



Co-funded by
the European Union

Unità didattica: Neuroni: modello biologico e fisico della trasmissione del segnale elettrico

DiFC - Università di Palermo



BIOS4YOU
AR 2.0

BIO-INSPIRED STEM TOPICS FOR ENGAGING YOUNG GENERATIONS
THANKS TO THE USE OF AUGMENTED REALITY

Project Number: KA220-BW-23-30-126516

"Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them."

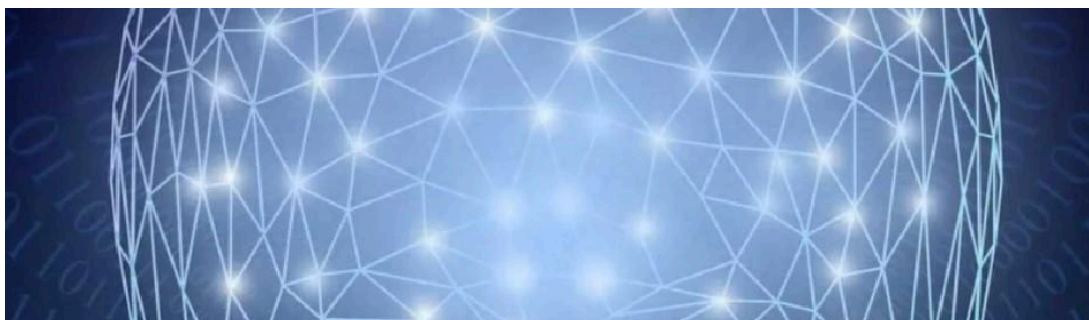




Contenuti

1. <i>Neuroscienze</i>	3
Neuroni: modelli biologici e fisici della trasmissione del segnale elettrico	3
2. <i>Modulo Esplora</i>	4
Fase di "engagement"	4
Attività di brainstorming in classe	4
Livello base	5
Neuroni	5
La genesi dello stimolo nervoso	6
Il modello fisico della propagazione del segnale in un neurone	9
Livello avanzato	11
Analisi del modello da un punto di vista matematico	11
Apprendimento capovolto:	15
3. <i>Modulo operativo</i>	17
Livello base	17
Metti alla prova le tue conoscenze	17
Simulazione PhEt: neurone	18
Simulazione PhEt: Kit per la costruzione di circuiti - Laboratorio virtuale	18
Livello avanzato	19
Prova anche tu:	19
4. <i>Materiale extra di approfondimento</i>	19
5. <i>Riferimenti bibliografici</i>	19





Argomento generale del percorso di apprendimento	Neuroscienze
Nome specifico dell'unità didattica	Neuroni: modello biologico e fisico della trasmissione del segnale elettrico
Età degli utenti target	17-19 anni
Requisiti per lo studente	Conoscenze di base di matematica, fisica, chimica e biologia.
Descrizione dell'unità didattica	L'unità didattica guiderà insegnanti e studenti attraverso un percorso di insegnamento/apprendimento multidisciplinare per scoprire i fondamenti delle neuroscienze e i contributi Dalle discipline STEM alla ricerca attuale, gli strumenti AR migliorano la visualizzazione e il coinvolgimento
Oggetto: Parti coinvolte	Biologia, Chimica, Fisica, Matematica, Ingegneria
Parole chiave	Neuroni, trasmissione sinaptica, segnale elettrico, comunicazione neurale, AR, Assemblr EDU, apprendimento basato su scene, visualizzazione interattiva
Qualifiche, competenze e conoscenze chiave che si possono acquisire	• Risoluzione dei problemi, pensiero progettuale, ragionamento • Conoscenza concettuale e pratica di fisica, chimica, matematica e biologia. • Competenze basate sulla realtà aumentata: visualizzazione spaziale 3D, navigazione basata su scene, modellazione scientifica digitale





	• Apprendimento interattivo attraverso l'integrazione tecnologica
Risorse e sussidi didattici utilizzati	Risorse web, laboratori virtuali, articoli di ricerca, database scientifici, piattaforma Assemblr EDU con accesso alla libreria PRO (modelli anatomici 3D, rappresentazioni molecolari, effetti Thunder Particle), pulsanti di navigazione PNG personalizzati
Criteri di valutazione e valutazione	Diversi livelli di conoscenza dei concetti e delle competenze acquisite, tra cui la valutazione basata sulla realtà aumentata attraverso il completamento della navigazione di scene, l'interpretazione collaborativa dei processi sinaptici e la dimostrazione della comprensione dei principi della comunicazione neurale tramite l'esplorazione interattiva di modelli 3D.





1. Neuroscienze

Neuroni: modelli biologici e fisici della trasmissione del segnale elettrico



Le neuroscienze sono un insieme di discipline, molto diverse tra loro, che studiano il sistema nervoso, ovvero il cervello, il midollo spinale e le reti di neuroni presenti in tutto il corpo. Nel corso degli anni, hanno acquisito metodologie e tecniche di ricerca provenienti da matematica, fisica, informatica e ingegneria. Grazie al contributo fondamentale di queste discipline, così come di biologia, chimica e fisiologia, è possibile sviluppare modelli di funzionamento in grado di spiegare il comportamento di sistemi biologici come il cervello.

Il premio Nobel Eric Kandel scrive: *"Il compito delle neuroscienze è spiegare il comportamento in termini di attività cerebrale. Come può il cervello dirigere i suoi milioni di singole cellule nervose per produrre un comportamento, e come possono queste cellule essere influenzate dall'ambiente? L'ultima frontiera della*





scienza della mente, la sua sfida definitiva, è comprendere le basi biologiche della coscienza e i processi mentali attraverso i quali percepiamo, agiamo, impariamo e ricordiamo."

Il cervello umano è un sistema meraviglioso ma molto complesso. Le unità funzionali del sistema nervoso, i neuroni, comunicano tra loro tramite segnali elettrici che si propagano anche su lunghe distanze e rilasciano sostanze chimiche, chiamate neurotrasmettitori.

L'obiettivo dello studio è stimolare l'interesse per un argomento che si presta bene a un approccio multidisciplinare nel campo STEM attraverso la scoperta dei fondamenti delle neuroscienze e accrescere la curiosità verso una tematica la cui ricerca è all'avanguardia e ha importanti implicazioni per il benessere e la salute.

L'esplorazione della trasmissione sinaptica e della comunicazione neurale può essere notevolmente migliorata grazie all'utilizzo di strumenti e risorse di realtà aumentata (AR). L'implementazione della tecnologia AR nell'insegnamento delle neuroscienze facilita una comprensione più approfondita di processi neurobiologici complessi.

Sinapsi aumentata: Viaggio all'interno del cervello - Implementazione Assemblr EDU

Questa esperienza di realtà aumentata guida gli studenti attraverso scene sequenziali che mostrano i processi completi di trasmissione sinaptica. Partendo da una panoramica anatomica del sistema nervoso umano, gli studenti passeranno a un esame dettagliato dei singoli neuroni e della comunicazione sinaptica. Utilizzando la libreria PRO di Assemblr EDU, l'esperienza impiega modelli anatomicamente accurati di neuroni motori e sensoriali, rappresentazioni molecolari dei neurotrasmettitori ed effetti Thunder Particle per visualizzare gli impulsi elettrici. Gli studenti navigano attraverso scene dedicate che mostrano l'inizio dell'impulso, il rilascio del neurotrasmettitore e la ricezione del segnale, accompagnate da dati scientifici, tra cui misurazioni di differenze di potenziale e velocità di trasmissione.

Vantaggi educativi della realtà aumentata nelle neuroscienze

La realtà aumentata sovrappone elementi virtuali al mondo reale, creando un ambiente di apprendimento interattivo. Nell'ambito della didattica delle neuroscienze, la realtà aumentata migliora la comprensione dei processi biologici invisibili fornendo visualizzazioni tridimensionali ed esplorazioni passo passo. L'approccio di navigazione basato su scene consente agli studenti di osservare concetti astratti come la propagazione dell'impulso elettrico e la trasmissione del segnale chimico in termini concreti e visivi. Questa metodologia collega la conoscenza teorica con i fenomeni osservabili, favorendo connessioni interdisciplinari tra biologia, fisica e tecnologia, pur mantenendo l'accuratezza scientifica nella rappresentazione dei processi sinaptici.





2. Modulo Esplora

Fase di "engagement"

1) Viaggio all'interno del nostro cervello – YouTube

<http://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=lrXuyxDt5jo>

Attività di brainstorming in classe

Frasi guida: *Tutte le attività che svolgiamo e tutte le emozioni che proviamo dipendono dalla trasmissione del segnale nervoso tra i neuroni. Come può la materia organica raccogliere, analizzare e trasmettere informazioni con altissima precisione e velocità?*

Il nostro benessere si basa sul corretto funzionamento di ogni elemento della rete neuronale. Quali tecnologie possono essere utilizzate per intervenire se qualcosa non funziona correttamente?

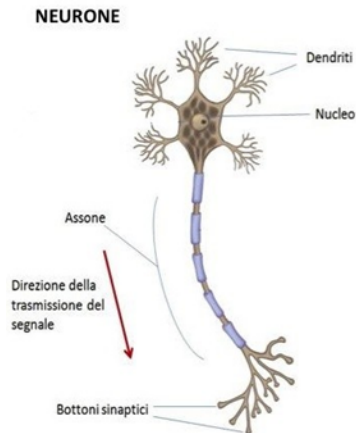
Livello base

Neuroni

Qual è la struttura del neurone?

Il cervello umano contiene circa 100 miliardi di cellule, i neuroni, specializzate nella trasmissione di segnali nervosi, principalmente di natura elettrica. Un neurone è costituito da diverse parti, con funzioni specifiche: un corpo cellulare (o soma), contenente il nucleo, i dendriti e l'assone. Il segnale nervoso, proveniente da altri neuroni o dagli organi recettori, viene raccolto e trasmesso al nucleo attraverso i dendriti, brevi e ramificate estensioni del nucleo stesso. All'interno del corpo cellulare, il segnale viene elaborato e trasmesso all'assone, una lunghissima estensione con il compito di trasportare il segnale elettrico ad altre cellule. A separare l'interno del neurone dal fluido interstiziale esterno vi è la membrana citoplasmatica. Gli assoni sono talvolta avvolti per gran parte della loro lunghezza da una spessa guaina isolante, la mielina. Nella sua parte terminale, l'assone si ramifica in un numero variabile di terminazioni, i bottoni sinaptici, dove il segnale elettrico viene convertito in un segnale chimico, tramite un neurotrasmettitore.

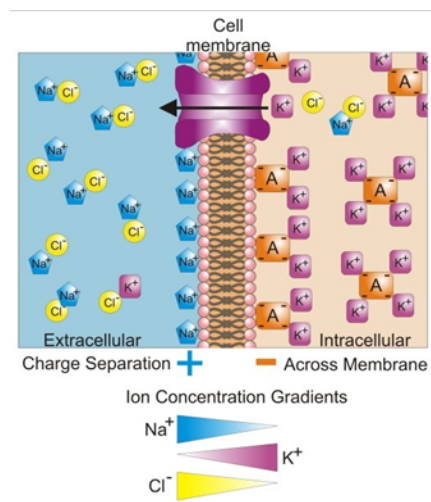




Fonte immagine: Medicina online

Cosa accade quando un neurone non viene stimolato? Quali caratteristiche fisico-chimiche ci permettono di descrivere il comportamento del neurone?

Nei neuroni, il potenziale elettrico tra l'interno e l'esterno della membrana citoplasmatica è differente, principalmente a causa della diversa concentrazione di ioni sodio (Na^+) e potassio (K^+) sui due lati della membrana. Quando il neurone è a riposo, ovvero non trasmette segnali, questa differenza di potenziale, detta potenziale di riposo, ha valori compresi tra -60 mV e -80 mV . La membrana citoplasmatica possiede canali ionici e pompe che si aprono e si chiudono in risposta a determinati stimoli, regolando il passaggio degli ioni e di conseguenza modificando il potenziale elettrico.



L'interno della cellula è ricco di ioni K^+ e di ioni negativi legati a macromolecole organiche, mentre l'esterno della cellula è ricco di ioni Na^+ e Cl^- . La concentrazione di ioni Na^+ e K^+ è regolata da tre proteine di membrana chiamate canali ionici o pompe ioniche:

- canali del sodio;
- canali del potassio





- la pompa sodio-potassio.

La membrana del neurone possiede numerosi canali del potassio: questi canali spingono gli ioni K^+ dall'interno della membrana verso l'esterno, sebbene in questo modo aumentino la negatività all'interno della cellula. D'altra parte, gli ioni negativi presenti all'interno della cellula non possono diffondere all'esterno perché sono troppo grandi per attraversare la membrana.

I canali del sodio sono pochi e tendono a diffondere gli ioni sodio verso l'interno.

La pompa sodio-potassio agisce contro la direzione naturale del flusso ionico, spingendo il Na^+ verso l'esterno e il K^+ verso l'interno della cellula. A riposo, la membrana è praticamente impermeabile all'ingresso di ioni Na^+ .

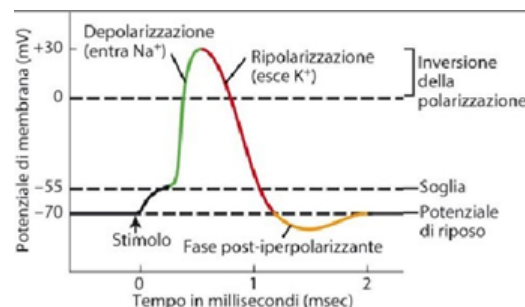
Riflettiamo insieme: *I neuroni sono le cellule più antiche del corpo: non sono in grado di duplicarsi e, in caso di lesioni che ne causano la morte, le cellule circostanti non riescono a sostituirli. Con il passare degli anni, la funzionalità del sistema nervoso diminuisce: la ricerca si concentra quindi sulla ricerca di nuovi metodi per potenziare la capacità del cervello di produrre nuovi neuroni (neurogenesi) al fine di migliorare l'apprendimento e la memoria. Cosa si può fare per mantenere sani i propri neuroni? Come si può mantenere la mente allenata?*

La genesi dello stimolo nervoso

Come comunicano i neuroni?

Tutti i segnali provenienti dall'esterno vengono captati dai dendriti e trasmessi al nucleo. Se uno stimolo raggiunge il nucleo di un neurone e può modificare il potenziale di riposo fino a un valore di soglia (circa -50 mV), viene generato un potenziale d'azione o impulso nervoso che si propaga lungo l'assone.

La genesi del potenziale d'azione è legata allo scambio di ioni attraverso alcuni canali voltaggio-dipendenti del sodio Na^+ e del potassio K^+ . I canali del sodio si aprono per primi, quando il potenziale raggiunge il valore di soglia, spingendo all'interno della cellula ioni negativi che depolarizzano rapidamente la membrana. Il flusso di ioni sodio all'interno della membrana provoca un'inversione di polarità: all'interno della membrana si crea un eccesso di carica positiva, mentre all'esterno una carenza di carica positiva. In questo modo, la membrana si depolarizza fino a raggiungere un potenziale di $+50$ mV, il valore massimo del potenziale d'azione.

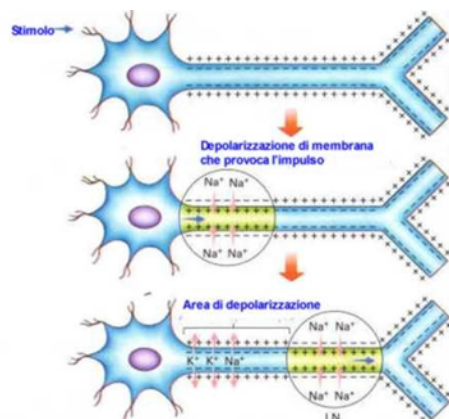


La condizione di depolarizzazione, tuttavia, dura da 1 a 2 millisecondi. Dopodiché, nel tempo, i canali del sodio voltaggio-dipendenti si chiudono e si aprono i canali del potassio voltaggio-dipendenti. Questi ultimi si aprono più lentamente e rimangono aperti più a lungo: gli ioni K^+ fluiscono verso l'esterno della membrana che inizia a ripolarizzarsi, riportando il potenziale a un valore negativo. Il flusso di K^+ persiste generando una fase di iperpolarizzazione e il potenziale diventa più negativo del potenziale di riposo. Infine, tutti i canali voltaggio-dipendenti si chiudono e riprende l'attività della pompa sodio-potassio, che ripristina il potenziale di riposo della membrana plasmatica. L'ampiezza (circa +50 mV) e la durata (circa 2 millisecondi) del potenziale d'azione sono fisse, ovvero non dipendono dall'entità dell'eccitazione.

Come si propaga il potenziale d'azione lungo l'assone?

Il segnale elettrico che si propaga attraverso il neurone e viene poi trasmesso ai neuroni successivi esegue la seguente sequenza di eventi estremamente rapidi:

- Lo stimolo elettrico elaborato dal nucleo provoca l'apertura dei canali del sodio voltaggio-dipendenti in un segmento vicino al nucleo; al raggiungimento del valore di soglia, viene generato il primo potenziale d'azione.
- la depolarizzazione si propaga lungo l'assone provocando l'apertura dei canali dei canali del sodio voltaggio-dipendenti presenti nelle zone di membrana adiacenti; di conseguenza, viene generato un secondo potenziale d'azione, che a sua volta ne genererà un terzo e così via.
- Allo stesso tempo, nell'area che si era depolarizzata per prima, si sono aperti i canali del potassio voltaggio-dipendenti, riportando la membrana al potenziale di riposo.
- i potenziali si propagano solo in una direzione perché, dopo la chiusura, i canali del sodio voltaggio-dipendenti subiscono un periodo refrattario durante il quale non può riaprire.



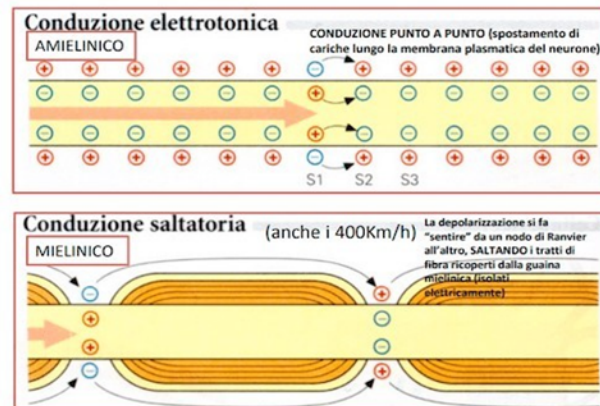
Propagazione del potenziale d'azione lungo un assone non mielinizzato: video disponibile su:
Propagazione del potenziale d'azione in un assone non mielinizzato - Fisiologia medica animata - YouTube
<https://www.youtube.com/watch?v=RNdvrkolWOM&t=7s>

Che ruolo svolge la guaina mielinica?

Le fibre nervose rivestite da guaina mielinica sono più impermeabili, poiché la guaina agisce da isolante elettrico: di conseguenza, la depolarizzazione e la propagazione del potenziale d'azione avvengono solo



nelle sezioni in cui non è presente, chiamate nodi di Ranvier. Il segnale nervoso "salta" da un nodo all'altro con una velocità maggiore rispetto alle fibre non mielinizzate.



Riflettiamo insieme: La trasmissione del segnale elettrico, prima all'interno di un neurone e poi verso altri neuroni, è rapida e precisa. La velocità di trasmissione e l'accuratezza delle informazioni sono fattori decisivi per il corretto svolgimento di tutte le attività umane. Quando qualcosa in questo meraviglioso meccanismo si blocca o si arresta, causando una malattia neurologica, l'impatto sulla qualità della vita delle persone colpite è devastante. La ricerca sui principi di funzionamento della trasmissione del segnale La stimolazione neuronale è alla base delle neurotecnologie più avanzate, che sfruttano la stimolazione elettrica come terapia. Avete mai sentito parlare di elettrodi applicati a pazienti paralizzati che sono riusciti a camminare di nuovo?

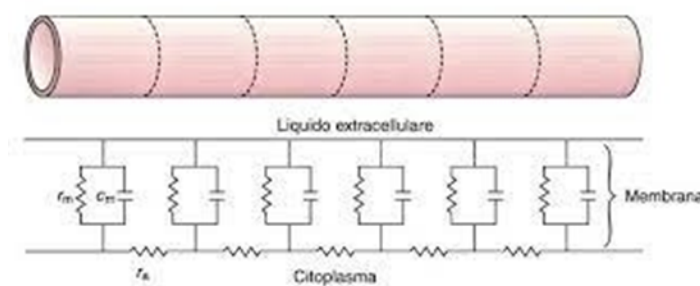
Il modello fisico della propagazione del segnale in un neurone

Quale modello fisico può spiegare il principio di funzionamento di un neurone?

Per un rapido ripasso su capacità e condensatori: Condensatori e capacità di un condensatore (youmath.it)

Per un rapido ripasso su resistenza e resistori: Resistori, resistenza elettrica e resistività elettrica (youmath.it)

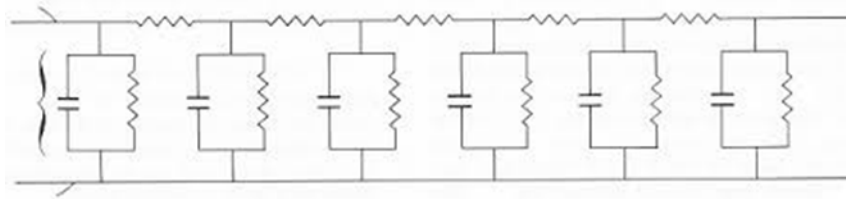
L'assone è simile a un cavo coassiale. La parte interna dell'assone costituisce il nucleo conduttore centrale del cavo.



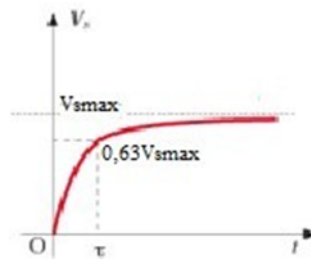
La sua resistenza è elevata, principalmente a causa della sua piccola sezione trasversale. Per descrivere le proprietà elettriche del citoplasma, viene introdotta la resistenza per unità di lunghezza r_i .

Anche la parte esterna dell'assone è un conduttore, ma la sezione esterna è molto più ampia di quella interna e quindi la resistenza offerta dal fluido interstiziale è trascurabile rispetto a quella interna. La membrana isolante costituisce un condensatore, poiché l'interno e l'esterno dell'assone si comportano come due piastre conduttrici, immagazzinando cariche di segno opposto. In parallelo al condensatore, si deve considerare una resistenza, che tiene conto del flusso di ioni attraverso la membrana stessa. Per schematizzare il comportamento elettrico della membrana, vengono introdotte due grandezze: la capacità per unità di lunghezza C_m e la conduttività per unità di lunghezza della membrana σ_m (da cui deriveremo la resistenza della membrana per metro r_m).

L'assone può quindi essere schematizzato mediante un circuito costituito da una successione di maglie con resistori e condensatori.



Il potenziale di stimolazione dipenderà dal tempo e dalla posizione lungo l'assone. Infatti, è caratterizzato da due parametri: la costante di tempo τ e la costante spaziale λ . Il modello matematico del circuito ci permette di ricavare l'andamento del potenziale sia in funzione del tempo che in funzione della posizione. Nel primo caso avremo:



$$V_s(t) = V_{smax}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

dove V_{smax} è il valore massimo raggiunto dal potenziale e $\tau = r_m C_m$.



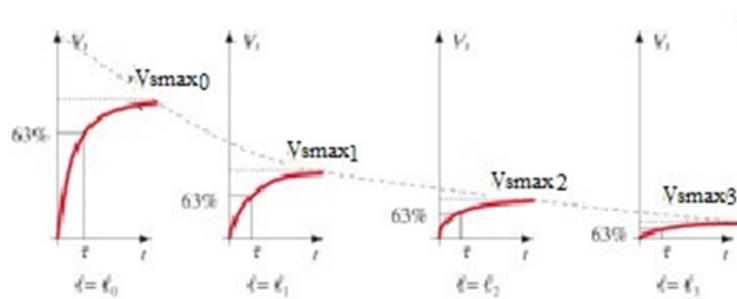
La costante di tempo τ (dell'ordine dei millisecondi) è l'intervallo di tempo necessario affinché il potenziale di stimolazione raggiunga il 63% del suo valore massimo: è una misura della velocità di risposta del neurone.

Allontanandosi dal punto in cui viene generato, il potenziale di stimolo diminuisce con la distanza a causa degli effetti combinati delle resistenze r_i e r_m .

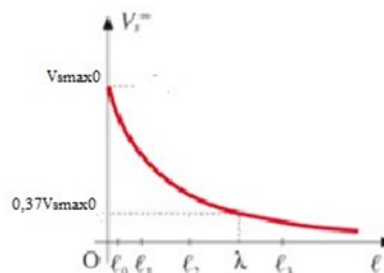
Il potenziale di stimolo tende a diminuire secondo la legge:

$$V_{smax}(x) = V_{smax0} e^{-\frac{x}{\lambda}}$$

dove V_{smax0} è il potenziale di stimolo nel sito di origine e λ è la costante spaziale.



La costante spaziale λ (dell'ordine dei millimetri) è la distanza alla quale la differenza di potenziale iniziale si riduce al 37% del suo valore massimo.



Si tratta di una misura di quanto lontano la corrente può fluire lungo l'assone prima di dissiparsi a causa delle correnti di dispersione.

Quindi dopo aver percorso una distanza di λ , il segnale si è ridotto a circa 1/3 e dopo 2λ è circa 1/7 del segnale originale e non è più in grado di innescare il potenziale d'azione. In realtà, gli stimoli percorrono distanze considerevolmente maggiori, dell'ordine di un paio di metri, a causa dell'intervento di altri meccanismi che non stiamo considerando. Matematicamente, la costante spaziale è descritta come:





$$\lambda = \sqrt{\frac{r_m}{r_i}}$$

Il fattore principale che influenza la resistenza interna r_i è il raggio dell'assone: gli assoni di grande diametro hanno una minore resistenza ai flussi di corrente longitudinali e, quindi, una minore resistenza assiale; di conseguenza, avranno una maggiore costante di spazio. Infatti, λ aumenta con la radice quadrata del raggio dell'assone r_a .

$$\lambda \propto \sqrt{r_a}$$

Da cosa dipende la velocità di propagazione dell'impulso nervoso?

La conoscenza delle due costanti ci permette di determinare la velocità di propagazione del segnale elettrico lungo un assone:

$$v = \frac{\lambda}{\tau}$$

e quindi, per dedurre che

$$v \propto \sqrt{r_a}$$

relazione che concorda con i risultati sperimentali.

Riflettiamo insieme: Il termine *modello* indica una rappresentazione, a volte una semplificazione, di un fenomeno, capace di spiegare come esso funziona. L'uso di un modello fisico per interpretare e comprendere un fenomeno biologico risponde alla necessità evidenziata da diversi studiosi di neuroscienze di rimuovere le barriere tra discipline differenti, sfruttando pienamente le risorse e le tecniche dei diversi ambiti disciplinari. *Hai mai pensato di utilizzare le tue conoscenze in campi diversi dal tuo?*

Livello avanzato

Analisi del modello da un punto di vista matematico

Consideriamo il primo circuito elementare con cui possiamo schematizzare l'assone.

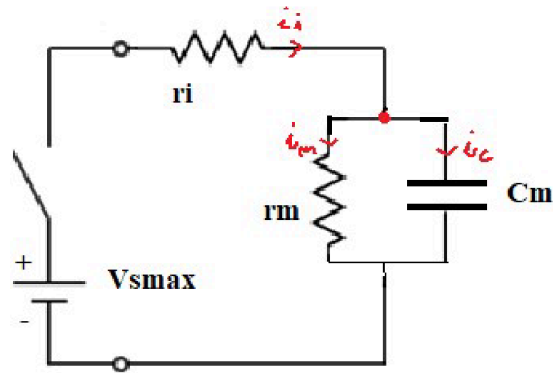
Per determinare l'andamento del potenziale e delle correnti utilizziamo le leggi di Kirchhoff:

$$V_{smax} = V_{r_i} + V_C$$

e

$$i_i = i_c + i_m$$





dove V_{smax} è il potenziale ai capi del circuito RC che immaginiamo come la ddp di un generatore, V_{ri} è la ddp ai capi della resistenza interna dell'assone e V_c è la ddp ai terminali del condensatore C. Con i_m indichiamo anche la corrente attraverso la membrana.

Deriviamo i_c ed esprimiamo tutto in funzione dei potenziali:

$$i_m = \frac{V_c}{r_m}, \quad i_i = \frac{V_{smax} - V_c}{r_i}, \quad i_c = i_i - i_m$$

e allora

$$i_c = \frac{V_{smax} - V_c}{r_i} - \frac{V_c}{r_m}$$

Poiché per un condensatore vale la seguente relazione:

$$V_c = \frac{q}{c_m}$$

avremo

$$i_c = \frac{V_{smax}}{r_i} - \frac{q}{r_i c_m} - \frac{q}{r_m c_m}$$

Derivando l'espressione precedente rispetto al tempo, otteniamo:

$$\frac{di_c}{dt} = -\left(\frac{1}{r_i} + \frac{1}{r_m}\right) \frac{i_c}{c_m}$$





che è un'equazione differenziale lineare a variabili separabili la cui soluzione si ottiene integrando:

$$\int \frac{di_c}{i_c} = -\left(\frac{1}{r_i} + \frac{1}{r_m}\right) \frac{1}{c_m} \int dt$$

$$i_c(t) = Ae^{-\frac{t}{\tau}}$$

La costante di tempo τ è

$$\tau = \frac{r_i r_m c_m}{r_i + r_m}$$

La costante A è determinata dalle condizioni iniziali del circuito.

per

$$t=0 \quad i_c(0) = A = i_i(0) = \frac{V_{smax}}{r_i}$$

si ottiene

$$i_c(t) = \frac{V_{smax}}{r_i} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Solitamente $r_m \sim 10^4 \Omega/m$ and $r_i \sim 10^{10} \Omega/m$ e r_m può essere trascurato rispetto a r_i , il che consente di semplificare τ :

$$\tau = \frac{r_i r_m c_m}{r_i + r_m} \sim r_m c_m$$

Troviamo quindi le altre correnti in funzione del tempo:

$$i_m(t) = \frac{V_c}{r_m} = \int \frac{i_c(t)}{r_m c_m} dt$$

La soluzione è:

$$i_m(t) = \frac{V_{smax}}{r_i + r_m} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

Alla fine

$$i_i(t) = i_c(t) + i_m(t) = \frac{V_{smax}}{r_i + r_m} \left(1 + \frac{r_m}{r_i} e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$



Per $t=0$ tutta la corrente passa attraverso il resistore r_i e va a caricare il condensatore C_m . Nessuna corrente circola attraverso r_m , $i_m(0) = 0$, in accordo con il fatto che è in parallelo con C_m e non ha d.d.p. alle sue estremità.

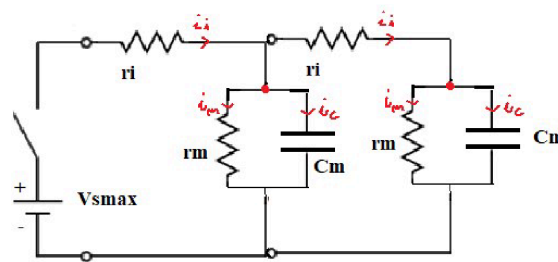
Per tempi lunghi ($t \rightarrow \infty$) il condensatore è carico e non fa più circolare corrente attraverso il ramo, cioè $i_c(\infty) = 0$, mentre tutta la corrente passa attraverso la resistenza interna e quella di membrana:

$$i_i(\infty) = i_m(\infty) = \frac{V_{smax}}{r_i + r_m}$$

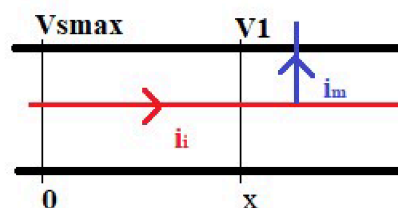
Le espressioni ricavate analiticamente per le correnti giustificano un risultato che avevamo precedentemente introdotto, ovvero il potenziale di stimolo:

$$V_s(t) = V_{smax}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

Per simulare l'assone, consideriamo altri circuiti simili collegati al primo. Per questo secondo circuito, il potenziale o f.e.m. non è più V_{smax} ma il potenziale presente ai capi del parallelo



$$V_c = i_m r_m = \frac{V_{smax} r_m}{r_i + r_m} \sim \frac{r_m}{r_i} V_{smax}$$



Il potenziale di stimolazione diminuisce lungo l'assone.

Consideriamo il potenziale di stimolo V_{smax} nel punto $x=0$. La sua propagazione dipende dalla corrente che scorre all'interno dell'assone II, la quale a sua volta dipende (secondo la prima legge di Ohm) dalla variazione del potenziale lungo l'assone:





$$i_i(x) = -\frac{1}{r_i} \frac{dV_s}{dx}$$

Il segno meno dipende dal fatto che la corrente fluisce dai punti verso potenziali più elevati verso punti con potenziali più bassi, quindi nella direzione opposta al gradiente di V_s . La corrente interna diminuisce perché le cariche fluiscono fuori dalla membrana attraverso la corrente i_m :

$$\frac{di_i}{dx} = -i_m = -\frac{V_s}{r_m}$$

Sostituendo otteniamo la seguente equazione differenziale del secondo ordine:

$$V_s = -r_m \frac{di_i}{dx} = \frac{r_m}{r_i} \frac{d^2 V_s}{dx^2}$$

La soluzione è:

$$V_s(x) = V_{smax} e^{-\frac{x}{\lambda}}$$

con

$$\lambda = \sqrt{\frac{r_m}{r_i}}$$

come avevamo precedentemente introdotto.

Apprendimento capovolto:

Leggi l'articolo proposto. Concentrati in particolare sullo studio dei segnali nervosi e sulle tecniche di elettrofisiologia descritte nell'articolo. Completa poi lo studio analizzando quali campi di ricerca, secondo l'articolo, sono più efficaci per lo studio dei circuiti neuronali.





Articoli AIRInforma - Quando membrane, proteine e sali creano elettricità
AIRInforma: il portale di divulgazione di AIRicerca - <http://informa.airicerca.org> - Pubblicato il 14-12-2015



Quando membrane, proteine e sali creano elettricità.

di Elia Magrinelli

Editor: Olivia Candini

Revisori Esperti: Annalisa Zuccotti, Giorgio Grasselli

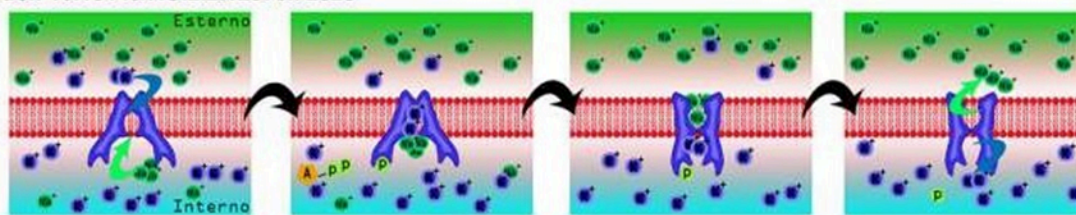
Revisori Naive: Michele Schiavina, Erika Ponzini



Parole Chiave: Biologia, Biologia Cellulare, Cervello, Medicina, Neuroni, Neuroscienze, Ricerca di Base, Ricerca in Vitro

Permalink: <http://informa.airicerca.org/2015/12/14/quando-membrane-proteine-e-sali-creano-elettricit>

doi: 10.13140/RG.2.2.12876.72328



Commentiamo lo studio dei segnali nervosi proposto nell'articolo:

Le tecniche elettrofisiologiche più comuni:

- La tecnica del Patch Clamp
- La tecnica dall'interno verso l'esterno e dall'esterno verso l'esterno
- registrazione extracellulare

Alleanze particolarmente efficaci con l'elettrofisiologia:

farmacologia

ingegneria genetica, optogenetica





3. Modulo operativo

Livello base

Metti alla prova le tue conoscenze

Attività:

Test di conoscenza

Test a risposta multipla

1) Un neurone è costituito da:

- Dendriti, nucleo, assone, bottoni sinaptici
- Dendriti e assone
- nucleo e assone
- Dendriti, nucleo, assone, guaina mielinica

2) Quale delle seguenti affermazioni riguardanti il potenziale d'azione è errata?

- corrisponde a un'iperpolarizzazione
- viene attivato solo in risposta a uno stimolo
- si attiva solo se viene superata una determinata soglia
- provoca l'inversione di polarità

3) Il processo di propagazione viene innescato da:

- la presenza di canali voltaggio-dipendenti per Na^+
- l'esistenza di un particolare periodo refrattario
- il ripetersi dello stimolo scatenante
- l'esistenza di potenzialità anche nelle sezioni a riposo

4) Il potenziale di riposo è dovuto alla presenza di:

- Ioni Na^+ all'esterno della cellula e K^+ all'interno della cellula
- Ioni Na^+ all'interno della cellula e K^+ all'esterno della cellula
- Ioni Na^+ all'interno della cellula e Cl^- all'esterno della cellula
- Ioni K^+ all'esterno della cellula e ioni Cl^- all'interno della cellula

5) Quale delle seguenti affermazioni sul modello del cavo è errata?

- L'assone può essere schematizzato mediante un circuito contenente due resistori e un condensatore in serie
- L'assone può essere schematizzato mediante una successione di maglie con resistori e condensatori
- La parte interna dell'assone ha una resistenza molto elevata
- La membrana stessa forma un condensatore in parallelo con una resistenza





- 6) Risposta breve: Che valore ha il potenziale di riposo?
- 7) Risposta aperta: Come si propaga il potenziale d'azione lungo l'assone?
- 8) Risposta aperta: Come varia il potenziale di stimolo in un determinato punto in funzione del tempo?
Fornire una descrizione qualitativa.
- 9) Abbina ciascuna domanda alla risposta corretta:
- Cosa misura la costante spaziale?
 - Cosa misura la costante di tempo?
 - Da cosa dipende la costante spaziale?
 - Da cosa dipende la costante di tempo?
- 10) Risposta breve: Da cosa dipende la velocità di propagazione dell'impulso nervoso nei neuroni non mielinizzati secondo il modello a cavo?

Simulazione PhEt: neurone

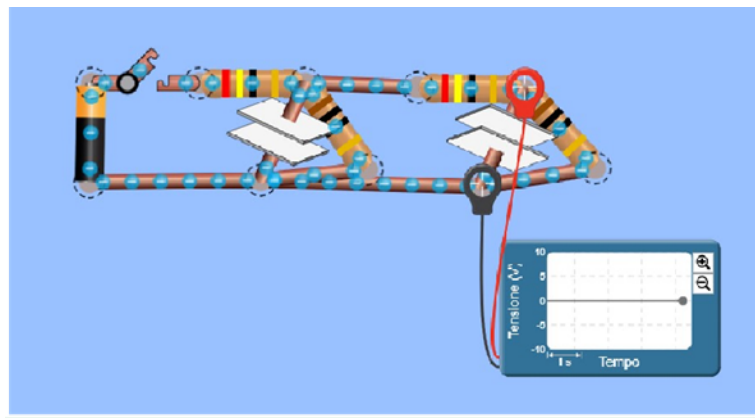
https://phet.colorado.edu/sims/html/neuron/latest/neuron_it.html

Attività:

- Link al foglio di lavoro in inglese: Neuron - Biology | Neurons | Cells - Interactive Simulations of PhET (colorado.edu)
- Esplora il comportamento di un neurone in presenza di un potenziale d'azione.

Simulazione PhEt: Kit per la costruzione di circuiti - Laboratorio virtuale

Kit per la costruzione di circuiti: Laboratorio virtuale (colorado.edu)





Attività:

- Link al foglio operativo in inglese: Circuit Construction Kit: Virtual Laboratory - RLC Circuit | AC Circuits | Kirchhoff's Law - Interactive Simulations of PhET (colorado.edu)
- Realizza un circuito che simuli il comportamento del modello a cavo del neurone. Evidenzia l'andamento del potenziale ai capi dei condensatori e verifica se è in accordo con quanto hai studiato.

Livello avanzato

Prova anche tu:

Indicativamente, e con un certo margine di approssimazione che tiene conto della variabilità dei diversi tipi di assoni e delle varie strutture animali, un assone ha un raggio dell'ordine di μm , una resistenza interna per unità di lunghezza $r_i \sim 10^{10} \Omega/\text{m}$ e una resistenza transmembrana per unità di lunghezza $r_m \sim 10^4 \Omega/\text{m}$. Lo spessore della membrana è di circa 5-10 nanometri e la costante dielettrica relativa ϵ_r è di circa 2-4.

1. Scegliere un modello di condensatore e la sua capacità e stimare, utilizzando questi dati, l'ordine di grandezza della capacità per unità di lunghezza dell'assone; (una capacità per metro $C_m \sim 5 \cdot 10^{-8} \text{ F/m}$)
2. Verifica che le approssimazioni utilizzate nella parte esplorativa siano legittime e calcola la costante di tempo e di spazio;
3. Successivamente, stima la velocità di propagazione del segnale elettrico e confronta i risultati ottenuti con i dati sperimentali;
4. Perché la velocità di propagazione è diversa dai risultati sperimentali? Come possiamo migliorare il modello per ottenere velocità di propagazione più vicine a quelle reali?

4. Materiale extra (di approfondimento)

Risorse basate sul web:

Brochure-NEUROSCIENCE-Battaglini (units.it): Manuale informativo e divulgativo sulle neuroscienze a cura del centro BRAIN di Trieste.

Italiano: <https://www2.units.it/brain/Manuali/Scienza%20del%20Cervello-web.pdf>: Un manuale divulgativo sulle neuroscienze: interessanti riferimenti alle frontiere della ricerca e link ad altri siti

Italiano: <https://userswww.pd.infn.it/~soramel/FisicaMedicina/Altro/CircuitiRC.pdf>: Presentazione dei circuiti RC e loro applicazione in fisica medica.





5. Riferimenti bibliografici

D. Sadava et al: Biology.blu PLUS. Il corpo umano, Zanichelli

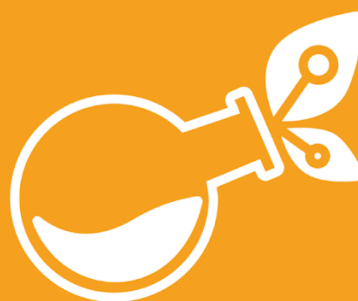
G. Bellini et al : Physics for medicine, Piccin

Walker J: FISICA: Modelli teorici e risoluzione dei problemi, 3 Linx





Co-funded by
the European Union



BIOS4YOU AR 2.0

BIO-INSPIRED STEM TOPICS FOR ENGAGING YOUNG GENERATIONS
THANKS TO THE USE OF AUGMENTED REALITY



Project Number: KA220-BW-23-30-126516

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.