CAPITOLO

14

Il sistema nervoso e gli organi di senso

Ogni cosa che vedi, senti, ricordi o decidi passa per un istante dalla membrana di un neurone, sotto forma di pochi ioni che la attraversano.

OBIETTIVI

1. Descrivere l'organizzazione del sistema nervoso e i tipi di neuroni e di cellule gliali.
2. Spiegare il potenziale di riposo, il potenziale d'azione e la sua propagazione, continua e saltatoria.
3. Descrivere il funzionamento di una sinapsi chimica e della giunzione neuromuscolare, e l'azione di veleni e droghe.
4. Riconoscere le parti del midollo spinale e dell'encefalo e le loro funzioni, l'arco riflesso e il sistema autonomo.
5. Spiegare come occhio, orecchio e gli altri organi di senso trasformano gli stimoli in segnali nervosi.
6. Collegare le conoscenze sul sistema nervoso alla tutela della salute: sostanze, alcol e guida, rumore, sonno.

INDICE DEL CAPITOLO

14.1 L'organizzazione del sistema nervoso 2
14.2 Il segnale nervoso 4
14.3 La sinapsi 8
14.4 Il midollo spinale e l'encefalo 12
14.5 Gli organi di senso 16

Scienze naturali 4 · Parte V · Coordinamento e riproduzione, dall'uomo alle piante · versione 1.0
Capitolo 14: Il sistema nervoso e gli organi di senso · pagine 359–384 del volume completo · estratto per lo studio

Sfiori per sbaglio il manico rovente di una pentola: la mano scatta indietro e solo un istante dopo senti il bruciore. In quella frazione di secondo il tuo corpo ha raccolto un'informazione, l'ha portata al midollo spinale, ha deciso una risposta e ha comandato a decine di fibre muscolari di contrarsi; poi ha avvisato anche il cervello, che ha prodotto la sensazione di dolore. Tutto questo avviene grazie a segnali elettrici e chimici che viaggiano lungo cellule specializzate, i neuroni. In questo capitolo vedrai come è organizzato il sistema nervoso, come nasce e si propaga un impulso, come i neuroni comunicano fra loro e con i muscoli, come lavorano il midollo spinale e l'encefalo e come gli organi di senso traducono luce, suoni, sostanze chimiche e pressioni nel linguaggio dei neuroni.

14.1 L'organizzazione del sistema nervoso

Il sistema nervoso svolge tre compiti collegati. Raccoglie informazioni sull'ambiente esterno e sull'interno del corpo (funzione *sensitiva*); le elabora, le confronta con le esperienze passate e decide una risposta (funzione *integrativa*); comanda muscoli e ghiandole che eseguono la risposta (funzione *motoria*). Insieme al sistema endocrino (vedi cap. 13) coordina tutti gli apparati e mantiene l'omeostasi; rispetto agli ormoni, però, i suoi segnali sono molto più rapidi e indirizzati a bersagli precisi.

14.1.1 Sistema nervoso centrale e periferico

Dal punto di vista anatomico si distinguono due parti (Figura 14.1). Il **sistema nervoso centrale** (SNC) comprende l'*encefalo*, contenuto nella scatola cranica, e il *midollo spinale*, che corre nel canale vertebrale: è la sede dell'integrazione. Il **sistema nervoso periferico** (SNP) comprende tutto ciò che sta fuori da cranio e colonna: i *nervi*, cioè fasci di assoni avvolti da connettivo, e i *gangli*, piccoli ammassi di corpi cellulari di neuroni. Dall'encefalo partono **12 paia di nervi cranici**, dal midollo spinale **31 paia di nervi spinali** (8 cervicali, 12 toracici, 5 lombari, 5 sacrali e 1 coccigeo).

Nel SNP i segnali viaggiano in due direzioni. La *via afferente*, o sensitiva, porta al SNC le informazioni raccolte dai recettori; la *via efferente*, o motoria, porta i comandi del SNC agli *effettori*, cioè muscoli e ghiandole. La via efferente si divide a sua volta in *sistema somatico*, che controlla i muscoli scheletrici ed è in gran parte volontario, e **sistema nervoso autonomo**, che regola muscolo liscio, muscolo cardiaco e ghiandole senza che tu ne sia consapevole. Il sistema autonomo ha due componenti, il *simpatico* e il *parasimpatico*, che studierai più avanti in questo capitolo.

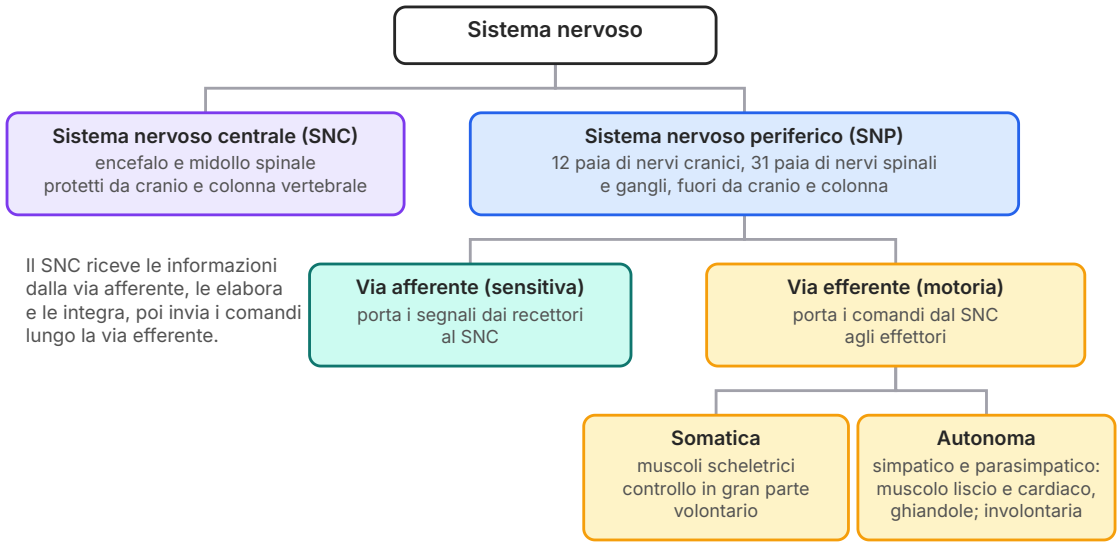


Figura 14.1 L'organizzazione del sistema nervoso. La distinzione fra SNC e SNP è anatomica; quella fra vie afferenti ed efferenti, e fra sistema somatico e autonomo, è funzionale: lo stesso nervo spinale contiene fibre di tutti questi tipi.

14.1.2 Neuroni e cellule gliali

DA RICORDARE

Richiamo. Nel volume dello scorso anno (*Scienze naturali 3*, cap. 14) hai visto che il tessuto nervoso è formato da neuroni e cellule gliali. Il neurone ha un *corpo cellulare* con il nucleo, molti *dendriti* corti e ramificati, che ricevono i segnali, e un unico *assone*, che li trasmette e può superare il metro di lunghezza. Il nome viene dal greco νεῦρον, «nervo, tendine».

Secondo la direzione del segnale i neuroni si dividono in tre gruppi. I *neuroni sensitivi* portano al SNC i segnali dei recettori; i *neuroni motori*, o motoneuroni, portano i comandi agli effettori; gli *interneuroni*, che si trovano solo nel SNC, collegano fra loro gli altri neuroni e sono di gran lunga i più numerosi. Nell'encefalo umano si stimano circa 86 miliardi di neuroni e un numero paragonabile di cellule non neuronali (Azevedo e collaboratori, 2009).

Le **cellule gliali**, o glia, non trasmettono impulsi ma sono indispensabili ai neuroni. Gli *astrociti* regolano la composizione del liquido che circonda i neuroni e contribuiscono alla barriera fra sangue e tessuto nervoso; la *microglia* è formata da cellule di difesa che inglobano detriti e microrganismi; le *cellule ependimali* rivestono le cavità dell'encefalo e partecipano alla produzione del liquor. Due tipi di glia, infine, formano la **guaina mielinica**: gli *oligodendrociti* nel SNC e le *cellule di Schwann* nel SNP. Ognuna di queste cellule si avvolge molte volte attorno a

un tratto di assone, come un nastro attorno a una matita: si forma così un manicotto di membrane sovrapposte, ricco di lipidi, che isola elettricamente l'assone. Fra un manicotto e il successivo resta scoperto un tratto brevissimo di assone, il **nodo di Ranvier** (Figura 14.2). Il colore chiaro della mielina spiega la differenza fra *sostanza bianca*, formata soprattutto da fasci di assoni mielinizzati, e *sostanza grigia*, ricca di corpi cellulari, dendriti e sinapsi.

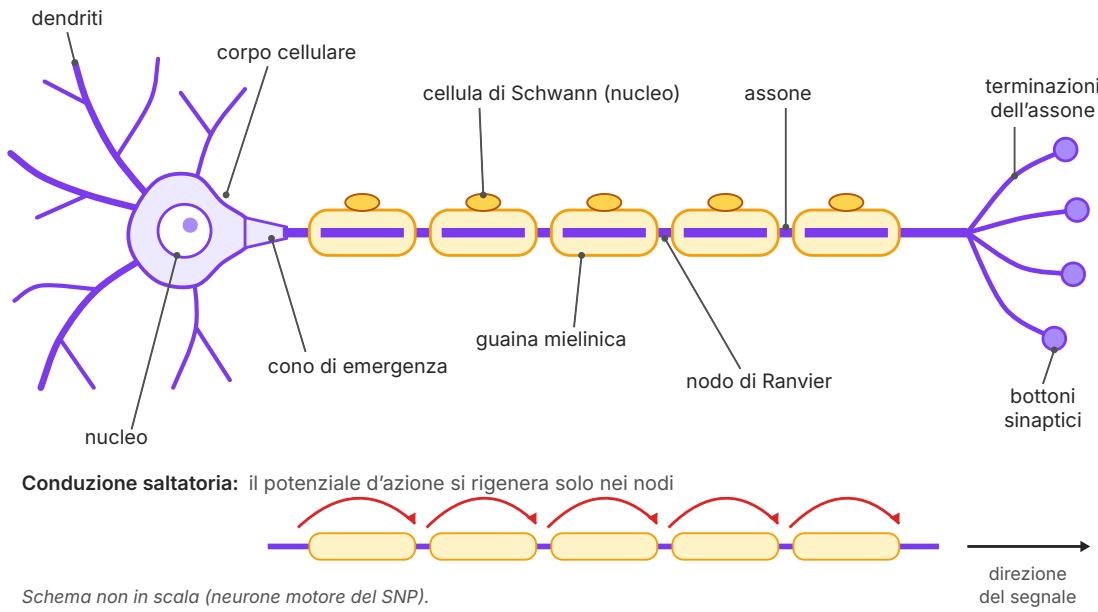


Figura 14.2 Un neurone motore mielinizzato del SNP (schema non in scala). Ogni cellula di Schwann avvolge un solo tratto di assone; i nodi di Ranvier restano scoperti. In basso: nella conduzione saltatoria il potenziale d'azione si rigenera solo nei nodi.

14.2 Il segnale nervoso

14.2.1 Il potenziale di riposo

COLLEGAMENTI

Fisica · La differenza di potenziale. La differenza di potenziale fra due punti è l'energia che una carica di 1 coulomb guadagna o perde passando dall'uno all'altro; si misura in volt (V). Quella fra l'interno e l'esterno di un neurone è circa un ventesimo di quella di una pila stilo da 1,5 V e si esprime quindi in millivolt: 1 mV = 0,001 V.

Se si inserisce un microelettrodo sottilissimo in un neurone a riposo e un secondo elettrodo nel liquido esterno, si misura una differenza di potenziale di circa −70 mV: l'interno della cellula è negativo rispetto all'esterno. Questo valore è il **potenziale di riposo**. Nasce da due fatti. Primo, gli ioni sono distribuiti in modo diseguale ai due lati della membrana: Na^+ è circa dieci volte più concentrato fuori che dentro, mentre K^+ è circa trenta volte più concentrato dentro che fuori; nel citoplasma restano inoltre molte proteine e altre molecole con carica negativa, troppo grandi per uscire. Secondo, a riposo la membrana è molto più permeabile a K^+ che a Na^+, perché contiene canali per il potassio sempre aperti. Gli ioni K^+ tendono a uscire seguendo il loro gradiente di concentrazione e portano fuori cariche positive, lasciando l'interno negativo.

I gradienti non si esauriscono grazie alla **pompa sodio-potassio**, una proteina di trasporto attivo della membrana che a ogni ciclo idrolizza una molecola di ATP e porta **3 Na^+ fuori** e **2 K^+ dentro** la cellula. La pompa lavora senza sosta e consuma una parte importante dell'energia del neurone: anche per questo l'encefalo, che è circa il 2 % della massa corporea, usa circa un quinto dell'energia spesa dal corpo a riposo.

14.2.2 Il potenziale d'azione

Un neurone trasmette informazioni modificando per un istante il suo potenziale di membrana. Quando uno stimolo rende l'interno meno negativo (si dice che la membrana si *depolarizza*) e il potenziale raggiunge la **soglia**, circa −55 mV, si scatena un evento rapidissimo e sempre uguale, il **potenziale d'azione** (Figura 14.3). Protagonisti sono due tipi di *canali voltaggio-dipendenti*, proteine che si aprono o si chiudono a seconda del potenziale di membrana.

1. **Depolarizzazione.** Alla soglia si aprono i canali per il sodio. Na^+ entra in massa, spinto sia dal gradiente di concentrazione sia dall'attrazione dell'interno negativo; in meno di un millisecondo il potenziale sale fino a circa +30 mV e l'interno diventa per un attimo positivo.
2. **Ripolarizzazione.** I canali per il sodio si *inattivano*, cioè si bloccano e non possono riaprirsi subito; intanto si aprono, più lentamente, i canali per il potassio. K^+ esce e il potenziale torna verso valori negativi.
3. **Iperpolarizzazione.** I canali per il potassio si chiudono con un certo ritardo: per un breve tempo esce più K^+ del necessario e il potenziale scende sotto il valore di riposo, fino a circa −80 mV, prima di tornare a −70 mV.

Tutto dura uno o due millisecondi. Gli ioni che attraversano la membrana durante un singolo potenziale d'azione sono pochissimi rispetto a quelli presenti: le concentrazioni non cambiano in modo misurabile e la pompa sodio-potassio ristabilisce i gradienti sul lungo periodo.

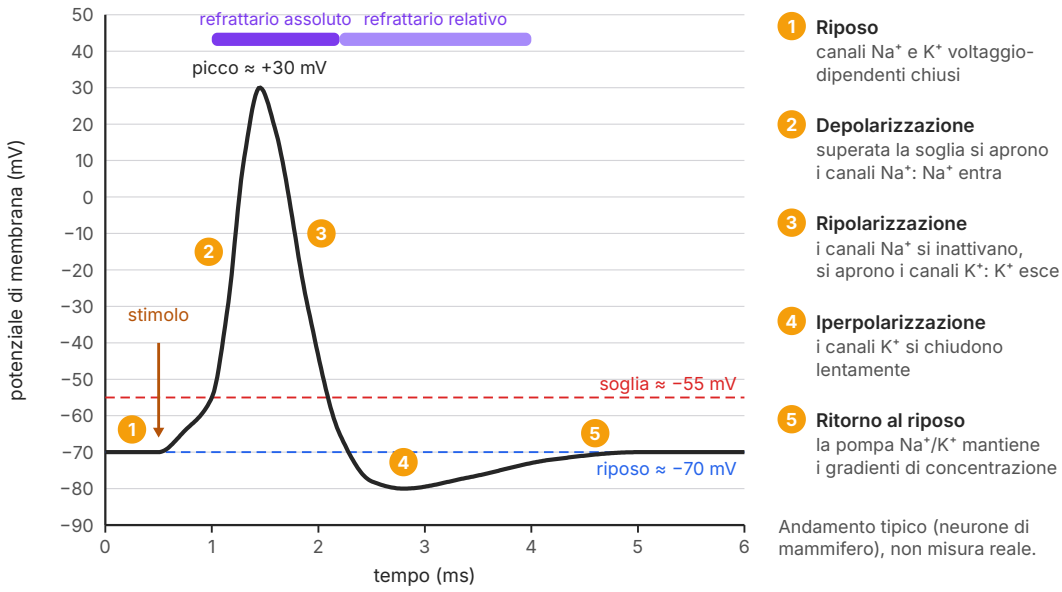


Figura 14.3 Il potenziale d'azione in un punto della membrana: andamento tipico in un neurone di mammifero, con le fasi numerate e lo stato dei canali voltaggio-dipendenti. Le barre in alto indicano il periodo refrattario assoluto e relativo.

Il potenziale d'azione obbedisce alla legge del **tutto-o-nulla**: se lo stimolo non porta la membrana alla soglia non succede nulla; se la porta alla soglia, il potenziale d'azione ha sempre la stessa ampiezza, qualunque sia l'intensità dello stimolo. Subito dopo, per circa un millisecondo, nessuno stimolo può produrne un altro, perché i canali per il sodio sono inattivati: è il **periodo refrattario** assoluto, seguito da un periodo relativo in cui serve uno stimolo più forte del normale. Ma allora, come distingue il sistema nervoso una carezza da una pacca? Con la **frequenza**: uno stimolo più intenso produce più potenziali d'azione al secondo, e attiva più neuroni. Il periodo refrattario pone un limite massimo alla frequenza di scarica di un neurone.

Il meccanismo fu chiarito da due fisiologi britannici, Alan Hodgkin e Andrew Huxley, con esperimenti sull'assone gigante del calamaro, abbastanza grosso da potervi inserire un elettrodo. Nel 1952 pubblicarono un modello matematico che descrive le correnti di sodio e di potassio e riproduce la forma del potenziale d'azione; per questo lavoro ricevettero il premio Nobel per la fisiologia o la medicina nel 1963.

IN SINTESI

potenziale di riposo ≈ −70 mV (interno negativo) · soglia ≈ −55 mV · picco ≈ +30 mV · iperpolarizzazione ≈ −80 mV

depolarizzazione: entra Na^+ · ripolarizzazione: esce K^+ · pompa: 3 Na^+ fuori, 2 K^+ dentro, 1 ATP

intensità dello stimolo → frequenza dei potenziali d'azione, non ampiezza

ERRORE FREQUENTE

«Il potenziale d'azione è una corrente di elettroni che corre lungo l'assone, come in un filo». No: nei neuroni le cariche sono portate da ioni, e il segnale avanza perché ogni tratto di membrana genera di nuovo il proprio potenziale d'azione, con ioni che attraversano la membrana in quel punto.

«Uno stimolo più forte dà un potenziale d'azione più grande». No: l'ampiezza è sempre la stessa (tutto-o-nulla); cambia la frequenza.

«La mielina conduce l'impulso». No: la mielina è un isolante. Il potenziale d'azione si genera solo nei nodi di Ranvier, dove la membrana è scoperta.

14.2.3 La propagazione dell'impulso

Un potenziale d'azione nato in un punto dell'assone (di solito nel cono di emergenza, all'origine dell'assone) produce correnti locali di ioni che depolarizzano il tratto di membrana vicino fino alla soglia: lì nasce un nuovo potenziale d'azione, che a sua volta depolarizza il tratto successivo, e così via. Il segnale non torna indietro perché la membrana appena attivata è nel periodo refrattario. Negli assoni privi di mielina questa *conduzione continua* è lenta, circa 0,5–2 m/s. Negli assoni mielinizzati le correnti passano sotto la guaina isolante e il potenziale d'azione si rigenera soltanto nei nodi di Ranvier: l'impulso «salta» da un nodo all'altro (Figura 14.2, in basso). Questa **conduzione saltatoria** è molto più veloce, fino a circa 120 m/s, e più economica, perché la pompa deve lavorare solo nei nodi. Anche il diametro conta: a parità di altre condizioni, un assone più grosso conduce più in fretta.

Nella *sclerosi multipla* il sistema immunitario danneggia la mielina del SNC (vedi cap. 11 per le malattie autoimmuni): la conduzione rallenta o si blocca, e compaiono disturbi della vista, della sensibilità e del movimento che variano secondo le zone colpite.

ESEMPIO SVOLTO

Problema. Quanto tempo impiega un impulso per percorrere 1,0 m, dal piede al midollo spinale, lungo una fibra mielinizzata che conduce a 100 m/s? E lungo una fibra senza mielina che conduce a 1,0 m/s?

Soluzione. Il tempo è la distanza divisa per la velocità: $t = d/v$. Fibra mielinizzata: t = 1,0 m / 100 m/s = 0,010 s = 10 ms. Fibra senza mielina: t = 1,0 m / 1,0 m/s = 1,0 s.

Commento. La fibra mielinizzata è cento volte più veloce. Per questo sono mielinizzate le fibre che devono rispondere in fretta, come quelle che comandano i muscoli scheletrici o portano il tatto, mentre molte fibre del dolore lento e del sistema autonomo sono prive di mielina.

14.3 La sinapsi

14.3.1 Come funziona una sinapsi chimica

Il punto in cui un neurone trasmette il segnale a un'altra cellula, un neurone, una fibra muscolare o una cellula ghiandolare, si chiama **sinapsi**, dal greco σύναψις, «congiunzione». Nella maggior parte delle sinapsi le due cellule non si toccano: le separa la *fessura sinaptica*, larga poche decine di nanometri, che il segnale elettrico non può attraversare. Il messaggio passa allora in forma chimica, affidato a un **neurotrasmettitore** (Figura 14.4).

1. Il potenziale d'azione arriva al *bottone sinaptico*, la terminazione dell'assone.
2. La depolarizzazione apre canali voltaggio-dipendenti per il calcio: Ca^{2+}, più concentrato fuori, entra nel bottone.
3. Ca^{2+} fa fondere con la membrana presinaptica le *vescicole sinaptiche*, che riversano il neurotrasmettitore nella fessura (esocitosi).
4. Il neurotrasmettitore diffonde e si lega a recettori specifici della membrana postsinaptica; molti di questi recettori sono canali ionici che si aprono.
5. Il segnale si spegne in fretta: il neurotrasmettitore viene demolito da enzimi della fessura o riassorbito dal neurone presinaptico (*ricaptazione*).

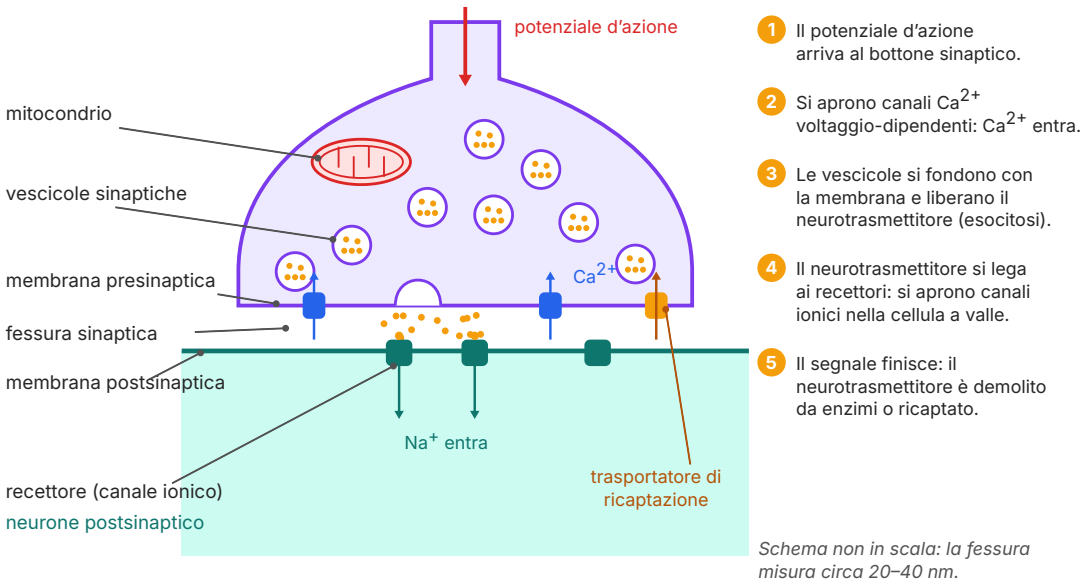


Figura 14.4 Una sinapsi chimica (schema non in scala). Il segnale va in una sola direzione: dal neurone presinaptico, che contiene le vescicole, alla cellula postsinaptica, che porta i recettori.

Se i canali aperti lasciano entrare Na^+, la membrana postsinaptica si depolarizza e la cellula si avvicina alla soglia: la sinapsi è *eccitatoria*. Se invece lasciano entrare ioni cloruro, Cl^-, o uscire K^+, la membrana diventa più negativa e la cellula si allontana dalla soglia: la sinapsi è *inibitoria*. Un neurone dell'encefalo può ricevere migliaia di sinapsi; i loro effetti si sommano, e solo se la somma porta il cono di emergenza alla soglia parte un potenziale d'azione. La sinapsi quindi non è un semplice passaggio: è il punto in cui l'informazione viene pesata e integrata. Il passaggio chimico richiede un po' di tempo, circa mezzo millisecondo per sinapsi (il *ritardo sinaptico*). Esistono anche *sinapsi elettriche*, in cui le cellule sono unite da canali che lasciano passare direttamente gli ioni: sono rapidissime e si trovano in alcune zone dell'encefalo; giunzioni dello stesso tipo, nei dischi intercalari, fanno passare l'eccitazione da una cellula all'altra del muscolo cardiaco (vedi cap. 10).

14.3.2 I neurotrasmettitori

Si conoscono decine di neurotrasmettitori; la Tabella 14.1 riassume i principali. Lo stesso neurotrasmettitore può avere effetti diversi in sinapsi diverse, perché l'effetto dipende dal tipo di recettore della cellula postsinaptica: l'acetilcolina, per esempio, eccita i muscoli scheletrici ma rallenta il cuore.

Tabella 14.1 I principali neurotrasmettitori (in sintesi).

Neurotrasmettitore	Dove agisce (esempi)	Effetti principali
acetilcolina	giunzione neuromuscolare; sistema parasimpatico; encefalo	contrazione dei muscoli scheletrici; rallenta il cuore; attenzione e memoria
noradrenalina	sistema simpatico; tronco encefalico	risposta di «attacco o fuga»; vigilanza
dopamina	mesencefalo e sue connessioni	controllo del movimento; motivazione e ricompensa
serotonina	tronco encefalico e sue connessioni	umore, sonno, appetito
glutammato	quasi tutto il SNC	principale eccitatorio; apprendimento e memoria
GABA	quasi tutto il SNC	principale inibitorio
endorfine	encefalo e midollo spinale	riducono la percezione del dolore

14.3.3 La giunzione neuromuscolare

Nel volume dello scorso anno hai visto che la contrazione di una fibra muscolare scheletrica comincia con un segnale nervoso; ora puoi capire come quel segnale passa. La **giunzione neuromuscolare** è la sinapsi fra il bottone di un motoneurone e una fibra muscolare. Il neurotrasmettitore è l'acetilcolina: si lega ai recettori della membrana della fibra, apre canali che lasciano entrare Na^+ e fa partire nella fibra un potenziale d'azione. Questo si propaga lungo la membrana e fa liberare Ca^{2+} dal reticolo sarcoplasmatico, da cui parte lo scorrimento dei filamenti (*Scienze naturali 3*, cap. 14). Un enzima della fessura, l'*acetilcolinesterasi*, demolisce l'acetilcolina in pochi millisecondi, così la fibra si rilassa se non arrivano nuovi impulsi.

Molti veleni agiscono proprio qui. Il *curaro*, usato da popolazioni indigene dell'America meridionale per le punte delle frecce, occupa i recettori dell'acetilcolina senza aprirli: i muscoli non rispondono più e la preda muore per paralisi dei muscoli respiratori. Sostanze con lo stesso meccanismo si usano oggi in anestesia, sotto ventilazione artificiale. La *tossina botulinica*, prodotta dal batterio *Clostridium botulinum*, impedisce invece la liberazione dell'acetilcolina: provoca il botulismo, un'intossicazione grave legata soprattutto a conserve casalinghe preparate senza le dovute precauzioni. In dosi minime e controllate la stessa tossina è usata in medicina per rilassare muscoli in contrazione eccessiva.

APPROFONDIMENTO

Approfondimento · Dopo Galvani e Volta: l'elettricità dei nervi. Nel cap. 6 hai letto la disputa fra Luigi Galvani e Alessandro Volta. Per Galvani le zampe di rana collegate da un arco di due metalli diversi si contraevano grazie a un'«elettricità animale» propria dei tessuti; per Volta la corrente nasceva dal contatto fra i metalli, e la rana era soltanto un rivelatore sensibilissimo. Galvani rispose già nel 1794 con un esperimento senza alcun metallo: bastava mettere a contatto il nervo con il muscolo perché la zampa si contraesse.

Volta, per parte sua, costruì un generatore senza alcun tessuto animale, la pila (1800; vedi cap. 6). Nell'Ottocento strumenti sempre più sensibili permisero di misurare direttamente le correnti di nervi e muscoli. Oggi sappiamo che entrambi avevano colto una parte di verità: la pila funziona davvero senza rane, ma nervi e muscoli producono davvero segnali elettrici propri, i potenziali d'azione che hai studiato in questo capitolo.

14.3.4 Le droghe e il circuito della ricompensa

Alcuni gruppi di neuroni del mesencefalo inviano assoni a regioni profonde dell'encefalo e alla corteccia frontale e vi liberano dopamina quando facciamo qualcosa di utile alla sopravvivenza, come mangiare quando abbiamo fame o ricevere l'approvazione degli altri. Questo *circuito della ricompensa* associa piacere e motivazione ai comportamenti e ci spinge a ripeterli. Tutte le sostanze che danno dipendenza aumentano, per vie diverse, la dopamina in questo circuito, ma in modo molto più intenso e brusco delle ricompense naturali.

COLLEGAMENTI

Educazione alla salute · Come agiscono alcune sostanze. L'*alcol* potenzia le sinapsi inibitorie che usano il GABA e deprime l'attività del SNC: rallenta i riflessi, altera l'equilibrio e il giudizio; a dosi alte può deprimere i centri del respiro. La *nicotina* del tabacco si lega ai recettori dell'acetilcolina ed è una delle sostanze che danno dipendenza più rapidamente. Il THC della *cannabis* agisce su recettori propri, i recettori dei cannabinoidi, presenti in aree importanti per la memoria, l'attenzione e la coordinazione. La *cocaina* blocca la ricaptazione della dopamina, che resta più a lungo nella fessura; aumenta frequenza cardiaca e pressione. Gli *oppioidi* (morfina, eroina e molti farmaci antidolorifici) si legano agli stessi recettori delle endorfine; il rischio più grave è la depressione del respiro in caso di sovradosaggio.

L'encefalo continua a maturare per tutta l'adolescenza e oltre i vent'anni, soprattutto nelle aree frontali che controllano gli impulsi: in questa fase è più vulnerabile agli effetti delle sostanze. Chi ha un problema, o è preoccupato per qualcuno, può rivolgersi al medico di famiglia, a un consultorio o ai Servizi per le dipendenze (SerD) dell'azienda sanitaria locale.

Con l'uso ripetuto le sinapsi si adattano: diminuiscono i recettori o la loro risposta, e per ottenere lo stesso effetto serve una dose maggiore (*tolleranza*). Se la sostanza manca compaiono ma-

lessere e desiderio intenso di assumerla (*astinenza*). La *dipendenza* è una condizione in cui la ricerca della sostanza continua nonostante i danni evidenti alla salute, allo studio, alle relazioni.

14.4 Il midollo spinale e l'encefalo

14.4.1 Il midollo spinale

Il midollo spinale è un cordone lungo circa 45 cm nell'adulto, che scende dal tronco encefalico dentro il canale vertebrale fino all'altezza delle prime vertebre lombari. In sezione trasversale (Figura 14.5) mostra una *sostanza grigia* interna a forma di farfalla, o di H, con i corpi cellulari dei neuroni, circondata da *sostanza bianca*, formata dai fasci di assoni che salgono verso l'encefalo o ne scendono. Al centro corre un sottile canale pieno di liquor.

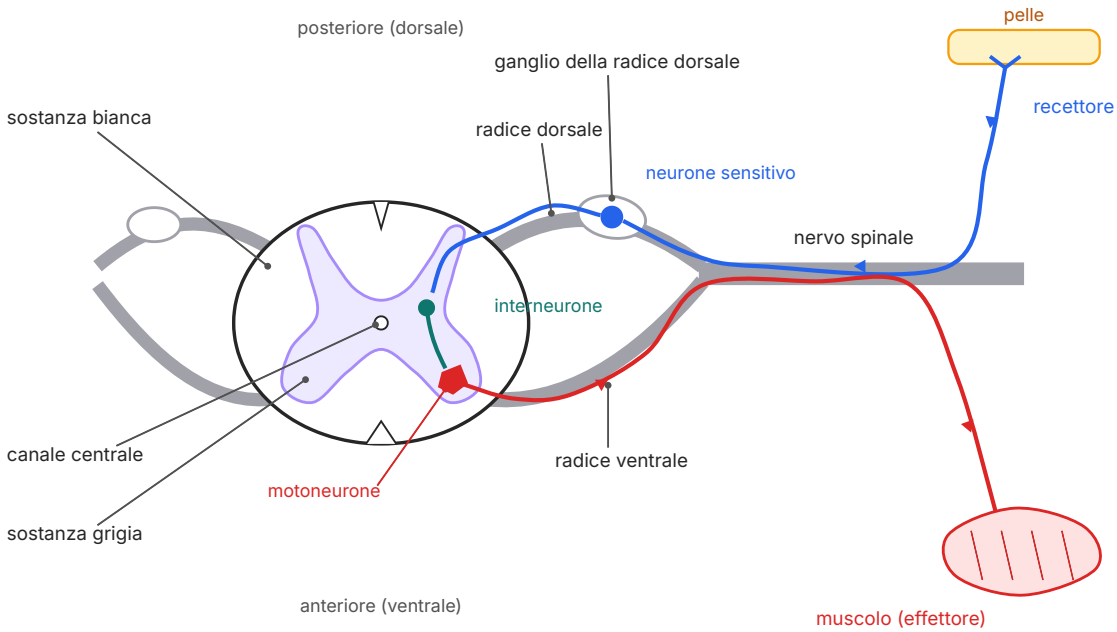


Figura 14.5 Sezione trasversale del midollo spinale e arco riflesso di retrazione (schema non in scala). Il neurone sensitivo (blu) ha il corpo cellulare nel ganglio della radice dorsale; l'interneurone (verde) collega il neurone sensitivo al motoneurone (rosso), che esce dalla radice ventrale. Le frecce indicano la direzione del segnale.

Ogni nervo spinale si attacca al midollo con due radici. La *radice dorsale*, o posteriore, contiene le fibre sensitive; lungo il suo percorso si trova un rigonfiamento, il *ganglio della radice dorsale*, che contiene i corpi cellulari dei neuroni sensitivi. La *radice ventrale*, o anteriore, contiene gli assoni dei motoneuroni, i cui corpi cellulari stanno nelle corna anteriori della sostanza grigia. Le due radici si uniscono in un nervo spinale *misto*, che porta fibre sensitive e motorie.

14.4.2 L'arco riflesso

Un *riflesso* è una risposta automatica, rapida e sempre uguale a uno stimolo, che non richiede l'intervento della volontà. Il percorso nervoso che lo produce, l'**arco riflesso**, ha cinque elementi: un *recettore*, un *neurone sensitivo*, un *centro di integrazione* nel SNC, un *motoneurone* e un *effettore*. Nel *riflesso patellare*, che il medico provoca battendo con un martelletto sul tendine sotto la rotula, lo stiramento del muscolo quadricipite eccita recettori di stiramento del muscolo stesso; il neurone sensitivo fa sinapsi direttamente con il motoneurone del quadricipite, che si contrae e fa scattare la gamba in avanti. Fra recettore ed effettore c'è una sola sinapsi nel midollo: è un riflesso *monosinaptico*.

Nel *riflesso di retrazione*, quello della pentola rovente, il neurone sensitivo attiva uno o più interneuroni, che a loro volta eccitano i motoneuroni dei muscoli flessori del braccio: è un riflesso *polisinaptico*. Mentre il braccio si ritrae, altre fibre portano il segnale all'encefalo: la sensazione di dolore arriva quando la risposta è già partita.

14.4.3 L'encefalo: protezioni e tronco encefalico

Encefalo e midollo spinale sono protetti dalle ossa, da tre membrane connettivali, le *meningi* (dall'esterno: dura madre, aracnoide e pia madre), e dal *liquor*, o liquido cerebrospinale, che riempie le cavità interne dell'encefalo (i ventricoli) e lo spazio sotto l'aracnoide e attutisce i colpi. L'infiammazione delle meningi, la *meningite*, è in genere dovuta a virus o batteri; contro alcuni dei batteri responsabili esistono vaccini (vedi cap. 11).

Il **tronco encefalico** collega il midollo spinale al resto dell'encefalo ed è formato da *mesencefalo*, *ponte* e *bulbo* (Figura 14.6b). Da esso nasce la maggior parte dei nervi cranici, e vi si trovano centri vitali: i centri del respiro (vedi cap. 9), quelli che regolano frequenza cardiaca e pressione arteriosa (vedi cap. 10), i centri della deglutizione, della tosse e del vomito. Dietro il tronco si trova il **cervelletto**, che confronta di continuo i comandi motori con le informazioni sulla posizione del corpo e corregge i movimenti: coordina, mantiene l'equilibrio e permette di imparare gesti automatici come andare in bicicletta o suonare uno strumento. Il cervelletto è molto sensibile all'alcol, che rende l'andatura incerta e i movimenti imprecisi.

Sopra il tronco si trova il *diencefalo*. Il *talamo* è una stazione di smistamento: quasi tutte le informazioni sensoriali (non quelle olfattive) passano di qui prima di raggiungere la corteccia. L'*ipotalamo*, sotto il talamo, regola temperatura corporea, fame, sete e ritmi sonno-veglia, comanda il sistema autonomo e controlla l'ipofisi: è il ponte fra sistema nervoso ed endocrino (vedi cap. 13).

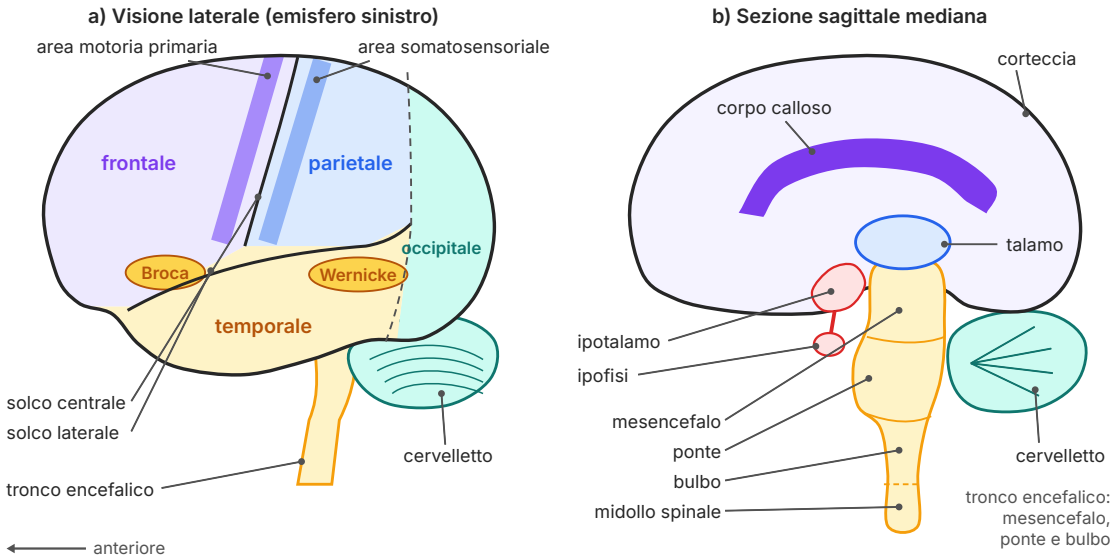


Figura 14.6 L'encefalo (schema non in scala). a) Visione laterale dell'emisfero sinistro con i quattro lobi, le aree motoria e somatosensoriale primarie ai due lati del solco centrale e le aree del linguaggio. b) Sezione sagittale mediana: il corpo calloso unisce i due emisferi; talamo e ipotalamo formano il diencefalo; mesencefalo, ponte e bulbo formano il tronco encefalico.

14.4.4 Il telencefalo e la corteccia

La parte più voluminosa dell'encefalo umano è il *telencefalo*, diviso in due *emisferi* uniti da un grande fascio di assoni, il **corpo calloso**. Lo strato esterno degli emisferi, la **corteccia cerebrale**, è sostanza grigia spessa pochi millimetri, ripiegata in circonvoluzioni e solchi che ne aumentano molto la superficie; sotto si trova la sostanza bianca. Due solchi profondi, il *solco centrale* e il *solco laterale*, delimitano in ogni emisfero quattro lobi: frontale, parietale, temporale e occipitale (Figura 14.6a).

Davanti al solco centrale, nel lobo frontale, si trova l'*area motoria primaria*, che comanda i muscoli volontari; dietro, nel lobo parietale, l'*area somatosensoriale primaria*, che riceve tatto, temperatura, dolore e posizione del corpo. Ogni emisfero controlla e «sente» la metà opposta del corpo, perché le vie nervose si incrociano. In entrambe le aree le parti del corpo sono rappresentate in ordine, come su una mappa, ma con estensione proporzionale alla precisione richiesta: mani, labbra e lingua occupano molto più spazio del tronco. La corteccia visiva primaria si trova nel lobo occipitale, quella uditiva nel lobo temporale. Il lobo frontale ospita inoltre le funzioni di pianificazione, attenzione e controllo degli impulsi.

Il linguaggio fu la prima funzione collegata a un'area precisa della corteccia. Nel 1861 il medico francese Paul Broca descrisse un paziente che capiva ciò che gli veniva detto ma riusciva a pronunciare quasi solo una sillaba; dopo la morte trovò una lesione nella parte inferiore del

lobo frontale sinistro, oggi chiamata *area di Broca*, necessaria per produrre il linguaggio. Nel 1874 il neurologo tedesco Carl Wernicke descrisse pazienti che parlavano in modo scorrevole ma senza senso e non capivano le parole: la lesione era nel lobo temporale sinistro, nell'*area di Wernicke*, legata alla comprensione. Nella grande maggioranza delle persone le aree del linguaggio si trovano nell'emisfero sinistro.

Sotto la corteccia, sul lato interno dei lobi temporali, si trovano strutture che partecipano alle emozioni e alla memoria. L'*ippocampo* è indispensabile per fissare nuovi ricordi di fatti ed eventi; l'*amigdala* valuta il significato emotivo degli stimoli, soprattutto la paura. Ricordare e imparare significa modificare le sinapsi: quelle usate spesso si rafforzano, quelle inutilizzate si indeboliscono, e si formano nuove connessioni. Questa capacità di cambiare con l'esperienza, la **plasticità** neuronale, è massima nell'infanzia e nell'adolescenza ma dura tutta la vita, e permette in parte di recuperare funzioni dopo un danno, per esempio con la riabilitazione dopo un ictus.

Anche il sonno è un'attività dell'encefalo, non una semplice pausa. Durante la notte si alternano fasi di sonno non-REM, sempre più profondo, e fasi di sonno REM (da *rapid eye movement*), in cui gli occhi si muovono rapidamente sotto le palpebre e si fanno i sogni più vividi; un ciclo completo dura circa 90 minuti. Durante il sonno si consolidano i ricordi della giornata. Per gli adolescenti dai 13 ai 18 anni l'American Academy of Sleep Medicine (2016) raccomanda dalle 8 alle 10 ore di sonno per notte.

APPROFONDIMENTO

Approfondimento · Dalla reazione nera al fattore di crescita nervoso. Nel 1873 Camillo Golgi, medico che lavorava in un ospedale di Abbiategrasso, mise a punto un metodo di colorazione al nitrato d'argento, la *reazione nera*, che colora in nero pochi neuroni alla volta, ma interi, con tutti i loro prolungamenti. Golgi pensava che i neuroni formassero una rete continua. Lo spagnolo Santiago Ramón y Cajal, usando proprio il metodo di Golgi, sostenne invece che ogni neurone è una cellula distinta e che i segnali passano da una cellula all'altra in punti di contatto: è la «dottrina del neurone», confermata in seguito dal microscopio elettronico, che mostrò la fessura sinaptica. Nel 1906 i due ricevettero insieme il premio Nobel, pur restando in disaccordo.

Rita Levi-Montalcini, torinese, esclusa dall'università dalle leggi razziali del 1938, continuò le sue ricerche sugli embrioni di pollo in un piccolo laboratorio allestito in casa. Dopo la guerra, negli Stati Uniti, scoprì il *fattore di crescita nervoso* (NGF), una proteina che guida la sopravvivenza e lo sviluppo di alcuni neuroni. Per questa scoperta ricevette il premio Nobel per la fisiologia o la medicina nel 1986, insieme al biochimico statunitense Stanley Cohen.

ERRORE FREQUENTE

«Usiamo solo il 10 % del cervello». Falso. Le tecniche che misurano l'attività dell'encefalo mostrano che tutte le aree lavorano, anche se non tutte nello stesso momento; un danno anche piccolo, in quasi ogni zona, ha conseguenze.

«L'emisfero sinistro è logico, il destro è creativo». È una semplificazione senza base. Alcune funzioni sono più rappresentate in un emisfero, come il linguaggio a sinistra nella maggior parte delle persone, ma qualunque attività complessa, logica o creativa che sia, impegna entrambi gli emisferi, che comunicano attraverso il corpo calloso.

14.4.5 Il sistema nervoso autonomo

Il sistema autonomo regola gli organi interni attraverso catene di due neuroni: il primo ha il corpo cellulare nel SNC, il secondo in un ganglio periferico. Le sue due componenti hanno in genere effetti opposti sullo stesso organo (Tabella 14.2). Il *simpatico*, i cui neuroni escono dalla parte toracica e lombare del midollo, prepara il corpo all'azione e all'emergenza: è la risposta di «attacco o fuga», rinforzata dall'adrenalina liberata dalla parte midollare delle ghiandole surrenali (vedi cap. 13). Il *parasimpatico*, che esce dal tronco encefalico, soprattutto con il nervo vago, e dalla parte sacrale del midollo, prevale nelle condizioni di riposo e favorisce digestione e recupero. I neuroni postgangliari del parasimpatico liberano acetilcolina; quelli del simpatico, per lo più, noradrenalina.

Tabella 14.2 Effetti del simpatico e del parasimpatico su alcuni organi.

Organo	Simpatico	Parasimpatico
pupilla	si dilata	si restringe
cuore	aumentano frequenza e forza di contrazione	diminuisce la frequenza
bronchi	si dilatano	si restringono
stomaco e intestino	motilità e secrezioni ridotte	motilità e secrezioni aumentate
vescica urinaria	la parete si rilassa (trattiene l'urina)	la parete si contrae (svuotamento)

14.5 Gli organi di senso

14.5.1 Dai recettori alle sensazioni

Un **recettore sensoriale** è una cellula, o la terminazione di un neurone, specializzata nel rispondere a un tipo di stimolo. Si distinguono *meccanocettori* (pressione, vibrazione, stiramento, suono), *termocettori* (caldo e freddo), *nocicettori* (stimoli che danneggiano i tessuti, percepiti

come dolore), *chemocettori* (sostanze chimiche: gusto, olfatto, ma anche CO_2 nel sangue, vedi cap. 9) e *fotorecettori* (luce). In ogni caso lo stimolo modifica il potenziale di membrana del recettore; questa *trasduzione* trasforma luce, pressione o molecole in potenziali d'azione, l'unico linguaggio del sistema nervoso. L'intensità dello stimolo è codificata dalla frequenza degli impulsi e dal numero di recettori attivati. Molti recettori, se lo stimolo resta costante, rispondono sempre meno: è l'*adattamento*, per cui dopo pochi minuti non senti più i vestiti sulla pelle né l'odore di una stanza.

La sensazione non nasce nel recettore ma nella corteccia. Il tipo di sensazione dipende dall'area raggiunta dagli impulsi, non dallo stimolo: se premi delicatamente sulla palpebra chiusa vedi lampi di luce, perché la retina, stimolata meccanicamente invece che dalla luce, invia comunque i suoi segnali lungo il nervo ottico alla corteccia visiva.

14.5.2 La vista

L'occhio (Figura 14.7) è un globo con una parete a tre strati. Lo strato esterno è la *sclera*, bianca e resistente, che davanti diventa trasparente e più curva, formando la *cornea*. Lo strato intermedio è la *coroide*, ricca di vasi e di pigmento scuro, che davanti continua nel *corpo ciliare* e nell'*iride*, il disco colorato con un foro centrale, la *pupilla*. Muscoli lisci dell'iride, comandati dal sistema autonomo, regolano il diametro della pupilla e quindi la luce che entra. Lo strato interno è la **retina**, che contiene i fotorecettori. Dietro l'iride si trova il *cristallino*, una lente biconvessa elastica appesa al corpo ciliare dalle fibre della zonula. Fra cornea e cristallino c'è un liquido limpido, l'*umor acqueo*; dietro il cristallino una gelatina trasparente, l'*umor vitreo*, mantiene la forma del globo.

Cornea e cristallino insieme si comportano come una lente convergente: dagli oggetti lontani formano sulla retina un'immagine reale, rimpicciolita e **capovolta**, che l'encefalo interpreta nel verso giusto. La cornea dà la maggior parte della convergenza, ma è il cristallino che permette di mettere a fuoco a distanze diverse. Per guardare un oggetto vicino il muscolo ciliare si contrae, le fibre della zonula si allentano e il cristallino, elastico, diventa più convesso e più convergente: è l'**accomodazione**. Per guardare lontano il muscolo si rilassa, la zonula si tende e il cristallino si appiattisce.

Nella retina ci sono due tipi di fotorecettori. I **bastoncelli**, circa 120 milioni per occhio, sono molto sensibili e funzionano anche con poca luce, ma non distinguono i colori: di notte vediamo in toni di grigio. I **coni**, circa 6 milioni, richiedono più luce e permettono la visione dei colori e dei dettagli; ne esistono tre tipi, sensibili soprattutto alla luce blu, verde e rossa, e il colore percepito dipende da quanto è stimolato ciascun tipo. I coni sono concentrati nella *fovea*, una piccola fossetta al centro della retina dove l'immagine è più nitida: per questo, quando vuoi leggere una parola, muovi gli occhi in modo che la sua immagine cada lì. Gli assoni delle *cellule gangliari* della retina si riuniscono nel *nervo ottico*, che esce dall'occhio nel *disco ottico*; in quel punto mancano i fotorecettori e la retina è cieca (*punto cieco*). Non ce ne accorgiamo perché i

due occhi vedono campi leggermente diversi e l'encefalo «riempie» il vuoto. I segnali arrivano infine alla corteccia visiva del lobo occipitale.

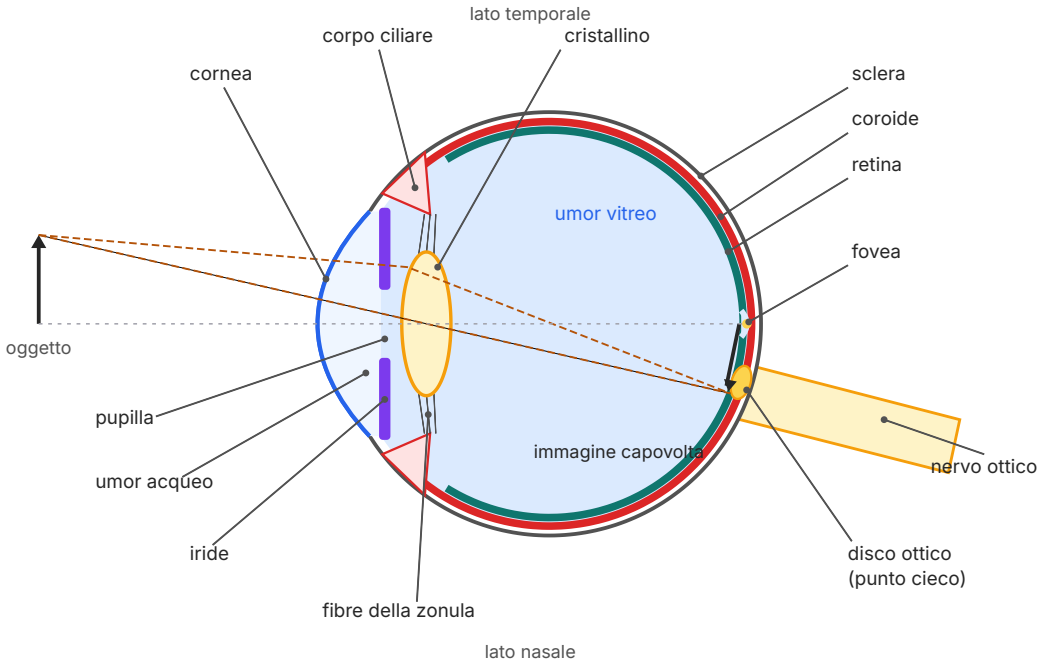


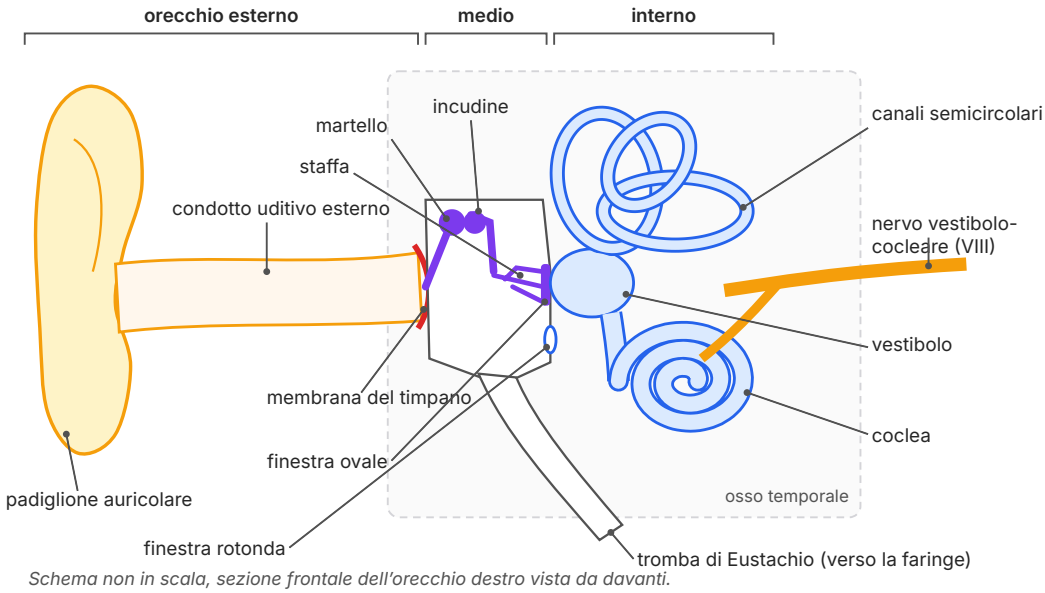
Figura 14.7 Sezione orizzontale dell'occhio destro vista dall'alto (schema non in scala). Il nervo ottico esce dal lato nasale rispetto alla fovea; nel disco ottico mancano i fotorecettori. Le linee tratteggiate mostrano due raggi provenienti dalla punta di un oggetto: l'immagine sulla retina è capovolta.

Nell'occhio *miope* il globo è troppo lungo (o il sistema troppo convergente): le immagini degli oggetti lontani si formano davanti alla retina e appaiono sfocate; si corregge con lenti divergenti. Nell'occhio *ipermetrope* il globo è troppo corto e le immagini degli oggetti vicini si formano dietro la retina; si corregge con lenti convergenti. Con l'età il cristallino perde elasticità e non riesce più ad accomodare per gli oggetti vicini: è la *presbiopia*, che dopo i quarant'anni rende necessari gli occhiali per leggere. Il *daltonismo*, che hai incontrato studiando i caratteri legati al cromosoma X (*Scienze naturali 2*), dipende dalla mancanza o dall'alterazione di un tipo di coni.

14.5.3 L'udito e l'equilibrio

Il suono è un'onda di pressione: una successione di compressioni e rarefazioni dell'aria che si propaga dalla sorgente; la sua frequenza, in hertz, determina l'altezza del suono, e l'orecchio umano giovane percepisce all'incirca da 20 a 20 000 Hz. L'orecchio ha tre parti (Figura 14.8). L'*orecchio esterno*, formato da padiglione auricolare e condotto uditivo, convoglia le onde sonore fino alla *membrana del timpano*, che vibra. L'*orecchio medio* è una piccola cavità piena d'aria con tre ossicini articolati fra loro, *martello*, *incudine* e *staffa*, le ossa più piccole del corpo: trasmetto-

no la vibrazione dal timpano alla *finestra ovale*, una membrana molto più piccola: la forza raccolta dal timpano si concentra su una superficie minore e la pressione della vibrazione aumenta. La *tromba di Eustachio*, descritta dall'anatomista marchigiano Bartolomeo Eustachi, collega l'orecchio medio alla faringe e permette di equilibrare la pressione dell'aria ai due lati del timpano.



Schema non in scala, sezione frontale dell'orecchio destro vista da davanti.

Figura 14.8 L'orecchio esterno, medio e interno (schema non in scala). Le vibrazioni passano dal timpano agli ossicini e dalla staffa, attraverso la finestra ovale, al liquido dell'orecchio interno; la tromba di Eustachio collega l'orecchio medio alla faringe.

L'*orecchio interno* è un sistema di cavità scavate nell'osso temporale e piene di liquido. La **coclea**, avvolta a chiocciola, contiene l'*organo del Corti*, che prende il nome dall'anatomista italiano Alfonso Corti. Le vibrazioni della finestra ovale mettono in movimento il liquido della coclea e una membrana su cui poggiano le **cellule ciliate**: le loro ciglia si piegano, si aprono canali ionici e la cellula stimola le fibre del nervo uditivo. Suoni di frequenza diversa fanno vibrare di più punti diversi della membrana: le frequenze alte vicino alla base della coclea, le basse verso l'apice. I segnali raggiungono la corteccia uditiva del lobo temporale.

Nell'orecchio interno si trovano anche gli organi dell'equilibrio. Il *vestibolo* contiene cellule ciliate sormontate da una gelatina con piccoli cristalli di carbonato di calcio, che informano sulla posizione della testa rispetto alla gravità e sulle accelerazioni in linea retta. I tre *canali semicircolari*, disposti su tre piani perpendicolari, rilevano le rotazioni della testa: il liquido che contengono, per inerzia, resta indietro rispetto alle pareti e piega le ciglia delle cellule sensoriali.

14.5.4 Gusto, olfatto e sensi della pelle

Il gusto e l'olfatto sono sensi chimici: i loro recettori rispondono a molecole disciolte. I recettori del gusto stanno nei *calici gustativi*, raccolti soprattutto sulle papille della lingua. I gusti fondamentali sono cinque: dolce, salato, acido, amaro e *umami*, il sapore del glutammato, identificato nel 1908 dal chimico giapponese Kikunae Ikeda studiando un brodo di alghe. Ogni zona della lingua che ha calici gustativi percepisce tutti e cinque i gusti: la «mappa della lingua» con zone separate per il dolce e l'amaro, ancora presente in molti libri, è un errore. I recettori olfattivi si trovano in un piccolo epitelio nella parte alta delle cavità nasali; ne esistono alcune centinaia di tipi, e ogni odore ne attiva una combinazione diversa. Gran parte di ciò che chiamiamo «sapore» di un cibo è in realtà odore: con il naso chiuso dal raffreddore i cibi sembrano insipidi.

COLLEGAMENTI

Educazione alla salute · Proteggere encefalo e sensi. Un colpo alla testa può danneggiare l'encefalo anche senza fratture: il casco, in bicicletta, in monopattino e in moto, riduce molto il rischio di traumi gravi. L'alcol rallenta i tempi di reazione e altera la coordinazione e il giudizio: in Italia il Codice della strada (artt. 186 e 186-bis) fissa il limite del tasso alcolemico per guidare a 0,5 g/L, ed è zero per chi ha meno di 21 anni, per chi ha la patente da meno di tre anni e per i conducenti professionali.

Le cellule ciliate dell'orecchio umano, se distrutte, non si rigenerano: il danno da rumore è permanente. Lo standard OMS-ITU per l'ascolto sicuro (2019) indica per un adulto un limite settimanale equivalente a 80 dB per 40 ore; volumi più alti dimezzano rapidamente il tempo consentito, e cuffie e auricolari ad alto volume sono una causa crescente di perdita dell'udito fra i giovani. Il sonno insufficiente peggiora attenzione, memoria e umore, e la luce degli schermi la sera tende a ritardare l'addormentamento.

Fra le malattie che colpiscono il sistema nervoso, soprattutto in età avanzata, ci sono la *malattia di Alzheimer*, in cui la perdita progressiva di neuroni e sinapsi compromette la memoria e le altre funzioni cognitive, e la *malattia di Parkinson*, dovuta alla perdita di neuroni che producono dopamina nel mesencefalo, con tremore, rigidità e lentezza dei movimenti. Per entrambe la ricerca è molto attiva; per qualunque disturbo occorre rivolgersi al medico.

Nella pelle si trovano recettori del tatto, della pressione e della vibrazione, termocettori e nocicettori (*Scienze naturali 3*, cap. 14). Infine la *propriocezione*, il senso della posizione e del movimento del corpo, si basa su recettori dei muscoli, dei tendini e delle articolazioni; sono propriocettori i recettori di stiramento del riflesso patellare.

ESPERIENZA DI LABORATORIO

Il tempo di reazione, il punto cieco e la sensibilità tattile.

Scopo. Misurare il proprio tempo di reazione; dimostrare il punto cieco; confrontare la densità dei recettori del tatto in zone diverse della pelle.

Materiali. Righello rigido da 30 cm (o 50 cm), foglio bianco e pennarello, due stuzzicadenti o un compasso con punte smussate, calcolatrice.

Procedura 1 · Il righello che cade. Un compagno tiene il righello in verticale, con lo zero all'altezza del tuo pollice e del tuo indice, aperti di qualche centimetro. Senza preavviso lascia cadere il righello: tu lo afferri il più in fretta possibile e leggi la distanza d percorsa. Ripeti dieci volte e calcola la media. Il righello cade di moto uniformemente accelerato (Fisica) con accelerazione $g = 9{,}81\ \text{m/s}^2$: il tempo di caduta, cioè il tuo tempo di reazione, è $t = \sqrt{(2d/g)}$, con d in metri. La Tabella 14.3 dà il valore già calcolato per alcune distanze.

Tabella 14.3 Tempo di reazione in funzione della distanza percorsa dal righello ($t = \sqrt{(2d/g)}$, $g = 9{,}81\ \text{m/s}^2$, valori calcolati).

d (cm)	5	10	15	20	25	30
t (s)	0,10	0,14	0,17	0,20	0,23	0,25

Procedura 2 · Il punto cieco. Disegna sul foglio una croce e, 8 cm più a destra, un pallino pieno. Chiudi l'occhio sinistro, fissa la croce con il destro e avvicina lentamente il foglio al viso: a una certa distanza il pallino scompare, perché la sua immagine cade sul disco ottico.

Procedura 3 · Due punte o una? A occhi chiusi, un compagno ti tocca la pelle con le due punte, a distanze decrescenti, o a volte con una sola. Annota la distanza minima a cui distingui due punte sul polpastrello, sul dorso della mano e sull'avambraccio.

Sicurezza. Usa punte smussate e tocca con delicatezza; non toccare viso e occhi. Chi lascia cadere il righello lo fa davanti al tavolo, lontano dal viso.

Risultati attesi. Tempi di reazione intorno a 0,2 s. La distanza minima fra le due punte è di pochi millimetri sul polpastrello e di vari centimetri sull'avambraccio, dove i recettori sono più radi.

Domande. Perché il tempo di reazione al righello è molto più lungo del tempo di un riflesso? Come cambierebbe se il compagno ti avvisasse con un segnale sonoro?

SINTESI

- Il sistema nervoso centrale (encefalo e midollo spinale) integra le informazioni; il periferico (12 paia di nervi cranici, 31 di spinali, gangli) le porta al SNC (via afferente) e ne porta i comandi agli effettori (via efferente, somatica o autonoma).
- I neuroni sono sensitivi, motori o interneuroni; le cellule gliali li sostengono e formano la guaina mielinica (oligodendrociti nel SNC, cellule di Schwann nel SNP), interrotta dai nodi di Ranvier.
- Il potenziale di riposo, circa −70 mV, dipende dalla distribuzione diseguale di Na^+ e K^+, dai canali per K^+ aperti e dalla pompa sodio-potassio (3 Na^+ fuori, 2 K^+ dentro, 1 ATP).
- Alla soglia (circa −55 mV) parte il potenziale d'azione: entra Na^+ (depolarizzazione), poi esce K^+ (ripolarizzazione e iperpolarizzazione). È tutto-o-nulla; l'intensità dello stimolo è codificata dalla frequenza.
- La conduzione è continua negli assoni senza mielina (0,5–2 m/s) e saltatoria in quelli mielinizzati (fino a circa 120 m/s).
- Nella sinapsi chimica l'ingresso di Ca^{2+} fa liberare il neurotrasmettitore, che si lega ai recettori postsinaptici; le sinapsi possono essere eccitatorie o inibitorie e i loro effetti si sommano.
- Alla giunzione neuromuscolare l'acetilcolina fa contrarre la fibra; curaro e tossina botulinica la bloccano in punti diversi. Le droghe alterano le sinapsi del circuito della ricompensa e danno tolleranza e dipendenza.
- Il midollo spinale ha sostanza grigia interna e bianca esterna; la radice dorsale è sensitiva (con il ganglio), la ventrale motoria. L'arco riflesso può essere monosinaptico (patellare) o polisinaptico (retrazione).
- Il tronco encefalico contiene i centri vitali, il cervelletto coordina i movimenti, il talamo smista le informazioni sensoriali, l'ipotalamo collega sistema nervoso ed endocrino; la corteccia ha aree motorie, sensitive e del linguaggio (Broca, Wernicke).
- Simpatico e parasimpatico hanno effetti in genere opposti: il primo prepara all'azione, il secondo favorisce riposo e digestione.
- I recettori traducono gli stimoli in potenziali d'azione; la sensazione nasce nella corteccia. Nell'occhio cornea e cristallino formano un'immagine capovolta sulla retina (coni per i colori, bastoncelli per la luce scarsa); l'accomodazione cambia la curvatura del cristallino.
- Nell'orecchio le vibrazioni passano da timpano e ossicini alla coclea, dove le cellule ciliate le trasducono; vestibolo e canali semicircolari servono all'equilibrio. Gusto e olfatto sono sensi chimici con cinque gusti fondamentali.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● Il sistema nervoso periferico comprende:
   - **A.** l'encefalo e il midollo spinale
   - **B.** i nervi cranici, i nervi spinali e i gangli
   - **C.** solo i nervi che comandano i muscoli
   - **D.** solo il sistema autonomo

2. ● Nel sistema nervoso periferico la guaina mielinica è formata da:
   - **A.** astrociti
   - **B.** oligodendrociti
   - **C.** cellule di Schwann
   - **D.** cellule della microglia

3. ●● La fase di depolarizzazione del potenziale d'azione è dovuta al fatto che:
   - **A.** Na^+ entra nella cellula attraverso canali voltaggio-dipendenti
   - **B.** K^+ esce dalla cellula attraverso canali sempre aperti
   - **C.** la pompa porta 3 Na^+ dentro la cellula
   - **D.** gli elettroni corrono lungo l'assone

4. ● Il principale neurotrasmettitore inibitorio del sistema nervoso centrale è:
   - **A.** il glutammato
   - **B.** l'acetilcolina
   - **C.** la dopamina
   - **D.** il GABA

5. ●● La tossina botulinica provoca paralisi perché:
   - **A.** occupa i recettori dell'acetilcolina senza aprirli
   - **B.** impedisce la liberazione dell'acetilcolina dai bottoni sinaptici
   - **C.** demolisce l'acetilcolina nella fessura
   - **D.** distrugge la mielina dei motoneuroni

6. ● Il riflesso patellare è un riflesso:
   - **A.** monosinaptico, con una sola sinapsi nel midollo
   - **B.** polisinaptico, con interneuroni nel midollo
   - **C.** che passa per la corteccia motoria
   - **D.** del sistema nervoso autonomo

7. ●● Il cervelletto:
   A. contiene i centri del respiro
   B. smista le informazioni sensoriali verso la corteccia
   C. coordina i movimenti e mantiene l'equilibrio
   D. produce il linguaggio

8. ● Per mettere a fuoco un oggetto vicino:
   A. la pupilla si dilata
   B. il cristallino si appiattisce
   C. la cornea cambia curvatura
   D. il muscolo ciliare si contrae e il cristallino diventa più convesso

9. ●● I canali semicircolari dell'orecchio interno rilevano:
   A. le rotazioni della testa
   B. la frequenza dei suoni
   C. la pressione nell'orecchio medio
   D. la posizione della testa rispetto alla gravità

Vero o falso

10. ● Il potenziale d'azione è un flusso di elettroni che percorre l'assone.

11. ●● Uno stimolo più intenso produce potenziali d'azione di ampiezza maggiore.

12. ● La radice ventrale di un nervo spinale contiene le fibre motorie.

13. ●● Il sistema simpatico rallenta il battito cardiaco.

14. ● I bastoncelli permettono la visione dei colori.

15. ●● Nel disco ottico della retina mancano i fotorecettori.

Applicare

16. ● Un compagno lascia cadere un righello e tu lo afferri dopo che è sceso di 16 cm. Calcola il tuo tempo di reazione ($g = 9{,}81\ \text{m/s}^2$).

17. ●● La distanza fra un dito del piede e il midollo spinale è 1,1 m. Calcola il tempo che un impulso impiega a percorrerla lungo una fibra mielinizzata che conduce a 70 m/s e lungo una fibra senza mielina che conduce a 1,0 m/s.

18. ●● In un certo intervallo di tempo le pompe sodio-potassio di una piccola zona di membrana portano fuori dalla cellula 600 ioni Na^+. Quanti ioni K^+ portano dentro? Quante molecole di ATP consumano? Quante cariche positive in più escono di quante entrano?

19. ●● Durante un potenziale d'azione il potenziale di membrana passa da −70 mV a +30 mV e poi scende fino a −80 mV. Calcola, in millivolt e in volt, la variazione nella fase di salita e quella dal picco al minimo.

20. ●●● Se il periodo refrattario assoluto di un neurone dura 2,0 ms, qual è il numero massimo teorico di potenziali d'azione che il neurone può produrre in un secondo?

21. ●● L'atropina, contenuta nella belladonna e usata dagli oculisti, blocca i recettori dell'acetilcolina degli organi comandati dal parasimpatico. Prevedi che cosa accade alla pupilla e alla frequenza cardiaca di una persona che la riceve.

22. ●●● Nel riflesso patellare la via sensitiva e quella motoria sono lunghe 0,50 m ciascuna e conducono a 60 m/s; ogni sinapsi (quella nel midollo e la giunzione neuromuscolare) introduce un ritardo di 0,5 ms. Stima il tempo fra il colpo del martelletto e l'inizio della contrazione, e confrontalo con il tempo di reazione al righello (circa 0,2 s).

Leggere dati e figure

Tabella 14.4 Distanze percorse dal righello (cm) prima della presa, per uno stesso studente, in cinque prove (dati di esempio).

Condizione	Prova 1	Prova 2	Prova 3	Prova 4	Prova 5
in silenzio	21	18	19	17	20
parlando al telefono	28	31	26	30	25

23. ● Osserva la Figura 14.3. Leggi il potenziale di riposo, la soglia, il valore di picco e il valore minimo; calcola l'ampiezza del potenziale d'azione dal riposo al picco e stima quanto tempo passa da quando il potenziale supera la soglia a quando torna a −70 mV.

24. ●●● La Tabella 14.4 riporta le distanze percorse dal righello per uno stesso studente in due condizioni. Calcola la distanza media e il tempo di reazione medio in ciascuna condizione e commenta il risultato. Perché si fanno cinque prove e non una?

25. ●● Usando la Figura 14.5, descrivi in ordine le strutture attraversate dal segnale nel riflesso di retrazione, dal recettore al muscolo. Che cosa succederebbe alla sensibilità e ai movimenti volontari della zona se fosse interrotta solo la radice dorsale?

26. ●●● Osserva la Figura 14.7. Su quale lato della fovea si trova il disco ottico? Spiega perché quel punto è cieco e perché, guardando con entrambi gli occhi aperti, non ci accorgiamo del punto cieco.

Indagare e argomentare

27. ●●● Progetta un esperimento controllato per verificare se ascoltare musica in cuffia allunga il tempo di reazione. Indica la variabile indipendente, quella dipendente, le variabili da tenere costanti, il numero di prove e di partecipanti, come presentare i dati e le precauzioni di sicurezza.

28. ●● Galvani e Volta interpretarono in modo opposto le contrazioni delle zampe di rana. Riassumi le due tesi e spiega, alla luce di ciò che sai sul potenziale d'azione, in che senso entrambi avevano in parte ragione.

29. ●●● Spiega perché guidare dopo aver bevuto alcol è pericoloso, usando almeno tre concetti del capitolo (per esempio sinapsi inibitorie, cervelletto, tempo di reazione). Perché, secondo te, la legge italiana fissa a zero il limite per chi ha appena preso la patente?

PER APPROFONDIRE

- [TOR] G. J. Tortora, B. Derrickson, *Principles of Anatomy and Physiology*: i capitoli sul tessuto nervoso, sul midollo spinale, sull'encefalo, sul sistema autonomo e sui sensi speciali, con molte figure anatomiche.
- [SIL] D. U. Silverthorn, *Human Physiology: An Integrated Approach*: i capitoli sui neuroni e sulla fisiologia sensoriale, per capire il potenziale d'azione e le sinapsi con un approccio quantitativo.
- [CAM] L. A. Urry et al., *Campbell Biology*: i capitoli sui neuroni, le sinapsi e i sistemi nervosi, anche negli altri animali.

Glossario del capitolo

Accomodazione
Variazione della curvatura del cristallino, comandata dal muscolo ciliare, che permette di mettere a fuoco oggetti a distanze diverse.

Arco riflesso
Percorso nervoso di un riflesso: recettore, neurone sensitivo, centro di integrazione nel SNC, motoneurone, effettore.

Cellule ciliate
Recettori dell'orecchio interno (coclea, vestibolo, canali semicircolari) che trasducono in segnali nervosi la piegatura delle loro ciglia.

Cellule gliali
Cellule del tessuto nervoso che non trasmettono impulsi ma sostengono, nutrono, difendono e isolano i neuroni (astrociti, microglia, cellule ependimali, oligodendrociti, cellule di Schwann).

Conduzione saltatoria
Propagazione del potenziale d'azione da un nodo di Ranvier al successivo negli assoni mielinizzati; è più rapida della conduzione continua.

Corteccia cerebrale
Strato esterno di sostanza grigia degli emisferi cerebrali, ripiegato in circonvoluzioni, sede delle aree motorie, sensitive e associative.

Fotorecettori
Cellule della retina sensibili alla luce: bastoncelli (visione con poca luce, senza colori) e coni (tre tipi, visione dei colori e dei dettagli).

Giunzione neuromuscolare
Sinapsi fra un motoneurone e una fibra muscolare scheletrica; il neurotrasmettitore è l'acetilcolina.

Guaina mielinica
Rivestimento isolante, ricco di lipidi, formato dalle membrane di oligodendrociti (SNC) o cellule di Schwann (SNP) avvolte attorno a un assone.

Neurotrasmettitore
Sostanza liberata dalle vescicole del bottone sinaptico che si lega ai recettori della cellula postsinaptica (es. acetilcolina, dopamina, GABA).

Nodo di Ranvier
Breve tratto di assone non coperto da mielina fra due segmenti di guaina; vi si rigenera il potenziale d'azione nella conduzione saltatoria.

Periodo refrattario
Intervallo dopo un potenziale d'azione in cui la membrana non risponde (assoluto) o risponde solo a stimoli più forti (relativo).

Pompa sodio-potassio
Proteina di membrana che con l'energia di una molecola di ATP porta 3 ioni Na^+ fuori e 2 ioni K^+ dentro la cellula, mantenendo i gradienti.

Potenziale d'azione
Rapida inversione del potenziale di membrana (fino a circa +30 mV) dovuta all'ingresso di Na^+ e alla successiva uscita di K^+; segue la legge del tutto-o-nulla.

Potenziale di riposo
Differenza di potenziale fra interno ed esterno di un neurone non stimolato, circa −70 mV (interno negativo).

Sinapsi
Punto di comunicazione fra un neurone e un'altra cellula; nella sinapsi chimica il segnale attraversa la fessura sinaptica sotto forma di neurotrasmettitore.

Sistema nervoso autonomo
Parte efferente del SNP che regola involontariamente muscolo liscio, muscolo cardiaco e ghiandole; comprende simpatico e parasimpatico.

Sistema nervoso centrale (SNC)
Parte del sistema nervoso formata da encefalo e midollo spinale, protetta da cranio e colonna vertebrale; integra le informazioni ed elabora le risposte.

Sistema nervoso periferico (SNP)
Parte del sistema nervoso esterna a cranio e colonna: 12 paia di nervi cranici, 31 paia di nervi spinali e gangli; collega il SNC a recettori ed effettori.

Soglia
Valore del potenziale di membrana (circa −55 mV) che, se raggiunto, fa partire un potenziale d'azione.

Soluzioni

1. B. L'encefalo e il midollo spinale formano il SNC; il SNP comprende tutto ciò che sta fuori: nervi cranici e spinali, con le fibre sensitive e motorie, e gangli.

2. C. Nel SNP la mielina è formata dalle cellule di Schwann; gli oligodendrociti la formano nel SNC.

3. A. Alla soglia si aprono i canali voltaggio-dipendenti per il sodio e Na^+ entra; l'uscita di K^+ rende l'interno più negativo e quindi non può depolarizzare (è la causa della ripolarizzazione), la pompa porta Na^+ fuori, e le cariche sono portate da ioni.

4. D. Il GABA è il principale neurotrasmettitore inibitorio; il glutammato è il principale eccitatorio.

5. B. La tossina botulinica blocca la liberazione dell'acetilcolina; è il curaro che occupa i recettori, e l'acetilcolinesterasi che la demolisce.

6. A. Il neurone sensitivo fa sinapsi direttamente con il motoneurone nel midollo spinale.

7. C. Coordinazione ed equilibrio; i centri del respiro sono nel tronco encefalico, lo smistamento sensoriale è del talamo, il linguaggio della corteccia.

8. D. Il muscolo ciliare si contrae, la zonula si allenta e il cristallino diventa più convesso (accomodazione).

9. A. Le rotazioni; la gravità e le accelerazioni lineari sono rilevate dal vestibolo, i suoni dalla coclea.

10. F. È una variazione del potenziale di membrana dovuta a ioni (Na^+ e K^+) che attraversano la membrana; ogni tratto di membrana genera di nuovo il potenziale d'azione.

11. F. L'ampiezza è sempre la stessa (legge del tutto-o-nulla); uno stimolo più intenso produce una frequenza di potenziali d'azione più alta e attiva più neuroni.

12. V. La radice ventrale contiene gli assoni dei motoneuroni; quella dorsale le fibre sensitive.

13. F. Il simpatico aumenta frequenza e forza del battito; è il parasimpatico a rallentarlo.

14. F. I colori sono percepiti dai coni (tre tipi); i bastoncelli funzionano con poca luce ma non distinguono i colori.

15. V. Nel disco ottico esce il nervo ottico e non ci sono coni né bastoncelli: è il punto cieco.

16. $t = \sqrt{(2d/g)} = \sqrt{(2 \times 0{,}16\ \text{m} / 9{,}81\ \text{m/s}^2)} = \sqrt{0{,}0326\ \text{s}^2} \approx 0{,}18$ s.

17. Fibra mielinizzata: $t = d/v = 1{,}1\ \text{m} / 70\ \text{m/s} = 0{,}016$ s ≈ 16 ms. Fibra senza mielina: $t = 1{,}1\ \text{m} / 1{,}0\ \text{m/s} = 1{,}1$ s. La prima è 70 volte più veloce.

18. Ogni ciclo porta fuori 3 Na^+, porta dentro 2 K^+ e consuma 1 ATP: 600/3 = 200 cicli, quindi 200 × 2 = 400 ioni K^+ dentro e 200 molecole di ATP. Escono 600 cariche positive ed entrano 400: in uscita 200 cariche positive in più.

19. Salita: +30 − (−70) = 100 mV = 0,100 V. Dal picco al minimo: −80 − (+30) = −110 mV = −0,110 V (il potenziale diminuisce di 110 mV).

20. Fra due potenziali d'azione devono passare almeno 2,0 ms = 0,0020 s: al massimo 1 / 0,0020 s = 500 potenziali d'azione al secondo (limite teorico; in realtà il periodo refrattario relativo lo abbassa).

21. Bloccando l'azione del parasimpatico prevalgono gli effetti del simpatico: la pupilla si dilata (per questo gli oculisti usano colliri simili per esaminare la retina) e la frequenza cardiaca aumenta.

22. Percorso nervoso: 0,50 m + 0,50 m = 1,00 m; tempo di conduzione 1,00 m / 60 m/s = 0,0167 s ≈ 16,7 ms; ritardo sinaptico 2 × 0,5 ms = 1,0 ms. Totale ≈ 18 ms, cioè circa 0,02 s: circa dieci volte meno del tempo di reazione al righello, perché la risposta volontaria richiede il passaggio per l'encefalo (percezione, decisione, comando) e molte più sinapsi.

23. Riposo −70 mV, soglia −55 mV, picco +30 mV, minimo −80 mV. Ampiezza dal riposo al picco: 100 mV.

Il potenziale supera la soglia a circa 1,0 ms e torna a −70 mV a circa 2,2 ms: circa 1,2 ms (accettabile 1–1,5 ms).

24. In silenzio: media = (21 + 18 + 19 + 17 + 20)/5 = 19 cm; $t = \sqrt{(2 \times 0{,}19/9{,}81)} \approx 0{,}20$ s. Al telefono: media = (28 + 31 + 26 + 30 + 25)/5 = 28 cm; $t = \sqrt{(2 \times 0{,}28/9{,}81)} \approx 0{,}24$ s. Parlando al telefono il tempo di reazione cresce di circa 0,04 s, circa il 20 %: l'attenzione divisa rallenta la risposta. Le prove ripetute riducono l'effetto delle variazioni casuali fra una presa e l'altra; per una conclusione generale servirebbero anche più studenti.

25. Recettore della pelle → neurone sensitivo nel nervo spinale → corpo cellulare nel ganglio della radice dorsale → radice dorsale → corno posteriore della sostanza grigia → interneurone → motoneurone nel corno anteriore → radice ventrale → nervo spinale → muscolo. Interrompendo solo la radice dorsale la zona perde la sensibilità (e i riflessi, che hanno bisogno della via sensitiva), ma i movimenti volontari restano possibili, perché i comandi motori escono dalla radice ventrale.

26. Il disco ottico si trova sul lato nasale della fovea. È cieco perché lì le fibre del nervo ottico lasciano l'occhio e non ci sono fotorecettori. Con due occhi non ce ne accorgiamo perché i punti ciechi dei due occhi corrispondono a punti diversi del campo visivo, coperti dall'altro occhio; inoltre l'encefalo completa l'immagine con le informazioni circostanti.

27. *Traccia di risposta.* Variabile indipendente: musica in cuffia sì/no (a volume moderato, sempre lo stesso). Variabile dipendente: tempo di reazione calcolato dalla distanza del righello. Costanti: stesso righello e stessa posizione della mano, stesso compagno che lo lascia cadere a intervalli casuali, mano dominante, stessa ora del giorno. Almeno 10 prove per condizione e per persona, alternando l'ordine delle condizioni per evitare l'effetto dell'allenamento; più partecipanti (per esempio tutta la classe). Dati: media e intervallo dei valori per ciascuna condizione, in una tabella e un grafico a barre. Sicurezza: volume basso, righello lasciato cadere lontano dal viso.

28. *Traccia di risposta.* Galvani: i tessuti dell'animale producono una propria elettricità («elettricità animale»), che i metalli scaricano. Volta: l'elettricità nasce dal contatto fra metalli diversi e la rana fa solo da rivelatore; lo dimostrò costruendo la pila (1800), che funziona senza tessuti. Avevano entrambi in parte ragione: negli esperimenti con due metalli la corrente era davvero prodotta dai metalli (Volta), ma nervi e muscoli generano segnali elettrici propri, i potenziali d'azione dovuti al passaggio di ioni attraverso la membrana (Galvani).

29. *Traccia di risposta.* L'alcol potenzia le sinapsi inibitorie (GABA) e deprime il SNC: aumentano i tempi di reazione, quindi lo spazio percorso prima di frenare; il cervelletto, molto sensibile all'alcol, coordina peggio i movimenti; il lobo frontale controlla meno gli impulsi e il giudizio sul rischio peggiora, mentre la persona si sente spesso più sicura di sé. Il limite zero per i neopatentati e i minori di 21 anni tiene conto della minore esperienza di guida, che richiede più attenzione, e di un encefalo ancora in maturazione; è anche una regola semplice da rispettare, perché non richiede di stimare quanto si è bevuto.