

18-10 Il sistema nervoso e la conduzione nei nervi

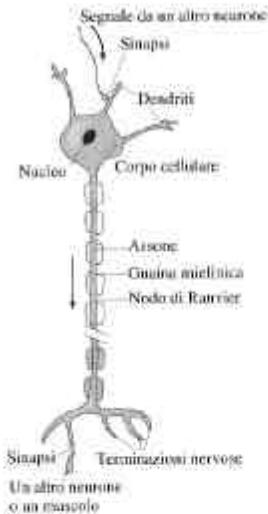


FIGURA 18-24 Un neurone.

Un interessante esempio di flusso di carica elettrica è rappresentato dal nostro efficiente ma complesso sistema nervoso, che ci fornisce i mezzi per essere consapevoli del mondo esterno, permette le comunicazioni all'interno del nostro corpo, e sovraintende al controllo dei muscoli. Benché i dettagli del funzionamento del sistema nervoso non siano ancora stati completamente chiariti, abbiamo tuttavia una conoscenza ragionevolmente buona di come i messaggi siano trasmessi all'interno del sistema nervoso medesimo: essi sono segnali elettrici che passano lungo l'elemento fondamentale del sistema nervoso, il neurone.

I neuroni sono cellule viventi di forma insolita (fig. 18-24). Costituiscono di un corpo principale a cui sono connesse parecchie piccole appendici, i dendriti, e una lunga coda, l'assone. Il segnale è ricevuto dai dendriti e si propaga lungo l'assone fino a raggiungere le terminazioni nervose, da cui viene trasmesso al successivo nervo o a un muscolo tramite una connessione detta sinapsi. (Alcuni neuroni sono anche forme di cellule particolari, le cellule di Schwann, avvolte attorno ai loro assoni; tali cellule formano una guaina stratificata, la guaina mielinica, che serve a isolare i neuroni l'uno dall'altro.) I neuroni sono di tre tipi e svolgono sostanzialmente tre funzioni. I «neuroni sensoriali» portano messaggi dagli occhi, orecchi, cute e altri organi al sistema nervoso centrale, costituito da cervello e midollo spinale. I «neuroni motori» portano i segnali dal sistema nervoso centrale a particolari muscoli e così provocano la contrazione. Questi due tipi di neuroni formano il «sistema periferico» come entità distinta dal sistema nervoso centrale. Il terzo tipo di neurone è l'interneurone, che trasmette segnali tra neuroni. Gli interneuroni sono nel cervello e nel midollo spinale, e spesso sono connessi in raggruppamenti incredibilmente complessi.

Un neurone, prima di trasmettere un segnale elettrico, è nel cosiddetto «stato di riposo». Come quasi tutte le cellule viventi, i neuroni hanno una carica netta positiva sulla superficie esterna della membrana cellulare e una carica negativa su quella interna. Ne abbiamo già discusso nel paragrafo 17-11 parlando del muscolo cardiaco e dell'ECG. Questa differenza di carica, o «strato dipolare», dà origine a una differenza di potenziale tra le superfici della membrana cellulare. Quando un neurone non trasmette un segnale, questo «potenziale a riposo» è finito normalmente come

$$V_{\text{interna}} - V_{\text{esterna}}$$

ha un valore compreso tra -60 mV e -90 mV, secondo il tipo di organismo. Gli ioni più comuni presenti in una cellula sono K^+ , Na^+ e Cl^- . Questi ioni hanno concentrazioni molto diverse tra l'interno e l'esterno di un assone, come indicato dai valori riportati nella tabella 18-2. In oltre, sono presenti anche altri ioni, in modo che i fluidi all'interno all'esterno dell'assone siano neutri elettricamente. A causa della differenza nelle concentrazioni, gli ioni hanno la tendenza a diffondersi attraverso la membrana (rivedete la diffusione, par. 13-15). Tutto nello stato di riposo, la membrana cellulare impedisce qualsiasi flusso netto di ioni Na^+ (attraverso un meccanismo di «pompaggio attivo» di Na^+ fuori dalla cellula), ma deve permettere il flusso di ioni Cl^- in quantità inferiori di ioni K^+ , in modo da generare e mantenere lo stato bipolare di cariche sulle sue superfici. Poiché è presente un uguo concentrazione di ioni K^+ all'interno della cellula che all'esterno, si

TABELLA 18-2
 Concentrazione di ioni all'interno e all'esterno di un tipico assone

	Concentrazione all'interno dell'assone (mol/m ³)	Concentrazione all'esterno dell'assone (mol/m ³)
K^+	140	5
Na^+	15	140
Cl^-	9	125

possono diffondere preferenzialmente verso l'esterno, attraverso la membrana. Uno ione K^+ che passa attraverso la membrana si posiziona sulla superficie esterna, lasciando un'uguale carica negativa sulla superficie interna (fig. 18-25). I fluidi restano neutri, infatti gli ioni sono trattenuti sulla superficie della membrana dalla loro attrazione mutua, indipendentemente da questo processo, gli ioni Cl^- tendono a diffondersi all'interno della cellula, dato che la loro concentrazione all'esterno è più alta. La diffusione sia di K^+ sia di Cl^- tende a rendere la superficie interna della membrana carica negativamente e quella esterna positivamente. Man mano che la carica si accumula sulla superficie della membrana, la diffusione di altri ioni diventa sempre più difficile: gli ioni K^+ che tendono a muoversi verso l'esterno, per esempio, sono respinti dalla carica positiva già presente. L'equilibrio viene raggiunto quando la tendenza a diffondere a causa della differenza di concentrazione è perfettamente bilanciata dalla differenza di potenziale attraverso la membrana. Maggiore è la differenza di concentrazione, più elevata è la differenza di potenziale attraverso la membrana, che, come detto sopra, è compresa nell'intervallo tra -60 mV e -90 mV.

La caratteristica più importante di un neurone non è quella di avere un potenziale di riposo (molte cellule lo hanno), ma piuttosto di rispondere a uno stimolo e condurre un segnale elettrico per tutta la lunghezza. Un nervo può essere stimolato in vari modi. Lo stimolo può essere termico (quando tocchete un fornello caldo) o chimico (quando sentite il profumo di un fiore); può essere una pressione (come sulla pelle o sul timpano), o la luce (come negli occhi); o può essere uno stimolo elettrico di un segnale proveniente dal cervello o da un altro neurone. In esperimenti di laboratorio lo stimolo è di solito elettrico e viene applicato tramite un elettrodo sottile in qualche punto del neurone. Se lo stimolo supera una determinata soglia, un impulso di tensione attraverserà l'assone e questo impulso può essere rivelato in un certo punto dell'assone stesso utilizzando un voltmetro o un oscilloscopio, come in figura 18-26. L'impulso di tensione ha la forma mostrata in figura 18-27, ed è chiamato *potenziale d'azione*. Come potete vedere, il potenziale cresce da un valore di riposo di circa -70 mV fino ad assumere un valore positivo di 30 o 40 mV. Il potenziale d'azione dura circa 1 ms e percorre l'assone a una velocità compresa tra $0,5$ m/s e 150 m/s.

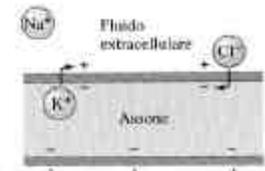


FIGURA 18-25 Come si forma uno strato bipolare di cariche sulla membrana cellulare.

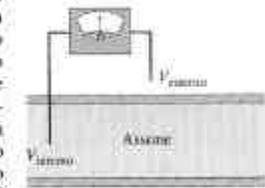


FIGURA 18-26 Misura della differenza di potenziale fra interno ed esterno di un nervo.

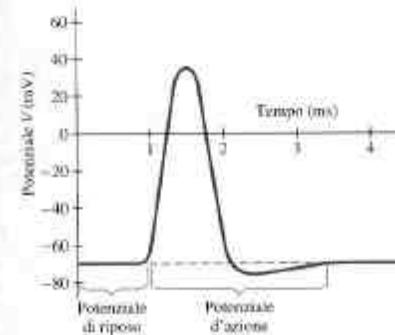


FIGURA 18-27 Potenziale d'azione.

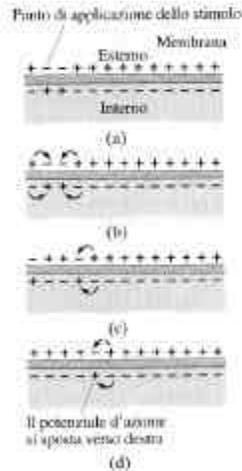


FIGURA 18-28
Propagazione del potenziale d'azione lungo la membrana assonica.

Ma cosa provoca il potenziale d'azione? Apparentemente la membrana cellulare ha la capacità di variare le proprie proprietà di permeabilità. Nel punto in cui avviene la stimolazione, la membrana diventa immediatamente molto più permeabile allo ione Na^+ che non a K^+ e Cl^- . Così, gli ioni Na^+ fluiscono velocemente all'interno della cellula e la superficie interna della parete si carica positivamente, e la differenza di potenziale diviene rapidamente positiva ($+30$ mV in fig. 18-27). Ma poi la membrana riacquista immediatamente le sue caratteristiche originali: diviene impermeabile al Na^+ e pompa fuori ioni Na^+ e la diffusione di ioni Cl^- e K^+ diviene di nuovo predominante, ristabilendo l'originario potenziale di riposo (-70 mV in fig. 18-27).

Cosa fa viaggiare il potenziale d'azione lungo l'assone? Il potenziale d'azione si forma nel punto di stimolazione (fig. 18-28a) e, in tale punto, la membrana diviene momentaneamente positiva all'interno e negativa all'esterno. Le cariche nelle vicinanze vengono attratte verso questa zona (fig. 18-28b) e quindi il potenziale, in queste zone adiacenti, diminuisce formando un nuovo potenziale d'azione. Così, quando la membrana torna alla normalità nel punto originario, nelle vicinanze essa è soggetta a un nuovo potenziale d'azione, e così via. In tal modo il potenziale d'azione si propaga lungo l'assone (fig. 18-28c e d).

Vi potreste chiedere se il numero di ioni che passa attraverso la membrana possa alterare in modo significativo le concentrazioni. La risposta è no, e lo potrete vedere nel prossimo esempio, in cui considereremo l'assone come un condensatore.

ESEMPIO 18-14 FATE UN CALCOLO Capacità di un assone. (a) Valutate la capacità di un assone lungo 10 cm e con un raggio di $10 \mu\text{m}$. Lo spessore della membrana è di circa 10^{-8} m e la costante dielettrica relativa è circa 3. (b) Di che fattore cambia la concentrazione di ioni Na^+ nella cellula, come conseguenza di un potenziale d'azione?

SOLUZIONE (a) La membrana di un assone assomiglia a un condensatore ad armature parallele e di forma cilindrica, con cariche di segno opposto su ciascun lato. La distanza tra le «armature» è lo spessore della membrana, $d = 10^{-8}$ m. L'area A è l'area di un cilindro di raggio r e lunghezza l .

$$A = 2\pi rl = (6.28)(10^{-3} \text{ m})(0.1 \text{ m}) = 6 \times 10^{-4} \text{ m}^2.$$

Dall'eq. 17-7, abbiamo

$$C = K\epsilon_0 \frac{A}{d} = (3)(8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N}\cdot\text{m}^2) \frac{6 \times 10^{-4} \text{ m}^2}{10^{-8} \text{ m}} = 10^{-4} \text{ F}.$$

(b) Dato che il potenziale varia da -70 mV a circa $+30$ mV, la variazione totale è circa 100 mV. La quantità di carica che si sposta è allora

$$Q = CV = (10^{-4} \text{ F})(0.1 \text{ V}) = 10^{-5} \text{ C}.$$

Ciascun ione ha una carica $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C, così il numero di ioni spinti dal potenziale d'azione è $Q/e = (10^{-5} \text{ C})/(1.6 \times 10^{-19} \text{ C}) = 10^{14}$. Il volume del nostro assone cilindrico è

$$V = \pi r^2 l = (3)(10^{-3} \text{ m})^2(0.1 \text{ m}) = 3 \times 10^{-11} \text{ m}^3,$$

e la concentrazione degli ioni Na^+ all'interno della cellula (tab. 18-2) è $15 \text{ mol}/\text{m}^3 = 15 \times 6.02 \times 10^{23} \text{ ioni}/\text{m}^3 = 10^{25} \text{ ioni}/\text{m}^3$. Quindi la cellula contiene $(10^{25} \text{ ioni}/\text{m}^3) \times (3 \times 10^{-11} \text{ m}^3) = 3 \times 10^{14}$ ioni Na^+ . Un potenziale d'azione, quindi, cambierà la concentrazione degli ioni Na^+

al massimo di $10^{14}/(3 \times 10^{14}) = \frac{1}{3} \times 10^{-4}$ o di 1 parte su 30000. Una variazione così piccola non è misurabile.

Possiamo quindi renderci conto che anche 1000 potenziali d'azione non alterano significativamente la concentrazione degli ioni. La pompa del sodio non deve quindi velocemente rimuovere gli ioni Na^+ dopo un potenziale d'azione, ma può agire lentamente nel tempo per mantenere relativamente costante la concentrazione.

La descrizione qui esposta della propagazione di un impulso nervoso può essere applicata solo a un assone senza guaina mielinica. Gli assoni con mielina, d'altra parte, sono isolati dal fluido extracellulare dalla guaina mielinica eccetto in punti detti «nodi di Ranvier» (fig. 18-31). Un potenziale d'azione non può essere rigenerato nei punti coperti dalla guaina mielinica, per cui, una volta che il neurone sia stato stimolato, l'impulso viaggerà ancora lungo la membrana, ma, essendovi una resistenza, l'impulso diminuirà muovendosi lungo l'assone. Tuttavia il segnale indebolito può ancora stimolare un potenziale d'azione pienamente efficiente quando raggiunge un nodo di Ranvier, cosicché il segnale viene ripetutamente amplificato in questi punti. Confrontate questo meccanismo con quello presente in un neurone senza mielina, in cui il segnale è continuamente amplificato da potenziali d'azione ripetuti attraverso tutta la sua lunghezza. Quest'ultimo richiede naturalmente maggiore energia. Lo sviluppo di neuroni mielinizzati ha costituito un passo significativo dal punto di vista dell'evoluzione, in quanto ha garantito una trasmissione più protetta degli impulsi nervosi, ad un minor costo energetico.

Da: Giancoli, Fisica, CEA