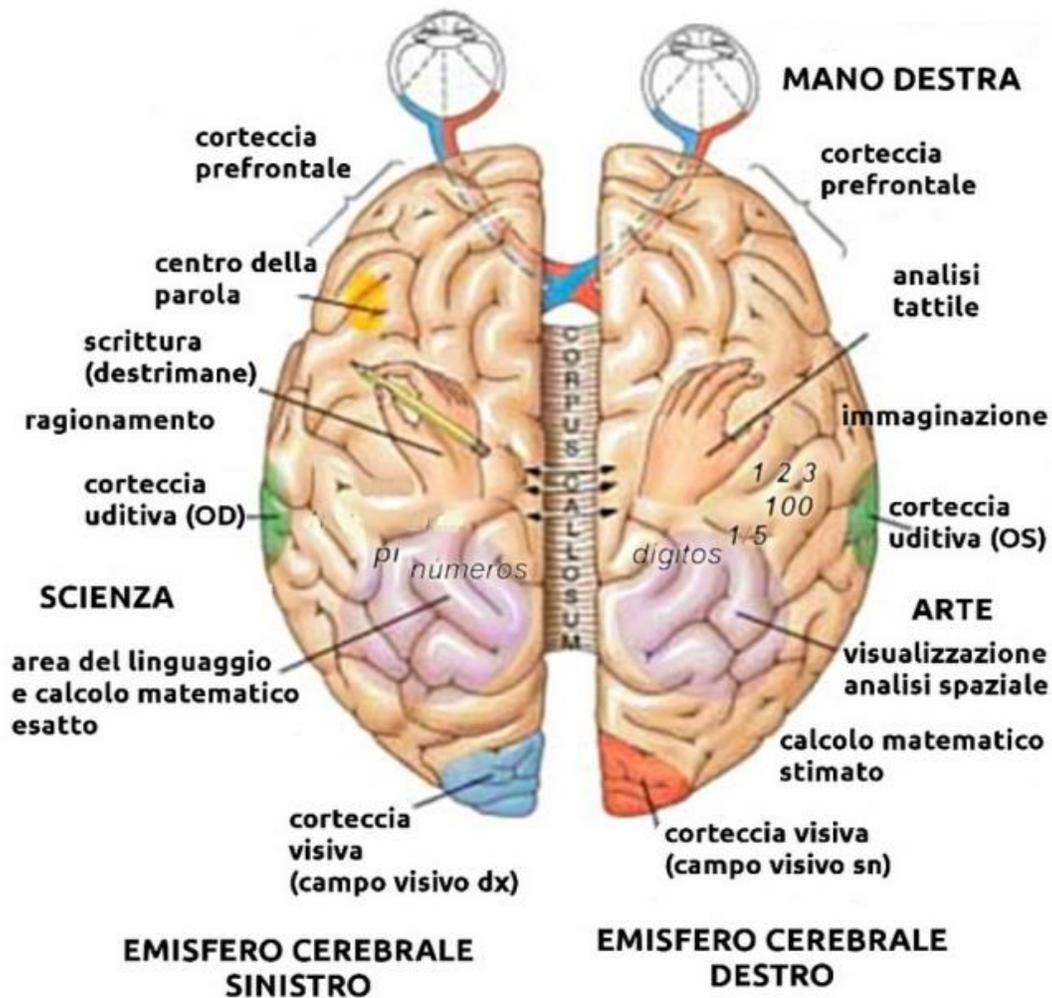
L'orientamento spaziale.

La creatività e l'immaginazione.

La capacità di intuizione.

L'intonazione e l'enfasi nel linguaggio.

## Rappresentazione grafica delle funzioni degli emisferi



## Analisi e classificazione delle cellule neurali:

I neuroni sono cellule somatiche (ovvero che costituiscono il corpo di un organismo), pertanto il loro *soma* è simile ad ogni altra cellula somatica del nostro corpo. Le differenze che le rendono idonee alle funzioni sinaptiche sono caratterizzate principalmente dai due prolungamenti citoplasmatici che presentano: questi a loro volta si differenziano in *dendriti* e *assone*. I dendriti sono adibiti alla ricezione dei segnali provenienti dai neuroni limitrofi, il loro numero è determinato dalla funzione svolta, e indirizzano gli impulsi ricevuti al centro della cellula, mentre l'assone è un prolungamento unico (in quanto ogni neurone ne ha solo uno) che consente di raggiungere altri neuroni. Nella parte terminale dell'assone sono presenti i cosiddetti *bottoni sinaptici* che a loro volta si collegano con dendriti (o anche direttamente al soma) di altri neuroni. Questo processo è strutturato in modo da poter propagare ogni impulso a cascata, innescando quella reazione a catena fondamentale per il funzionamento della rete neurale stessa. Importante notare che l'assone delle cellule neurali può essere ricoperto da due membrane protettive (i neuroni della corteccia cerebrale appartengono a questa categoria, mentre ad esempio i neuroni che trasmettono impulsi elettrici a muscoli involontari non lo sono): questa ricopertura protegge l'assone impedendo la dispersione degli impulsi elettrici. La membrana più esterna

prende il nome di *neurolemma* (o guaina di Schwann), quella più interna di *guaina mielinica*. Lungo il *neurolemma* sono presenti delle interruzioni, in corrispondenza delle quali la guaina mielinica termina e sono definite *nodi di Ranvier*: questi essendo di fatto delle zone aperte che espongono la membrana assonale all'ambiente extracellulare assicurano una conduzione più rapida degli impulsi nervosi (*conduzione saltatoria*) proprio perché, essendo la mielina un isolante elettrico, il potenziale elettrico può propagarsi saltando da un nodo all'altro grazie alla piccola dispersione di carica.

I neuroni possono essere classificati in base al numero e alle ramificazioni dei prolungamenti, ottenendo in questo modo:

Neuroni unipolari: il nucleo ha valore di sito recettore

Neuroni bipolari: hanno un solo dendrite che si articola agli antipodi del soma

Neuroni multipolari: mostrano molteplici dendriti

(si ricorda che ogni neurone possiede un solo assone)

Inoltre, è possibile classificare i neuroni in base all'aspetto presentato:

Piramidale, i cui dendriti alla base si distribuiscono in senso orizzontale, mentre il dendrite apicale si sviluppa in altezza. L'assone si estende nelle zone corticali della corteccia.

Stellato, definite anche granuli, in cui i dendriti si ramificano nelle immediate vicinanze del soma e l'assone comunica con le cellule adiacenti.

Fusiformenti, aventi alle estremità due terminazioni dendritiche e l'assone si dirige verso strati più superficiali.

Ogni neurone è imputato allo svolgimento di una serie di funzioni, per questo è anche possibile distinguerli in:

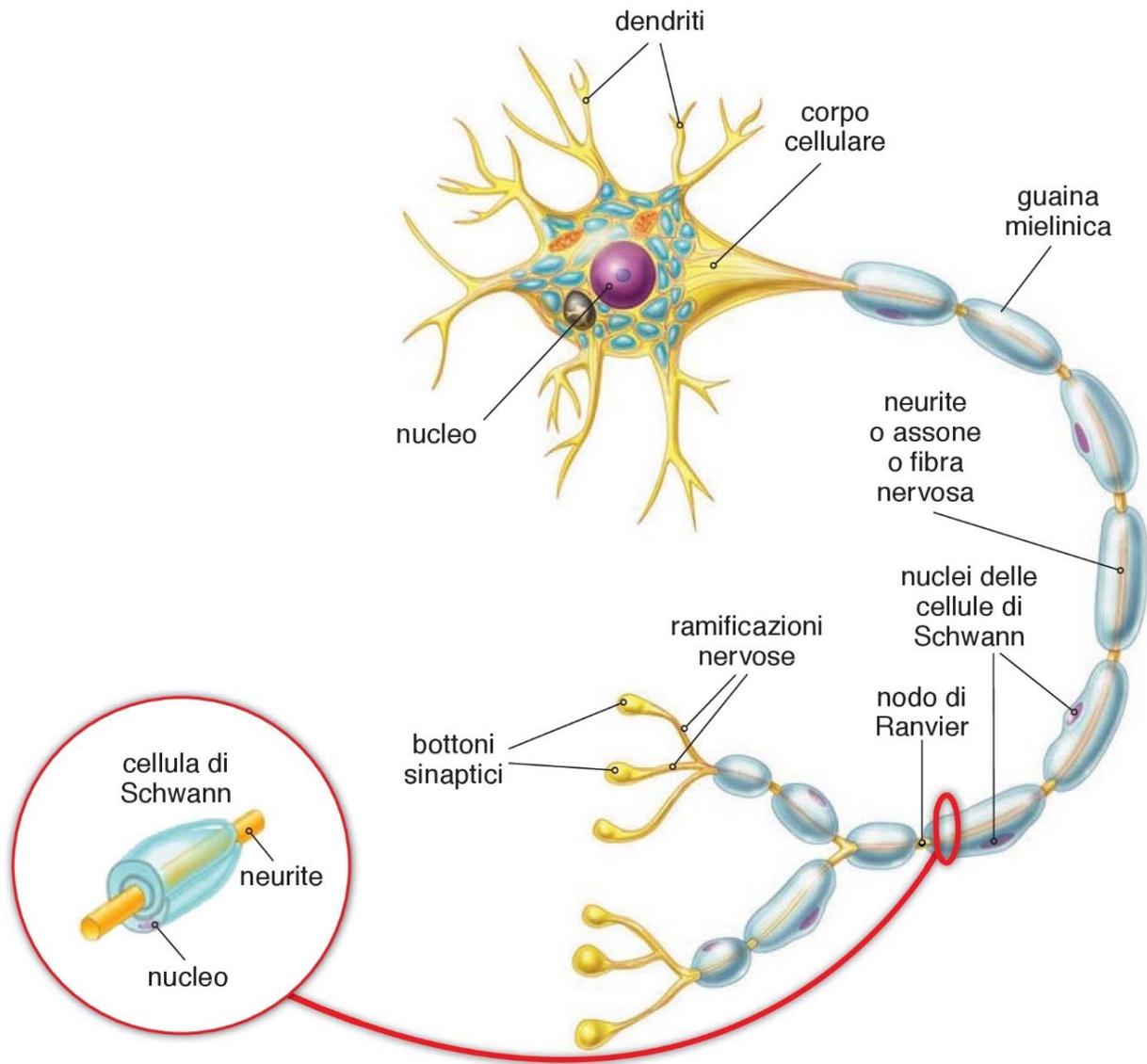
Neuroni sensitivi o afferenti: ricevono stimoli e trasportano l'informazione dagli organi sensoriali al sistema nervoso centrale.

Interneuroni o neuroni intercalari: integrano i dati forniti dai neuroni sensoriali e li trasmettono ai neuroni motori.

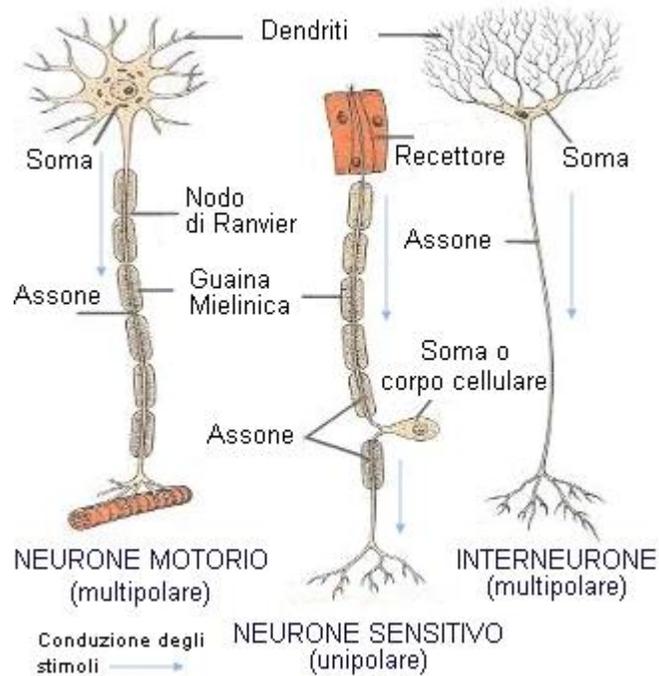
Neuroni motori: diffondono impulsi di tipo motorio agli organi della periferia corporea. A loro volta si dividono in neuroni *somatomotori*, i cui assoni formano fibre chiamate efferenti che innervano la muscolatura striata volontaria dell'organismo. Si differenziano ulteriormente in motoneuroni  $\alpha$ , ossia responsabili dell'effettiva contrazione delle fibre muscolari striate, e motoneuroni  $\gamma$ , che innervano gli organi sensoriali propriocettivi detti fusi neuromuscolari intercalati nella stessa struttura muscolare.

*Visceroeffettori*: sono coinvolti nelle risposte dei muscoli involontari o viscerali. Sono caratterizzati per dare origine a fibre dette *pregangliari* (dal midollo al ganglio) che si collegano sempre a un secondo neurone localizzato in un ganglio simpatico o parasimpatico, da cui origina la fibra *postgangliare* (dal ganglio al midollo).

Rappresentazione grafica della struttura di un neurone



## Esempi di tipologia di neuroni



I neuroni si classificano anche in base al tipo di neurotrasmettitore e si hanno i neuroni:

Colinergici: utilizzano come neurotrasmettitore l'acetilcolina.

Monoaminergici: utilizzano come neurotrasmettitore la serotonina e le catecolamine.

Aminoacidergici: utilizzano l'acido  $\gamma$ -amminobutirrico con funzione inibitoria.

Glutammatergici: utilizzano l'L-glutammato con funzione eccitatoria.

## La pompa sodio potassio nei neuroni:

Tutto il funzionamento delle cellule (e quindi tutto il nostro organismo) è regolato dal funzionamento elettrico: questo scandisce il battito cardiaco, regola l'assimilazione del cibo di cui ci nutriamo, ci consente di muoverci, ci permette di sentire suoni, emettere parole e così via. Questo è possibile, insieme ad altri fattori, grazie alla cosiddetta *pompa sodio-potassio* (detta anche *pompa  $Na^+/K^+$  ATP-dipendente* o  *$Na^+/K^+$  ATPasi*), che permette lo scambio di molecole delle cellule con l'esterno, fondamentali per la vita della cellula stessa. A questa regola ovviamente non sfuggono neppure le cellule neurali, con la fondamentale differenza che il suddetto meccanismo viene usato anche per un fenomeno essenziale allo scambio di impulsi, ovvero l'*eccitazione neurale*. Ogni neurone, a riposo, mantiene una differenza di tensione derivante dal *gradiente elettrochimico*, come una batteria mantiene la tensione tra i suoi poli ed è derivata dalla concentrazione di ioni sodio e potassio presenti all'esterno ed all'interno della membrana. Questa tensione di circa  $-70\text{mV}$  è indicata come il *potenziale di riposo* di un neurone. La membrana cellulare neurale contiene i cosiddetti *canali ionici*: questi sono pori formati da proteine che consentono selettivamente il passaggio di determinati ioni. Questi canali si aprono e si chiudono solo al raggiungimento di una determinata tensione, raggiunta la quale gli ioni possono entrare e uscire, facendo sì che la cellula si allontani dal suo *potenziale di riposo*. Questo avviene con

regole precise: se un neurone riceve, in modo singolo o continuo, piccole quantità di segnali in entrata, queste si traducono solo in piccole fluttuazioni nel voltaggio della membrana, (*potenziale graduato*) e non sono sufficientemente forti da provocare l'attivazione di un neurone, che rimane quindi a riposo. Il neurone infatti si attiva e genera un impulso nervoso solo quando la somma totale dei segnali in ingresso è abbastanza grande da superare una *soglia di potenziale* di -55mV. Raggiunta questa soglia si aprono i canali del sodio: questi canali, una volta aperti, permettono il flusso di ioni di Na<sup>+</sup> verso l'esterno della cellula, provocando la depolarizzazione del neurone, ovvero un'inversione di carica nella sua superficie interna da negativa a positiva. Quando la tensione raggiunge i 30mV avviene l'apertura dei canali del potassio, che consentono agli ioni K<sup>+</sup> di spostarsi dall'interno verso l'esterno, ripolarizzando lentamente la cellula, ovvero ripristinando la differenza di tensione negativa originaria: durante questa fase la membrana non può depolarizzarsi in quanto si chiude la pompa del sodio ed è altresì definita fase *refrattaria* (fase funzionalmente utile in quanto il segnale non può quindi tornare indietro e potendosi propagare unilateralmente viaggia in avanti fino al segmento successivo della membrana). Il processo di chiusura dei canali ionici di potassio avviene più lentamente, facendo scendere la tensione al di sotto del potenziale di riposo di -70mV: questa si chiama *iperpolarizzazione*, ovvero il potassio è libero di entrare, fermandosi solo dopo aver raggiunto il suo *potenziale di equilibrio* elettrico, bloccando la sua fuoriuscita ad una tensione di circa -90mv, tornando in seguito al normale potenziale di riposo. Il processo di ripolarizzazione cellulare è possibile grazie ai *mitocondri*: questi sono *organelli* (ovvero strutture delimitate da membrana citoplasmatica) capaci di produrre grandi quantità di una molecola, chiamata *ATP* (adenosina tri-fosfato), che ha il ruolo di trasportare e fornire alle cellule l'energia necessaria per le loro funzioni, lasciando fuoriuscire più ioni di sodio dall'interno della cellula ed introducendo contemporaneamente meno ioni di potassio. E' interessante notare che nella fase di *iperpolarizzazione* la pompa del sodio si riapre, pertanto un impulso elettrico è in grado di depolarizzare anche una membrana *iperpolarizzata*, a condizione che (per raggiungere i -55mV richiesti) l'impulso elettrico sia più forte di quello che è servito per depolarizzarla precedentemente (essendo a -90mv) mentre, una volta tornata a -70mV, basterà un impulso standard. L'intero evento di attivazione neurale viene ogni volta eseguito in tutte le sue fasi, mai parzialmente. Da questo punto di vista si possono associare gli impulsi nervosi ai segnali digitali, poiché si verificano nella stessa grandezza, indipendentemente da quanto sia forte o debole lo stimolo, fenomeno altresì definito *all-or-none* ovvero *potenziale d'azione totale o nullo*; è comunque sempre necessario che la tensione di soglia debba essere superata per generare lo stimolo iniziale ed il segnale avrà sempre un'unica direzione, ovvero dalla membrana presinaptica a quella post sinaptica. Una volta che un segmento della membrana si "depolarizza" questo trasmette il segnale in avanti fino al segmento successivo.

## Le sinapsi:

I neuroni comunicano tra loro tramite collegamenti intercellulari, ovvero le cosiddette sinapsi. La comunicazione sinaptica avviene attraverso sostanze chimiche dette neurotrasmettitori, che stimolano, tramite il passaggio dell'impulso nervoso, la cellula successiva. L'impulso nervoso, o *potenziale d'azione*, si propaga lungo la fibra neurale, attraverso le modalità elettrochimiche sopracitate: la *pompa sodio-potassio*, permette di trasmettere l'informazione dal terminale assonico di un neurone trasmettitore ad un neurone ricevente. L'aumento sequenziale di conduttanza fra questi ioni genera il *potenziale d'azione*,

ovvero l'energia elettrica aumenta per un breve momento, momento in cui si ha il passaggio dell'informazione da una cellula all'altra. Quando il *potenziale d'azione* è raggiunto, le vescicole presenti sulla superficie cellulare liberano un neurotrasmettitore che si diffonde rapidamente tramite la fibra postsinaptica e si lega ad alcune molecole specifiche della cellula recettrice, in più la reazione con il neurotrasmettitore altera la permeabilità della membrana della fibra postsinaptica consentendo quindi la propagazione dell'impulso nervoso di neurone in neurone.

Nelle aree adibite alla ricezione dei segnali provenienti dai nostri organi di sensoriali, questi impulsi nervosi sono causati in relazione ad uno stimolo prodotto da uno dei nostri cinque sensi (vista, udito, tatto, gusto, olfatto): ad esempio nell'occhio viene generato un impulso nervoso in risposta alla luce che raggiunge le cellule della retina, che viene poi trasmesso attraverso il nervo ottico alla parte del cervello che elabora le informazioni visive. Questo grazie ai *neuroni sensitivi* dotati di appositi *recettori*: questi sono *organelli* costituiti da terminazioni di cellule nervose, di struttura anatomica differente, a seconda del ruolo che ciascun tipo di recettore deve svolgere. In realtà in natura ce ne sono altri, come ad esempio elettro recettori (sensibili ad impulsi elettrici, usati da pesci per determinare la posizione nell'acqua di prede o loro simili) oppure barocettori (si trovano nel cuore e nei vasi sanguigni e servono per mantenere costante la pressione sanguigna).

Nel sistema nervoso centrale esistono sia sinapsi puramente elettriche (*elettrodipendenti*) che sinapsi chimiche (*chemiodipendenti*).

## Sinapsi elettrodipendenti

Le sinapsi puramente elettriche sono presenti in numero molto minore rispetto a quelle chimiche, anche se studi recenti ne hanno evidenziate più di quante se ne supponessero. Esse sono localizzate:

Nel cervelletto (che si trova nella parte posteriore del cervello e controlla i movimenti volontari).

Nel midollo spinale (fa comunicare la parte superiore del sistema nervoso con il resto dell'organismo).

Nel talamo (esegue una funzione associativa fra diverse aree corticali e media i contenuti sensoriali).

Nell'ippocampo (con funzioni di passaggio e consolidamento dei ricordi non ancora del tutto chiarite).

Nel bulbo olfattivo (area che si dirama dal telencefalo e riceve le informazioni dei recettori olfattivi).

Nella retina (membrana del bulbo oculare interno, adibita all'elaborazione dell'informazione ottica).

Il loro funzionamento è a effetto cascata, ovvero:

Al variare di potenziale di un neurone si provoca inevitabilmente la reazione di uno a lui collegato.

Non permette l'integrazione di più segnali sinaptici.

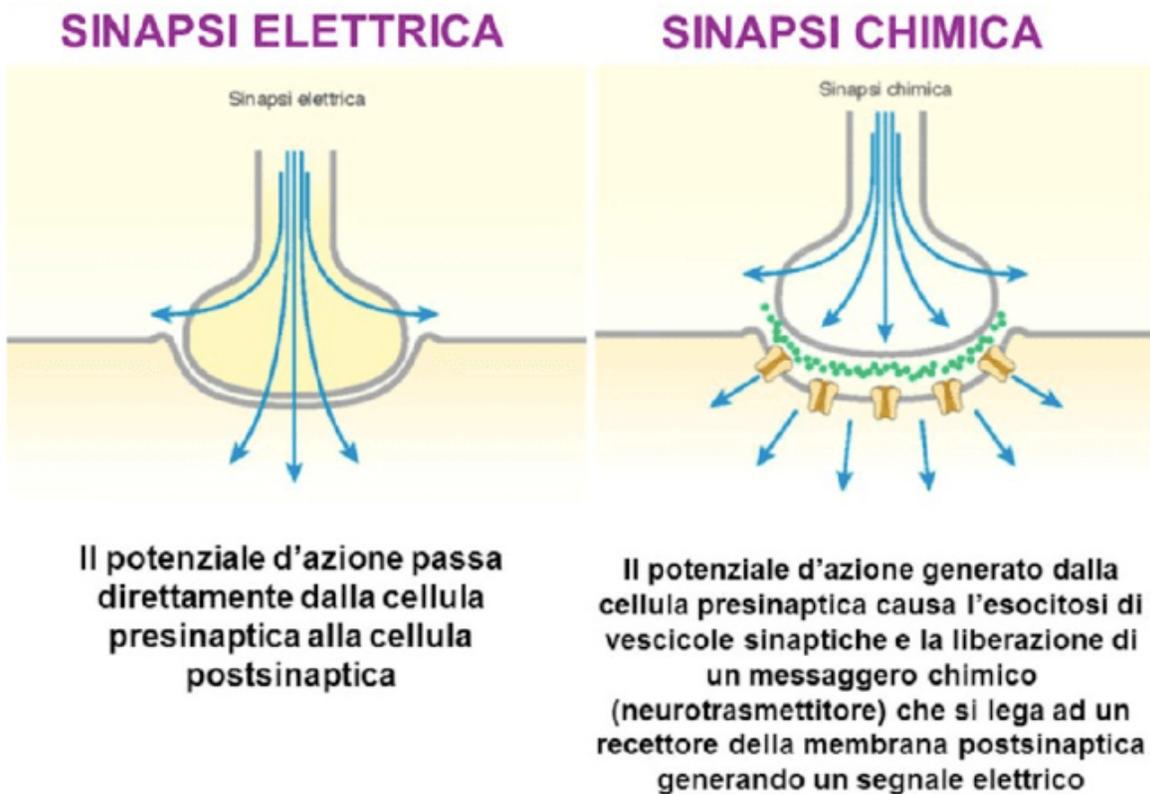
Permette rapide comunicazioni tra cellule adiacenti garantendo la sincronizzazione elettrica.

La loro presenza è giustificata dalla necessità di una maggiore rapidità nella trasmissione del segnale, favorendo anche una migliore sincronizzazione dell'attività elettrica di più cellule eccitabili. Un chiaro esempio è rappresentato dal muscolo cardiaco, dove le fibrocellule sono connesse attraverso *dischi intercalari* (ovvero zone di contatto ed adesione fra estremità di fibre muscolari) mediante sinapsi elettriche, garantendo una perfetta precisione dei movimenti muscolari.

In un sistema di cellule collegate con questa modalità elettrica stimoli come un abbassamento del pH o l'incremento della concentrazione intracellulare di  $Ca^{2+}$  inducono la chiusura del canale ed il passaggio del segnale. Le correnti elettriche si propagano da una cellula all'altra attraverso i *connessioni*, ovvero

strutture proteiche con funzioni di *canali ionici* che contribuiscono a formare le giunzioni comunicanti esistenti tra le cellule.

Differenze fra sinapsi elettriche e sinapsi chimiche

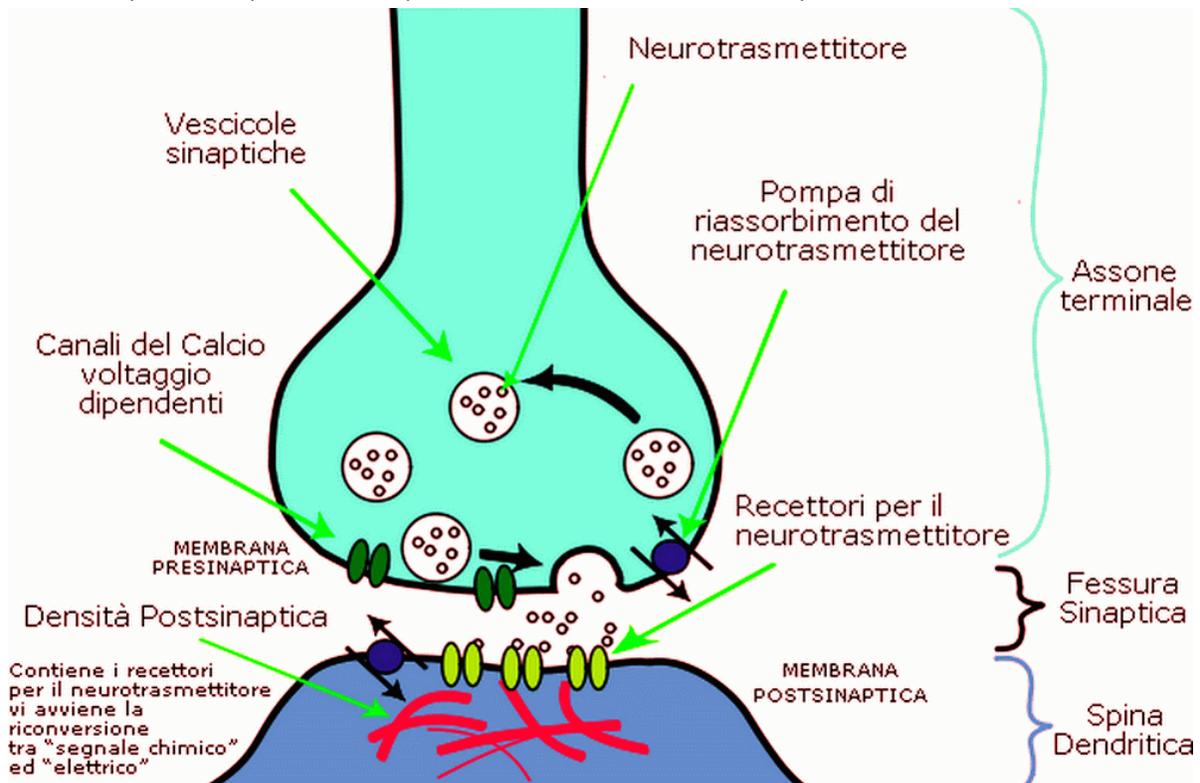


## Sinapsi chemiodipendenti

Per quanto riguarda invece sinapsi non direttamente collegate a muscoli di precisione o dove non è richiesta necessariamente un'attività motoria, ovvero la maggioranza delle cellule neurali della nostra corteccia, viene preferito dal nostro organismo l'utilizzo del sistema *chemio dipendente*. Come detto prima ogni neurone ha un corpo cellulare con diversi rami. I rami più piccoli, (siano questi con struttura di *dendriti* o di *recettori*), ricevono segnali che si uniscono e la loro somma totale viene trasmessa attraverso il ramo assonico, che trasporta gli impulsi nervosi da un corpo cellulare alla cellula successiva. Ad integrazione del processo ionico prima descritto, la superficie esterna o extracellulare di un neurone è bagnata in una soluzione detta *salata*, con ioni  $\text{Na}^+$  (caricati positivamente) e ioni  $\text{Cl}^-$  (caricati negativamente). La superficie interna ha ioni  $\text{K}^+$  (caricati positivamente) e proteine che sono caricate negativamente. Le proteine all'interno della cellula non sono bilanciate da un numero uguale di ioni positivi, rendendo la superficie interna del neurone leggermente più negativa di quella esterna, formando un *gradiente elettrico*, ovvero l'opposto in termini di carica del campo elettrico. Il nome *chemiodipendente* deriva proprio dal fatto che nel totale della sua operatività la membrana agisce sia per potenziale elettrico che chimico: è per questo motivo che, come detto prima, si parla di potenziale

elettrochimico. La maggiore concentrazione di ioni potassio all'interno fa sì che si verifichi la fuoriuscita degli ioni verso l'esterno della cellula.

Esempio di sinapsi chimica dipendente e trasferimento dell'impulso dall'assone al dendrite



## Verso la localizzazione dei ricordi: i progressi scientifici

Se, come trattato fino a qui, sono ormai ben noti i tipi, le modalità e la diramazione dei segnali in entrata dai *dendriti* ed in uscita dai *bottoni sinaptici*, come questi possono divenire la “nostra” coscienza? Questo è il perno focale del discorso: dove sono quindi immagazzinate le informazioni raccolte dai nostri canali sensoriali e giunte nella corteccia cerebrale? Come poter ipotizzare quale rapporto si crei fra le connessioni, gli impulsi, la propagazione degli stessi attraverso le aree neurali ed i nostri ricordi? Come questi vengono richiamati a comando nel nostro flusso dei pensieri?

Sebbene, a data attuale, non esista una risposta scientificamente dimostrata in ogni dettaglio, possiamo però asserire che grazie a tutti gli studi, i modelli, le sperimentazioni eseguite in tutte le branche scientifiche coinvolte (per alcune delle quali si è data una sommaria descrizione precedentemente), si è potuto realizzare una mappa di come le aree sinaptiche vengano coinvolte in stimoli neurali e come le loro reazioni provenienti da eventi correlati, possano interagire fra loro per generare i nostri ricordi.

Un ruolo importante è svolto dall'ippocampo: questa è una delle poche aree cerebrali coinvolte nel processo di *neurogenesi*, ovvero nella quale si generano nuovi neuroni (questa peculiarità è limitata al cosiddetto *giro dentato*, ovvero la parte mediana). L'interesse verso quest'area cerebrale è nata dopo il caso di Henry Molaison, un cittadino americano che nel 1953 si sottopose all'età di 27 anni ad un intervento chirurgico (per curare una condizione di epilessia non rispondente a nessun farmaco fino ad

allora somministratogli) nel quale subì la rimozione di due terzi dell'ippocampo, della corteccia paraippocampale, dell'area entorinale, della corteccia piriforme e della corteccia amigdala. A causa di questo intervento, sebbene fosse in grado di riportare alla memoria ricordi della sua infanzia ed adolescenza, non ricordava più cosa successo nei 2 o 3 anni precedenti ed alcuni dei ricordi fino ad 11 anni prima dell'operazione. In aggiunta a ciò, sebbene fosse in grado di memorizzare nuove informazioni, queste venivano perdute nel lungo termine limitandosi a pochi giorni o settimane. Sebbene già studi precedenti avessero dimostrato quanto l'ippocampo fosse importante nel processo formativo e consolidativo dei ricordi, ulteriori approfondimenti compiuti negli anni a seguire (fino alla sua morte avvenuta nel 2008) hanno dimostrato che i danni erano comunque molto più estesi alla sola zona interessata dalla rimozione chirurgica, pertanto l'area ippocampale è sicuramente coinvolta nella formazione dei ricordi, ma non esclusiva per poter asserire che fosse la causa unica delle amnesie e della mancanza del consolidamento dalla memoria a breve termine a quella a lungo termine.

Ciò che mancava alle tecnologie precedenti è l'interfacciamento diretto tra i neuroni stessi ed un sistema in grado di poter ricevere ciò che effettivamente avvenga al loro interno, ovvero un modo per acquisire, immettere e decodificare tutte le informazioni che una sinapsi genera. Tale tecnologia è oggi possibile, grazie ai risultati pionieristici raggiunti nel campo delle neuroscienze attraverso le quali siamo in grado non solo di identificare meglio tali aree ma anche le modalità e le relative strutture coinvolte nel processo dei nostri ricordi.

Prospettive future al cui apice c'è sicuramente il progetto Neuralink, ovvero il collegamento diretto fra un'area specifica cerebrale ed un sistema informatico. Tale progetto ha dimostrato, oltre la possibilità dell'integrazione fisica di impianti neurali nella corteccia cerebrale, la veridicità di molte ipotesi sollevate dai dati raccolti tramite l'elaborazione delle sinapsi. Fra le altre cose, il Neuralink ha dimostrato che:

Le aree del cervello non hanno neuroni staticamente selettivi, ovvero i neuroni della stessa area sono in continua comunicazione sinaptica, non essendoci ad esempio un neurone dominante in termini informativi rispetto ad un altro (o per dirla in termini informatici non c'è un controllo unidirezionale di un neurone rispetto ad un altro). Da questo punto di vista il microprocessore stesso è bidirezionale, ovvero può essere usato non solo per ricevere segnali, ma anche per immetterne altri dall'esterno, integrandosi nella rete neurale stessa.

Proprio in virtù del primo punto non è stato necessario collegare ogni singolo neurone, in quanto, essendo la rete neurale una rete di impulsi in continuo circolo, è bastato connetterne un numero limitato. Attualmente un Neuralink è in grado di collegarsi a circa 1000 neuroni, un numero che può sembrare esiguo, ma considerando che quei neuroni sono a loro volta collegati con tutte le sinapsi della zona interessata, si è riusciti di fatto a ricevere o trasmettere impulsi a tutta l'area.

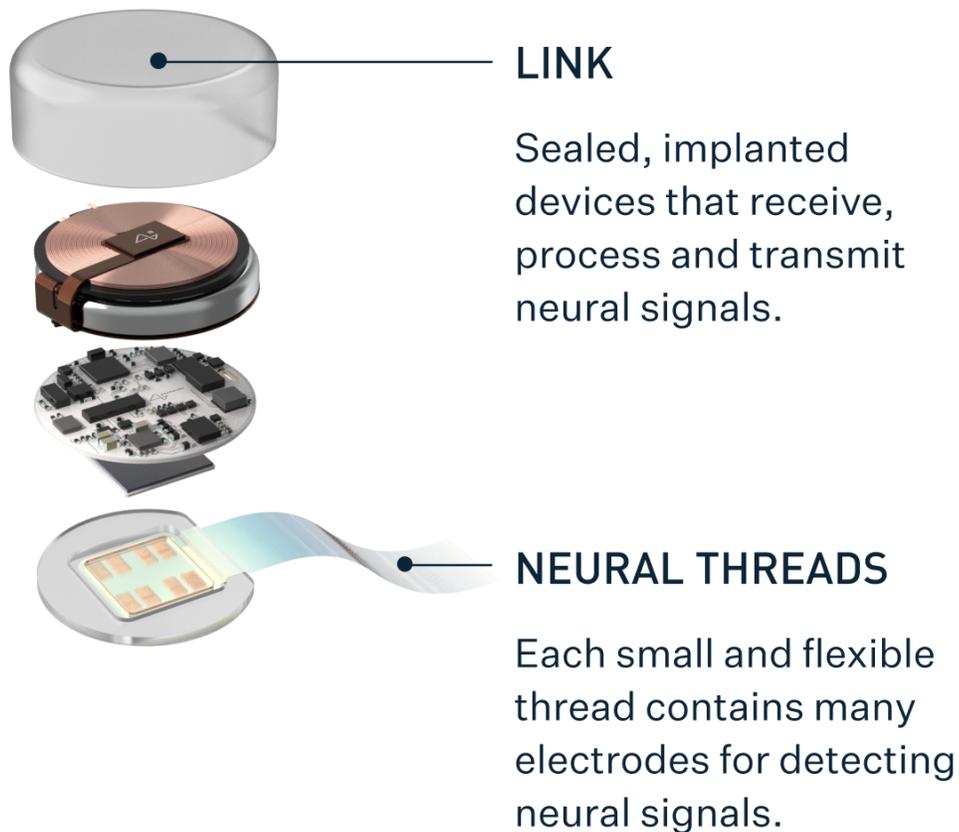
Si è altresì dimostrato che da un punto di vista di area cerebrale connessa a muscoli volontari, pensare di eseguire un'azione motoria oppure l'esecuzione dell'azione stessa è identica, generando e propagando lo stesso impulso sinaptico. Questo è stato provato interfacciando la zona motoria di alcuni primati (per ora non umani) e collegando la stessa ad un sistema comandato da un controllo meccanico. Il movimento del sistema è stato effettuato sia con il controllo manuale collegato agli arti, sia con la simulazione del controllo stesso (ovvero con i movimenti articolari del corpo effettuati fisicamente ma con il controllore collegato solo tramite la corteccia cerebrale), sia senza fisicamente muovere i muscoli coinvolti in tale moto, ovvero con il solo pensiero). In tutti gli esperimenti si è arrivati al movimento

reale dell'apparato in questione, sia esso stato comandato da una leva collegata al sistema, sia da una leva scollegata al sistema congiunta all'impulso neurale, sia con il solo impulso neurale.

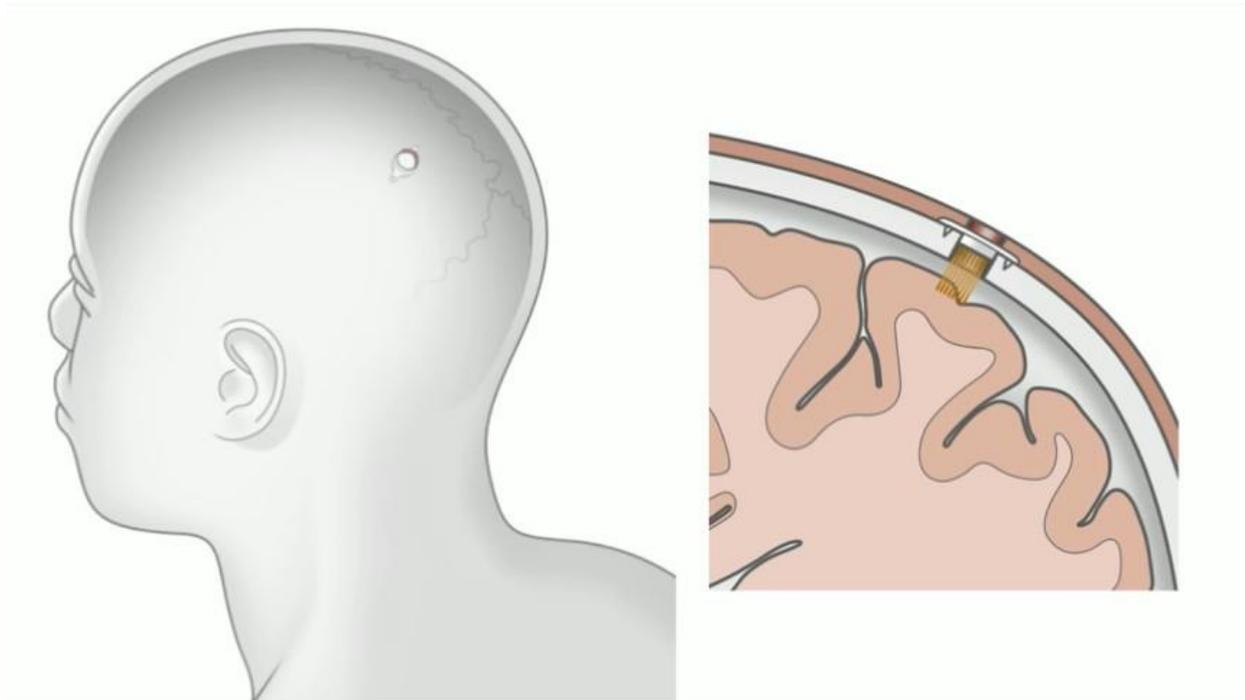
E' tutt'ora in fase di sperimentazione la connessione sinaptica diretta come un sistema di reindirizzamento per zone neurali deficitarie nel generare o trasmettere impulsi ionici (come ad esempio zone dove c'è un'interruzione nella propagazione dei neuroni) o dove i neuroni hanno un qualche tipo di danno strutturale (come ad esempio un danno derivato da trauma fisico o degradamento della guaina mielinica dell'assone). Questo potrebbe portare significativi benefici in applicazioni mediche verso malattie come Alzheimer o il morbo di Parkinson, con l'obiettivo di una parziale o totale guarigione da tali patologie o anche risolvere problemi di paralisi motorie dovuti a dislocazione delle vertebre.

Si stima che il Neuralink possa anche recuperare ricordi o pensieri, ed allo stesso tempo introdurne di nuovi dall'esterno, ovvero senza un coinvolgimento di un apprendimento che sia stato generato dai nostri sensi recettivi, fase ancora da sperimentare.

#### Neuralink allo stadio attuale



Schema esemplificativo di un processore Neuralink impiantato



## Conclusioni

Alla luce delle ultime ricerche è possibile a questo punto ipotizzare in modo sicuramente più scientifico dove siano localizzati i nostri ricordi. Sulla base degli ultimi studi e sperimentazioni si è analizzato che:

All'interno dei neuroni ippocampali avvengono risposte agli stimoli sensoriali esterni che spingono due geni specifici (Fos e Scg2) nella codifica di proteine *neuro-peptide* (responsabili della regolazione dell'attività neurale stessa). Queste vengono rilasciate dalle vescicole del nucleo dopo la depolarizzazione della cellula ed il loro fine è stabilire una rete coordinata con l'attività degli altri neuroni interni presenti nell'area dell'ippocampo, privilegiando con precisione i nuovi segnali ed inibendone altri non correlati a questi, ovvero propagando meglio solo quelli interessati, spingendo la rete nella diffusione della nuova informazione. Questo potrebbe definire il processo di formazione di un ricordo.

Si potrebbe anche ipotizzare che la memoria stessa possa essere fisicamente identificata negli impulsi sinaptici propagati dai canali ionici, tanto come mezzo comunicativo, quanto come fine informativo stesso. Essendo ormai stato scientificamente provato che la trasmissione sia continua ed a cascata nell'integrità della regione neurale interessata, non si può quindi escludere che, come in un integrale chiuso, ciò che stiamo cercando sia lo stesso flusso sinaptico trasmesso e non residente staticamente in ogni neurone.

Questo potrebbe portare risposte a molti quesiti:

Nell'arco della nostra vita muoiono un numero considerevole di neuroni per apoptosi (ovvero morte programmata della cellula). Queste iniziano ad avvenire già dalla formazione della rete sinaptica stessa, quando vengono scartati i neuroni che non sono in grado di formare reti sinaptiche con gli altri, per poi aumentare dai 30 anni in poi, fino ad un numero di 100000 al giorno in senilità. Questo non porta però

necessariamente alla perdita dei nostri ricordi: anche se dai 30 anni in poi è stato dimostrato che le connessioni sinaptiche originarie si perdono e vengono gradualmente rinnovate, la nostra personalità è ancora presente (secondo alcuni è questo che porta alla cosiddetta "maturità"). Allo stesso modo un individuo può essere lucido e conservare ricordi risalenti alla propria giovinezza anche in età avanzata, ovviamente nelle condizioni in cui non vi siano malattie neurodegenerative in corso.

La motivazione per cui un elettroencefalogramma piatto equivalga alla morte della coscienza dell'individuo può avvalorare l'ipotesi della coscienza intesa come flusso stesso degli impulsi sinaptici. Difatti anche quando i neuroni (dopo un trauma iniziale) non hanno perso comunque le loro funzioni di poter produrre stimoli (ovvero non siano clinicamente morti) appaiono in queste situazioni di coma come "vuoti" ed impossibilitati a creare connessioni, il che corrisponde ad un'attività neurale inesistente (o comunque non rilevata dai macchinari attuali). Si potrebbe quindi ipotizzare l'esistenza di un determinato impulso o sequenza di partenza che possa creare una reazione a catena in grado di riattivare la sinapsi cerebrale da una particolare zona ad un'altra fino ad estendersi potenzialmente in tutta la corteccia cerebrale, sempre a patto che i neuroni siano integri nelle loro funzioni elettrochimiche, ovvero avere le condizioni per permettere ad un individuo di uscire dallo stato di coma irreversibile. Serie sinaptica iniziale che potrebbe essere già utilizzata dal nostro sistema nervoso nella parte conclusiva della nostra gestazione, ovvero dal momento in cui finisce la formazione di neuroni a quando si mette in moto la rete cerebrale stessa. Studi in materia volti ad analizzare l'attività elettrica delle ultime settimane di gravidanza sono tutt'ora in corso.

Informativamente vostro... Mike Yoshi

## Bibliografia

- Robert M. Fano, "Transmission of information; a statistical theory of communications".
- Soheil Keshmiri, "Entropy and the Brain: An Overview".
- Korbinian Brodmann, Laurence J. Garey, "Brodmann's localisation in the Cerebral Cortex"
- Mingrui Xia, Jinhui Wang, Yong He, "BrainNet Viewer: A Network Visualization Tool for Human Brain Connectomics".
- Vanputte, Regan, Russo "Anatomia umana".
- Dott. Emilio Alessio Loiacono, "Sinapsi chimica ed elettrica".
- Journal of Neurology, "Loss of recent memory after bilateral hippocampal lesions".
- Neuralink.com, "Breakthrough Technology for the Brain".