



...going one step further



C40

Functional anatomy of the nerve cells

Nerve cells are the smallest independent units of the organs of the nervous system. A distinction is generally made between the central and the peripheral nervous system: the brain (cerebrum and cerebellum) and the spinal cord belong to the central nervous system. The peripheral nervous system consists of all nerve fibres of the periphery (e.g. in the skin, muscles and all visceral organs). A differentiation is made between the consciously (will or senses) accessible or somatic nervous system and the vegetative (autonomic) nervous system which automatically without voluntary access takes over control of the inner organs. The spinal cord uses reflex cycles to mediate between the periphery and the brain as well as to mediate for the vegetative and somatic nervous system.

The nervous system has many tasks ranging from impulse uptake (seeing, hearing, smelling, feeling, etc.) through transmission of impulse or information, information processing and storing to the answering of incoming information with corresponding patterns which result in voluntary movements. This variety also mirrors the shape and function of the individual nerve cells. The individual cell is an extremely varied, multifunctional structure with numerous special shapes.

The auxiliary cells (glial cells) must help the nerve cells to fulfil their metabolic and transport functions. The nerve cells themselves concentrate entirely on maintaining their extremely complicated structure, the most important factor being the surfaces, i.e. the membranes. This is because the membranes take on the main task of the nerve cell: the change from excitation and non-excitation of the membrane takes place here. This change can be determined by measuring tension (in mV). A differentiation is made between resting and action potential. The entire structure of the nerve cell and the glial cell is based on this function. Thus certain glial cells (astroglia) are specialized in the task of transporting substances from the capillaries (f in Fig. C40/1) in the direction of the nerve cell. Thus nothing uncontrolled comes from the very dense capillaries in the brain and spinal cord to the nerve cell. Other glial cells are specialized in surrounding the nerve cells with insulating shells (oligodendroglia in the central nervous system, C40/2, or Schwann glial cells in the peripheral nervous system, C40/3). Other glial cells surround the terminal cells of the nerve endings in the periphery (teloglia, b in Fig. C40/4).

C40/1 Nerve cell

A nerve cell is divided into the central cell mass grouped around the nucleus (perikaryon) and the numerous nerve processes. The nerve processes are divided into dendrites, which transmit information to the perikaryon, and the neurite (only one present). This transmits the information to the next nerve cell.

If the perikaryon is observed (cut open in the figure), numerous characteristics may be recognized which are present in every mammalian cell: mitochondria (a), endoplasmic reticulum (b), Golgi's apparatus (c) and numerous fibrils of the cytoskeleton (d). Golgi's apparatus and the endoplasmic reticulum are particularly marked in the nerve cell as they are both involved in the production and renewal of the enormous membrane surface of the nerve cells. A well-structured fibre network, a subunit of the cell skeleton, may be found in the numerous branches. In addition, special formations of branches, i.e. numerous synapses (e), may be seen on the left-hand side of the figure.

C40/2 Myelin sheath of the central nervous system

The membrane of the nerve cell is principally responsible for the spreading process of the nerve impulse. In addition, there is a connection between the thickness of the nerve process and the transmission speed. The thicker the nerve process, the greater the transmission speed. Without appropriate auxiliary cells (specialized glial cells), impulse transmission is continuous (only occurs in invertebrates or in thin fibres of the vegetative nervous system of vertebrates). In order to increase the transmission speed, nerve fibres with myelin sheaths form which are interrupted by what are known as constriction rings (a) (nodes of Ranvier) at intervals of 1 mm to 3 mm. This causes transmission of impulses to be accelerated considerably, without the diameter of the nerve process having to be increased greatly. The impulse jumps from constriction ring to constriction ring and transmission becomes faster. Insulation between the individual constriction rings (b) occurs using fat-containing substances (lipids, myelin, cephalin, phosphatides, lecithin, cerebrosides, etc.). A uniform layer of extremely thin lipid protein lamellae and the membrane of the glial cells (c) occurs. This spiral insulation is interrupted at the constriction rings (d).

In the central nervous system, the oligodendroglia take on the task of insulating the nerve processes. Characteristic for the oligodendroglia is that they can insulate several segments between the constrictions (interannular segments) at the same time (e) due to several star-shaped branches and they can also serve various nerve fibres (f).

C40/3 Glia of the peripheral nerve cells

In the same manner as the oligodendroglia in the central nervous system, the Schwann cells in the peripheral nervous system form the myelin sheath to insulate the nerve process. In this case too, constrictions (a) and interannular segments (b) form. Characteristic for the glial cells of the peripheral nervous system is that each cell supplies only one interannular segment. Thus a change to another glial cell takes place during constriction. The structure made of myelin sheaths and membranes of the glial cells (c) is the same as that of the oligodendroglial cell. The change from an insulated proportion to a more or less free membrane means that the impulse jumps from constriction to constriction (saltatory impulse transmission). This causes a considerable increase in impulse transmission.

The subdivision of the nerve processes at the end of the peripheral nerves may be extremely varied. They can end freely in another tissue (free nerve endings) (d). They are often integrated into complicated endings of the end glia (teloglia), such as tactile corpuscles or other complicated sensory organs.

C40/4 Motor end plate

In the motor end plate, a special type of synapsis, impulses are transmitted from a nerve cell to a striated skeletal muscle fibre. Shortly before the motor end plate, the nerve process loses its myelin sheath (a) and is only sheathed by the glial cell itself (teloglia, b). The terminal section of the nerve cell widens at the contact point to the muscle fibre and reforms numerous synaptic vesicles, mitochondria and granula of various types. The terminal branches of the nerve process accumulate in the cell membrane, the muscle fibre (postsynaptic membrane) close to it. The membrane of the muscle cell forms an intensive folding apparatus towards the surface enlargement (c). A striking amount of nuclei of the muscle cell (d) are found in the cytoplasm of the muscle fibres, causing the end plate to bulge slightly. This leads to a huge contact point at which a single nerve impulse can trigger excitation of the muscle fibres. The synaptic vesicles (e) in the nerve endings contain the transmitter acetylcholine which docks at receptors of the postsynaptic membrane according to the mechanism in the synapses and from there causes renewed excitation of the muscle fibres.

C40/5 Synapse

A synapse is a contact structure specifically serving to transmit impulses and used for one nerve cell to „innervate“ another (1). There are electrical and chemical synapses. Electrical synapses directly transmit the impulse to a neighbouring cell membrane (very rare in the human nervous system, between the hair cells of the inner ear or between the sensory cells of the retina) (Figures). In the case of chemical synapses, the nerve cell forms button-like swellings at its terminal branches (boutons, Fig. C40/1, e) which are specialized in information transfer. In the case of chemical synapses, the impulse is transmitted indirectly via certain chemical substances. The impulse, which is transmitted from the nerve cell along the cell membrane to the button-like swelling, is converted to a time-correlated release of transmitting substances which are encapsulated in vesicular structures (synaptic vesicles) (a).

The nerve impulse, depolarization, temporarily opens tension-controlled calcium channels in the membrane which are in front of the actual transmission site. As calcium concentrations are always 1000 times greater outside than inside the cell, calcium flows into the nerve cell and the increasing calcium concentration triggers the release of vesicles with transmitting substances. The vesicles first fuse with the presynaptic membrane (c), the transmitters being released in the synaptic cleft (d) and finally taken up by the postsynaptic membrane. The transmitting substances bind to specific receptors (e) and open coupled channels which depolarize the membrane of the neighbouring cells in a limited area by the inflow of sodium ions. A chain reaction opens further neighbouring channels and a self-spreading depolarization occurs which spreads to the entire plasma membrane of the following cell. After depolarization the transmitter substances either undergo degradation or they will be taken up again by the presynaptic button-like swelling (b).

As a synapse must often conduct this process in a very short time (several times per second), it is a site of high metabolic activity. Thus mitochondria (f) are found here, which display a high energy metabolism, as well as branches of the endoplasmic reticulum (g), a sign of high substance metabolism. The filaments of the cytoskeleton in the synapse (neurofilaments) (h) are guide structures for axonal transport which is used as a route for transmitters and membrane components from the perikaryon to the synapse.

A distinction is made between two types of synapses (Gray I and II), depending on the type of synaptic vesicles and the thickening of the presynaptic and postsynaptic membrane. Gray I synapses have light, round vesicles, a cleft measuring 30 nm in width and the postsynaptic membrane is thicker than the presynaptic one (2). Gray II synapses have a cleft measuring 20 nm in width and have narrow postsynaptic membrane thickening, several active fields often being located beside each other (3). Gray I type synapses are regarded as excitatory synapses, Gray II type as inhibitory synapses. Inhibitory synapses suppress the excitation readiness of a subsequent cell.

In addition to these basic types, there are special forms based on shape and fine differentiation of function: e.g. synapses with synaptic cords (4), complex synapses with cords (5). Nerve processes can form synapses when passing by („en passant“) (6). They either have the typical presynaptic and postsynaptic membranes or they have free endings (in the vegetative nervous system). They are no longer surrounded by glial cells on their outer end and give the transmitters to neighbouring cells over greater distances („à distance“). The motor end plate is also a special form of synapse.

Funktionelle Anatomie der Nervenzellen

Nervenzellen sind die kleinsten selbständigen Einheiten, aus denen die Organe des Nervensystems zusammengesetzt sind. Man unterscheidet generell zwischen zentralen und peripheren Nervensystem: zum zentralen Nervensystem gehören das Gehirn (Groß- und Kleinhirn) und das Rückenmark. Das periphere Nervensystem umfasst alle Nervenfasern der Peripherie (z.B. in der Haut, den Muskeln und allen Eingeweideorganen). Dabei wird differenziert zwischen bewusst (dem Willen bzw. der Empfindung) zugänglichem oder auch somatischem Nervensystem und dem vegetativen (autonomen) Nervensystem, das automatisch und ohne willentlichen Zugriff die Steuerung der inneren Organe übernimmt. Über Reflexkreise steht das Rückenmark als Vermittler zwischen Peripherie und dem Gehirn sowohl für das vegetative als auch für das somatische Nervensystem.

Die Aufgaben des Nervensystems sind vielfältig: von der Reizaufnahme (Sehen, Hören, Riechen, Fühlen usw.) über die Reiz- bzw. Informationsweiterleitung, die Informationsverarbeitung und -speicherung bis zur Beantwortung der eingehenden Informationen mit entsprechenden Mustern, die schließlich in willentliche Bewegungen münden. Diese Vielfalt spiegelt auch die Form und Funktion der einzelnen Nervenzelle wider. Dabei ist die einzelne Zelle ein extrem vielgestaltiges, multifunktionales Gebilde mit zahlreichen Spezialausformungen.

Die Hilfszellen (Gliazellen) müssen den Nervenzellen helfen, ihre Stoffwechsel- und Transportaufgaben zu erfüllen. Denn die Nervenzelle konzentriert sich ganz darauf, ihre extrem komplizierte Gestalt zu erhalten, wobei es vor allem auf die Oberflächen, d.h. die Membranen, ankommt. Die Membranen übernehmen nämlich die Hauptaufgabe der Nervenzelle: hier spielt sich der Wechsel zwischen Erregung und „Nicht-Erregung“ der Membran ab. Dieser Wechsel lässt sich anhand von Spannung (gemessen in mV) feststellen. Dabei unterscheidet man ein sogenanntes Ruhe- und Aktionspotential. Die gesamte Gestalt von Nervenzelle und Gliazelle ist auf diese Funktion ausgerichtet. So haben sich bestimmte Gliazellen (Astroglia) darauf spezialisiert, den Stofftransport von den Kapillaren (f in Abb. C40/1) in Richtung Nervenzelle zu übernehmen. Es kommt also nichts unkontrolliert von den ohnehin sehr dichten Kapillaren im Gehirn und Rückenmark zur Nervenzelle. Andere Gliazellen haben sich darauf spezialisiert, die Nervenzellen mit isolierenden Hüllen zu umgeben (Oligodendrogliazellen im Zentralnervensystem Abb. C40/2, bzw. Schwannsche Gliazellen im peripheren Nervensystem Abb. C40/3). Andere Gliazellen umhüllen die Endformationen der Nervenaufläufe in der Peripherie (Teloglia, b in Abb. C40/4).

C40/1 Nervenzelle

An einer Nervenzelle unterscheidet man die zentrale um den Zellkern gruppierte Zellmasse (Perikaryon) und die zahlreichen Nervenzellfortsätze. Unter den Nervenzellfortsätzen unterscheidet man die sogenannten Dendriten, die Informationen zum Perikaryon leiten und den Neuriten (nur in Einzahl vorhanden). Dieser leitet die Information zu der nächsten Nervenzelle.

Betrachtet man das Perikaryon (in der Abbildung aufgeschnitten), dann erkennt man die zahlreichen Charakteristika, die jeder Säugerzelle gemeinsam sind: Mitochondrien (a) endoplasmatisches Retikulum (b) Golgi-Apparat (c) und zahlreiche Fibrillen des Zytoskeletts (d). In der Nervenzelle sind der Golgi-Apparat und endoplasmatisches Retikulum besonders stark ausgeprägt, denn beide haben mit der Produktion und Erneuerung der enormen Membranoberfläche der Nervenzellen zu tun. In den zahlreichen Zellausläufern findet man ein gut ausgeprägtes Faserwerk als Untereinheiten des Zellskeletts. Auf der Abbildung links sind außerdem Spezialformationen der Zellausläufer, nämlich die zahlreich vorkommenden Synapsen (e), zu erkennen.

C40/2 Markscheiden des zentralen Nervensystems

Prinzipiell ist für die Ausbreitungsprozesse des Nervenimpulses die Membran der Nervenzelle verantwortlich. Darüber hinaus besteht ein Zusammenhang zwischen der Dicke des Nervenfortsatzes und der Leitungsgeschwindigkeit. Je dicker ein Fortsatz ist, um so höher ist die Leitungsgeschwindigkeit. Ohne entsprechende Hilfszellen (spezialisierte Gliazellen) ist die Erregungsleitung kontinuierlich (kommt nur bei Wirbellosen oder bei dünnen Fasern des vegetativen Nervensystems von Wirbeltieren vor). Um die Leitungsgeschwindigkeit zu erhöhen, bilden sich Nervenfasern mit Markscheiden heraus, die in Abständen von 1 mm bis 3 mm durch sogenannte Schnürringe (a) (Ranvier) unterbrochen sind. Dadurch wird die Erregungsleitung, ohne dass der Fortsatzdurchmesser in stärkerem Maße zunehmen muss, erheblich beschleunigt. Die Erregung springt jetzt von Schnürring zu Schnürring und die Leitung wird schneller. Die Isolierung zwischen den einzelnen Schnürringen (b) geschieht durch Isolation mit Hilfe fetthaltiger Substanzen (Lipide, Myeline, Kepheline, Phosphatide, Lecitine, Cerebroside usw.). Dabei entsteht eine regelmäßige Schichtung aus äußerst dünnen Lipidproteinlamellen und der Membran der Gliazelle (c). An den Schnürringen sind diese spiraligen Isolierungen unterbrochen (d).

Im zentralen Nervensystem übernehmen die Aufgabe der Isolierung Nervenzellfortsätze, die sogenannten Oligodendrogliazellen. Charakteristisch für die Oligodendrogliazellen ist, dass sie mit mehreren sternförmigen Ausläufern gleichzeitig mehrere Segmente zwischen den Einschnürungen (interannuläre Segmente) isolieren können (e) und zusätzlich noch verschiedene Nervenfasern bedienen können (f).

C40/3 Glia der peripheren Nervenzellen

Wie die Oligodendrogliazellen im zentralen Nervensystem so bilden die sogenannten Schwannschen Zellen im peripheren Nervensystem die Markscheiden zur Isolierung der Nervenfortsätze aus. Auch hier bilden sich Einschnürungen (a) und interannuläre Segmente (b). Charakteristisch für die Gliazellen des peripheren Nervensystems ist, dass sie als einzelne Zelle jeweils nur ein interannuläres Segment versorgen. Bei der Einschnürung erfolgt also ein Wechsel auf eine andere Gliazelle. Der Aufbau aus Myelinscheiden und Membranen der Gliazellen (c) entspricht der Oligodendrogliazelle. Für die Funktion des Nervenfortsatzes bedeutet der Wechsel von einem isolierten Anteil zu einer mehr oder weniger freien Membran, dass die Erregung von Einschnürung zu Einschnürung springt (saltatorische Erregungsleitung). Dies bedeutet eine erhebliche Steigerung der Erregungsleitung.

Die Aufspaltungen der Nervenfortsätze am Ende der peripheren Nerven können äußerst vielfältig sein. Sie können frei in einem anderen Gewebe enden (freie Nervenendigungen) (d). Oft sind sie auch in komplizierte Endigungen der sogenannten Endglia (Teloglia) eingebaut, wie z.B. Tastkörperchen oder anderen komplizierten Sinnesorganen.

C40/4 Motorische Endplatte

In der motorischen Endplatte als Spezialform einer Synapse erfolgt die Erregungsübertragung von einer Nervenzelle auf eine quergestreifte Skelettmuskelfaser. Kurz vor der motorischen Endplatte verliert der Nervenfortsatz seine Markscheide (a) und wird nur noch von der Gliazelle selbst eingeschleitet (Teloglia, b). Der Endabschnitt der Nervenzelle verbreitert sich an der Kontaktstelle zur Muskelfaser und bildet wieder zahlreiche synaptische Bläschen, Mitochondrien und Granula verschiedenster Art aus. Die Endverzweigungen des Nervenfortsatzes lagern sich der Zellmembran, der Muskelfaser (postsynaptische Membran) dicht an, wobei die Membran der Muskelzelle einen intensiven Faltenapparat zur Oberflächenvergrößerung ausbildet (c). Hier finden sich im Zytoplasma der Muskelfaser auffallend viele Kerne der Muskelzelle (d), wodurch die Endplatte im Ganzen etwas vorgewölbt wird. Auf diese Weise entsteht eine riesige Kontaktstelle, an der schon ein einzelner Nervenimpuls eine Erregung der Muskelfaser auszulösen vermag. Die in den Fortsatzendigungen vorhandenen synaptischen Vesikel (e) enthalten als Transmitter Acetylcholin, das entsprechend dem in Synapsen ablaufenden Mechanismus an Rezeptoren der postsynaptischen Membran andockt und dort zu einer neu entstehenden Erregung der Muskelfaser führt.

C40/5 Synapse

Als Synapse bezeichnet man eine spezifische, der Erregungsübertragung dienende Kontaktstruktur, über die eine Nervenzelle eine andere Zelle „innerviert“ (1). Man unterscheidet prinzipiell elektrische Synapsen und chemische Synapsen. Elektrische Synapsen übertragen direkt die Erregung auf eine angrenzende Zellmembran; sehr selten im Nervensystem des Menschen - zwischen Haarzellen des Innenohres oder zwischen Sinneszellen der Netzhaut (Abbildungen). Bei chemischen Synapsen bildet die Nervenzelle an ihren Endausläufern kolbige Auftreibungen (Boutons, Abb. C40/1, e) aus, die sich auf die Informationsübermittlung spezialisiert haben. Chemische Synapse heißt, dass die Erregung indirekt durch Vermittlung bestimmter chemischer Substanzen erfolgt. Dabei wird der Reiz, der von der Nervenzelle entlang der Zellmembran bis zu der kolbigen Auftreibung geleitet worden ist, umgesetzt in eine zeitlich korrelierte Freisetzung von Überträgerstoffen, die in bläschenartigen Strukturen (sogenannte synaptische Bläschen) (a) eingekapselt sind.

Der Nervenimpuls, die sogenannte Depolarisation, öffnet vorübergehend spannungskontrollierte Kalziumkanäle in der Membran, die noch vor der eigentlichen Überträgerstelle liegt. Hier findet man auch Pinozytosebläschen (b). Da die Kalziumkonzentration außerhalb von Zellen immer 1000mal höher ist als innerhalb der Zelle, strömt Kalzium in die Nervenzelle ein und die steigende Kalziumkonzentration löst die Ausschüttung von Vesikeln mit Überträgerstoffen aus.

Die Vesikel verschmelzen zunächst mit der sogenannten präsynaptischen Membran (c), wobei die Transmitter nachfolgend in den synaptischen Spalt (d) ausgeschüttet und schließlich von der postsynaptischen Membran aufgenommen werden. Dort binden sich die Überträgerstoffe an spezifische Rezeptoren (e) und öffnen gekoppelte Kanäle, die durch Einfließen von Natriumionen die Membran der nachfolgenden Zellen in einem begrenzten Bereich depolarisieren. Über eine Kettenreaktion kommt es zum Öffnen weiterer benachbarter Kanäle und es entsteht eine sich selbst fortpflanzende Depolarisation, die sich auf die gesamte Plasmamembran der nachfolgenden Zelle ausbreitet.

Da eine Synapse in oft kurzer Zeit (vielfach pro Sekunde) diesen Prozess durchführen muss, ist sie ein Ort hoher Stoffwechselaktivität. Deshalb findet man hier Mitochondrien (f), die einen hohen Energieumsatz anzeigen als auch Ausläufer des endoplasmatischen Retikulums (g) als Hinweis auf einen hohen Stoffumsatz. Die in der Synapse vorhandenen Filamente des Zytoskeletts (Neurofilamente) (h) dienen als Leitstrukturen für den sogenannten axonalen Transport, der z. B. für Transmitter und Membranbausteine vom Perikaryon bis zur Synapse als Weg dient.

Nach Art der synaptischen Bläschen und der Verdickungen der prä- bzw. postsynaptischen Membran unterscheidet man zwei Synapsentypen (Gray I und II). Gray I-Synapsen besitzen helle runde Vesikel und einen 30nm breiten Spalt, wobei die postsynaptische Membran stärker verdickt ist als die präsynaptische (2). Gray II-Synapsen haben einen 20nm breiten Spalt und haben eine schmale postsynaptische Membranverdichtung, wobei oft mehrere aktive Felder nebeneinander liegen (3). Typ Gray I gelten als erregende Synapsen (exzitatorische Synapsen), Typ Gray II als hemmende (inhibitorische Synapsen). Inhibitorische Synapsen unterdrücken die Erregungsbereitschaft einer nachfolgenden Zelle.

Neben diesen Grundtypen gibt es von der Form und feinen Funktionsdifferenzierung her noch Spezialformen: z. B. Synapsen mit sogenannten synaptischen Bändern (4) und komplexe Synapsen mit Bändern (5). Nervenfortsätze können Synapsen auch im Vorbeiziehen („en passant“) ausbilden (6). Dabei haben sie entweder die typischen prä- und postsynaptischen Membranen oder sie enden frei (im vegetativen Nervensystem). Dabei sind sie an ihrem äußeren Ende nicht mehr von Gliazellen umgeben und geben die Transmitter über größere Abstände (distance) an nebenstehende Zellen ab. Auch die motorische Endplatte ist eine Spezialform der Synapse.

La anatomía funcional de las células nerviosas

Las células nerviosas (neuronas) son las unidades autónomas más pequeñas que se agrupan para formar los órganos del sistema nervioso. Se distingue entre el sistema nervioso central (SNC) y el sistema nervioso periférico (SNP). Al sistema nervioso central pertenecen el encéfalo (cerebro y cerebelo) y la médula espinal. El sistema nervioso periférico está constituido por las fibras nerviosas de la periferia (p. ej. en la piel, en los músculos y en todos los órganos internos). Hay una diferenciación entre el sistema nervioso voluntario, responsable de la voluntad y de los emociones (se llama también sistema nervioso somático), y el sistema nervioso vegetativo (o autónomo), que controla automáticamente y sin influencia intencional los órganos internos. A través de círculos de reflejos la médula espinal juega el papel de coordinador entre la periferia y el encéfalo, tanto para el sistema nervioso vegetativo como para el sistema nervioso somático.

El sistema nervioso posee diversas funciones. En un principio recibe estímulos (ver, oír, oler, sentir etc), transmite estos estímulos, o más bien informaciones, las procesa y almacena hasta llega a responder a las informaciones recibidas con esquemas correspondientes que finalmente provocan movimientos intencionales. Esta diversidad de tareas se refleja también en la forma y la función de las neuronas individuales. Cada una de las células constituye una unidad muy variada y multifuncional con numerosas formaciones especiales. La neurona es tan especializada que no puede sobrevivir por sí misma. Incluso ha abandonado la capacidad de regeneración, una característica que tiene p. ej. la célula epidérmica.

Como las neuronas están bien ocupadas en mantener su forma complicada, necesitan la ayuda de las células de neuroglia para cumplir sus funciones de metabolismo y de transporte. Lo más importante en este proceso de mantenimiento es la alimentación de la superficie de la neurona, es decir las membranas, ya que éstas se encargan de la función principal de la neurona. Aquí se produce el cambio entre excitación y «no-excitación» de la membrana que se mide en milivoltios a base de la tensión. Se distingue entre el potencial de reposo y el potencial de acción. La unidad entera de neurona y célula glial está dirigida a ejecutar esta función. De esta manera algunas células gliales (astroglia) se han especializado en transmitir los productos del metabolismo de las capilares (f en fig. C40/1) en dirección a las neuronas. Otras células gliales - la oligodendroglia en el SNC, fig. C40/2 y las células de Schwann en el SNP, fig. C40/3 - son las responsables en rodear las células nerviosas con una capa aislante. Y también existen células gliales que rodean las formaciones finales de la arborización de los nervios en la periferia - la teloglia (b en fig. C40/4)

C40/1 La neurona

La neurona comprende un cuerpo celular o pericarión, la masa citoplasmática que rodea el núcleo, y numerosas prolongaciones. En principio hay dos tipos de prolongaciones, las dendritas, que conducen la información al pericarión, y el cilindroeje (sólo uno en cada neurona), que transmite la información a la neurona vecina.

En el pericarión (sección transversal en la imagen) se pueden apreciar las características comunes a todas las células mamíferas: mitocondrias (a), el retículo endoplasmático (b), el aparato de Golgi (c) y numerosas fibrillas del citoesqueleto (d). En la neurona el aparato de Golgi y el retículo endoplasmático están particularmente desarrollados, ya que ambos están relacionados con la producción y la renovación de la gran superficie de la membrana de neurona. Las ramificaciones numerosas de las neuronas albergan un complejo de fascículos que forma subcomponentes del citoesqueleto. En la imagen a la izquierda también se pueden distinguir formaciones especiales de la arborización de células - las numerosas sinapsis (e).

C40/2 Las vainas de mielina del sistema nervioso central

En principio, el responsable de la conducción y extensión de los impulsos nerviosos es la membrana de la neurona. Sin embargo, la velocidad de la conducción depende del diámetro del cilindro (también axón). Entre más gordo sea el cilindro, más rápido se extiende el impulso. Pero sin la ayuda de las respectivas células especiales (células gliales específicas) los impulsos se extienden de una forma continua (sólo en no vertebrados o en fibrillas del sistema nervioso vegetativo de vertebrados). Para aumentar la velocidad de la conducción se forman fibras nerviosas con vainas de mielina, interrumpidas por nudos - llamados los nódulos de Ranvier (a) - en intervalos de 1 a 3 mm. De este modo la conducción de la excitación se acelera enormemente, sin necesidad de que aumente el diámetro del axón. La excitación salta de un nudo a otro y la velocidad de la conducción aumente. El aislamiento entre los nudos individuales se realiza con sustancias grasas (lípidos, mielina, cefalinas, fosfolípidos, lecitinas, cerebrosidos etc.). Durante este proceso se va formando una capa uniforme de finísimas laminillas de proteínas lípidas y de la membrana de la célula glial (c). En los nudos este aislamiento espiral está interrumpido (d).

En el sistema nervioso central (SNC) las denominadas células de oligodendroglia son las responsables del aislamiento de los axones. Además son de suma importancia para el metabolismo de las células nerviosas, y se caracterizan por sus ramificaciones en forma de estrella, por medio de las cuales son capaces de aislar simultáneamente varios segmentos entre los nudos (segmentos interanulares) (e) y de servir a distintas fibras nerviosas (f).

C40/3 Neuroglia de las neuronas periféricas

Al igual que las células de oligodendroglia en el sistema nervioso central, las células de Schwann forman las vainas de mielina para el aislamiento de las prolongaciones de neuronas en el sistema nervioso periférico. Aquí también se forman nudos (a) y segmentos interanulares (b). Al contrario de las células de oligodendroglia, las células de Schwann rodean solamente un segmento interanular, es decir terminan en el nudo y el próximo segmento está rodeado de otra célula glial. La estructuración de las células gliales (c) con vainas de mielina y membranas corresponde a la de las células de oligodendroglia. La conducción de la excitación se realiza mucho más rápida en los axones con mielina porque el impulso salta de un nudo a otro. Esto se llama conducción saltatoria.

Las ramificaciones al extremo de las prolongaciones nerviosas pueden ser muy diversas. Unas terminan de forma libre en otro tejido (terminaciones nerviosas libres) (d), otras son integradas en terminaciones complejas de las denominadas células de teloglia, como por ej. los corpúsculos táctiles u otros órganos sensoriales complejos.

C40/4 La placa terminal

En la placa terminal como forma especial de una sinapsis, la transmisión de la excitación se realiza de la neurona a una fibra de un músculo esquelético estriado. Poco antes de la placa terminal, la prolongación nerviosa no lleva mielina (a) sino queda rodeada solamente de teloglia (b) misma. La sección terminal de la neurona se expande en el punto de contacto, con la fibra muscular formando numerosas vesículas sinápticas, mitocondrias y granulos de tipo muy variado. Las ramificaciones de la prolongación nerviosa se adhieren a la membrana de la fibra muscular (elemento postsináptico), con lo cual la membrana de la célula muscular establece un complejo de arrugas para aumentar su superficie (c). En el citoplasma de la fibra muscular se hallan muchísimos núcleos de la célula muscular (d) que causan una protuberancia de la placa terminal. De este modo se forma una estructura de contacto, donde un único impulso nervioso puede provocar la excitación de la fibra muscular. Las vesículas sinápticas (e), que se hallan en las terminaciones de las prolongaciones, contienen el neurotransmisor acetilcolina. Esta sustancia acopla a los receptores del elemento postsináptico - según el mecanismo regular en las sinapsis - provocando así una nueva excitación de la fibra muscular.

C40/5 La sinapsis

La sinapsis es una estructura de enlace específica, que sirve para la transmisión de impulsos nerviosos de una neurona a otra (1). Existen dos tipos de sinapsis: las eléctricas y las químicas. Las sinapsis eléctricas transmiten la excitación directamente a una membrana celular vecina. Son muy raras en el sistema nervioso del hombre; se encuentran por ej. entre las células acústicas filamentosas del oído interior o entre las células sensoriales de la retina (véanse las figuras). En las sinapsis químicas se forman engrosamientos en forma de cono en la terminación de un axón (los botones, fig. C40/1, e) que están especializados en la transmisión de información. Esta transmisión se realiza de forma indirecta, a través de sustancias químicas. En este proceso el estímulo, que la neurona ha conducido de la membrana hasta el botón terminal, se transforma en la secreción de neurotransmisores, encapselados en estructuras vesiculares (denominadas también vesículas sinápticas) (a).

El impulso nervioso, la denominada depolarización, abre temporalmente unos conductos de calcio - controlados por tensión - en la membrana anterior al propio punto de transmisión. Como la concentración de calcio fuera de las células siempre es mil veces más alta que dentro de las células, el calcio entra en la neurona causando por el incremento de la concentración la secreción de vesículas con neurotransmisores.

Primero las vesículas amalgaman con el elemento presináptico (c), segregando en un segundo paso los neurotransmisores a la hendidura sináptica (d); finalmente los neurotransmisores son recibidos por el elemento postsináptico. Allí los transmisores se unen a receptores específicos (e), abriendo unos conductos acoplados que exigen una depolarización limitada en la membrana de las células siguientes mediante la entrada de iones de sodio. A través de una reacción en cadena se abren más conductos vecinos y surge una depolarización autoreproductiva que se extiende por toda la membrana plasmática de la célula siguiente. Después de la depolarización o se desasimilan los neurotransmisores o son reincorporados a la terminación presináptica.

La sinapsis está obligada a repetir este proceso muy a menudo y en un tiempo muy corto, unas cuantas veces por segundo, de ahí que sea un lugar de alto metabolismo. Por ello se encuentran aquí mitocondrias (f), índices de altas transacciones de energías así como prolongaciones del retículo endoplasmático (g) como señal para altas transacciones de sustancias. Además alberga neurofilamentos (h) que juegan el papel de guía para el denominado transporte axonal, que sirve de camino p. ej. a los neurotransmisores y componentes de membranas del pericario a la sinapsis.

Según la forma de las vesículas sinápticas y el engrosamiento de los elementos presinápticos y postsinápticos, se distingue entre dos tipos de sinapsis, Gray I y Gray II. Las sinapsis de Gray I albergan vesículas claras y redondas y tienen una hendidura de 30 nm. Además el elemento postsináptico está más engrosado que el presináptico (2). Las sinapsis de Gray II tienen una hendidura de 20 nm y el elemento postsináptico está menos engrosado. En estas áreas activas son localizadas muchas veces una al lado de otra (3). Las sinapsis de Gray I son las sinapsis excitadoras, las de Gray II las sinapsis inhibitorias. Las sinapsis inhibitorias suprimen la excitabilidad de una célula siguiente.

Además de estos tipos básicos de sinapsis hay varias formas especiales respecto a la forma y la diferenciación de funciones, por ej. sinapsis con cintillas sinápticas (4) y sinapsis complejas con cintillas (5). Las prolongaciones de los nervios son capaces de formar sinapsis «en passant» (6). Estos tienen o los típicos elementos presinápticos o postsinápticos o terminan libre en el sistema nervioso vegetativo. En su extremo exterior ya no están rodeados de células gliales y los neurotransmisores segregan a través de una distancia más grande a las células vecinas. La placa terminal también es una forma especial de sinapsis.

Anatomie fonctionnelle des cellules nerveuses

Les cellules nerveuses sont les unités indépendantes les plus petites dont se composent les organes du système nerveux. On fait généralement une distinction entre le système nerveux central et le système nerveux périphérique: le cerveau (l'encéphale et le cervelet) et la moelle épinière font partie du système nerveux central. Le système nerveux périphérique comprend toutes les fibres nerveuses de la périphérie (p.ex. dans la peau, les muscles et toutes les viscères). On fait la différence entre le système nerveux volontairement accessible (soumis à la volonté ou à la sensation), également appelé système nerveux somatique, et le système nerveux végétatif (autonome) régissant automatiquement, et par conséquent sans accès volontaire, le fonctionnement des organes internes. Grâce à des cercles réflexes, la moelle épinière sert d'intermédiaire entre la périphérie et le cerveau tant pour le système nerveux végétatif que pour le système nerveux somatique.

Les tâches du système nerveux sont multiples: de la réception de l'excitation (vue, ouïe, odorat, sensation, etc.), en passant par la transmission de l'excitation et de l'information, le traitement et la mémorisation de l'information, à la réponse des informations entrantes avec les schémas correspondants, se traduisant finalement par des mouvements volontaires. Cette multitude reflète également la forme et la fonction de chaque cellule nerveuse. Chaque cellule est un complexe extrêmement varié et multifonctionnel possédant de nombreuses formes spéciales.

Les cellules intermédiaires (cellules gliales) doivent aider les cellules nerveuses à accomplir leurs tâches métaboliques et leurs tâches de transport. Car la cellule nerveuse se concentre entièrement sur la préservation de sa structure extrêmement compliquée, et donc surtout sur la préservation des surfaces, c.-à-d. des membranes. Les membranes se chargent de la tâche principale de la cellule nerveuse: c'est ici qu'a lieu le passage entre l'excitation et la „non-excitation“. Ce changement se mesure au moyen de la tension (mesurée en mV). On fait la distinction entre un potentiel de repos et un potentiel d'action. La configuration entière de la cellule nerveuse et de la cellule gliale repose sur cette fonction. C'est ainsi que certaines cellules gliales (astroglie) se sont spécialisées dans le transport de substances des capillaires (f sur l'ill. C40/1) en direction de la cellule nerveuse. Par conséquent, rien ne part des capillaires très denses du cerveau et de la moelle épinière sans avoir été contrôlé au préalable avant d'aboutir à la cellule nerveuse. D'autres cellules gliales se sont spécialisées dans l'enveloppement des cellules nerveuses par des gaines isolantes (oligodendrogliose dans le système nerveux central, ill. C40/2, resp. les cellules de Schwann dans le système nerveux périphérique, ill. C40/3). D'autres cellules gliales enveloppent les terminaisons axonales dans la périphérie (téloglie, b sur l'ill. C40/4).

C40/1 Cellule nerveuse

Au sein d'une cellule nerveuse, on fait la distinction entre la masse cellulaire (péricaryon) centrale groupée autour du noyau cellulaire et les nombreux prolongements. Parmi les prolongements, on fait la distinction entre les dendrites qui transmettent les informations au péricaryon et le neurite (seulement existant au singulier). Celui-ci transmet l'information à la cellule nerveuse suivante.

Lorsque l'on observe le péricaryon (présenté en coupe sur l'illustration), on reconnaît les nombreuses caractéristiques communes à chaque cellule des mammifères: les mitochondries (a), le réticulum endoplasmatique (b), l'appareil de Golgi (c) et les nombreuses fibrilles du cytosquelette (d). L'appareil de Golgi et le réticulum endoplasmatique sont particulièrement prononcés dans la cellule nerveuse car tous les deux jouent un rôle dans la production et le renouvellement de la surface énorme de la membrane des cellules nerveuses. On trouve un réseau de fibres prononcé dans les nombreux prolongements des cellules en tant que sous-unités du squelette cellulaire. Sur l'illustration de gauche, on reconnaît également des formations spéciales des prolongements, c'est-à-dire les nombreuses synapses (e).

C40/2 Gaines myéliniques du système nerveux central

La sinapsis es una estructura de enlace específica, que sirve para la transmisión de impulsos nerviosos de En principio, la membrana de la célula nerviosa es responsable de los procesos de transmisión de las impulsiones nerviosas. Por ailleurs, il existe une relation entre l'épaisseur de l'axone et la vitesse de transmission. Au plus un axone est épais, au plus la vitesse de transmission est élevée. Sans cellules intermédiaires adéquates (cellules gliales spécialisées), la transmission de l'excitation est continue (n'existe que chez les invertébrés ou dans les fines fibres du système nerveux végétatif des invertébrés). Afin d'augmenter la vitesse de transmission, des fibres nerveuses pourvues de gaines myéliniques se forment, interrompues par des entailles profondes (a)(appelées étranglements de Ranvier) à intervalles de 1 à 3 mm. Ceci permet d'augmenter considérablement la transmission de l'excitation sans que le diamètre de l'axone ne doive fortement augmenter. L'excitation passe alors d'entaille en entaille et la transmission devient plus rapide. L'isolation existante entre chaque entaille (b) est réalisée par l'isolation au moyen de substances contenant de la graisse (lipides, myéline, céphaline, phosphatides, lécithine, cérébrosides, etc.). Un empilement régulier de lamelles de lipoprotéines extrêmement fines et de la membrane de la cellule gliale (c) se forme. Ces isolations en forme de spirale sont interrompues aux entailles (d). Dans le système nerveux central, les axones appelés oligodendrocytes se chargent de l'isolation. Par ailleurs, ils sont importants pour le métabolisme des cellules nerveuses. L'isolation (e) simultanée de plusieurs segments entre les entailles (segments interannulaires) par plusieurs prolongements en forme d'étoile ainsi que l'approvisionnement (f) de plusieurs fibres nerveuses est caractéristique des oligodendrocytes.

C40/3 Névrogie des cellules nerveuses périphériques

De même que les oligodendrocytes au niveau du système nerveux central, les cellules de Schwann forment les gaines myéliniques pour l'isolation des axones au niveau du système nerveux périphérique. Ici également, des entailles (a) et des segments interannulaires (b) se forment. Le fait que chaque cellule n'approvisionne qu'un seul segment interannulaire est caractéristique des cellules gliales du système nerveux périphérique. A l'endroit de l'entaille, le passage à une autre cellule gliale est réalisé. La structure des gaines myéliniques et des membranes des cellules gliales (c) correspond à celle de l'oligodendrocyte. Pour la fonction de l'axone (souvent appelé „neurite“), le passage d'une partie isolée à une membrane plus ou moins libre signifie que l'excitation passe d'entaille en entaille (transmission saltatoire de l'excitation). Ceci signifie une augmentation considérable de la transmission de l'excitation. Les ramifications des axones à la terminaison des nerfs périphériques peuvent être extrêmement variées. Elles peuvent se terminer librement dans un autre tissu (terminaisons nerveuses libres) (d). Souvent, elles sont intégrées aux terminaisons compliquées de la téloglie, comme p.ex. les corpuscules du tact ou d'autres organes des sens compliqués.

C40/4 Plaque motrice terminale

La plaque motrice terminale représente une forme spéciale de synapse où la transmission de l'excitation a lieu d'une cellule nerveuse à une fibre musculaire striée du squelette. Peu avant la plaque motrice terminale, l'axone perd sa gaine myélinique (a) et il n'est plus enveloppé que par la cellule gliale même (téloglie, b). La section terminale de la cellule nerveuse s'élargit au lieu de contact avec la fibre musculaire et forme à nouveau de nombreux renflements synaptiques, des mitochondries et des granules des genres les plus différents. Les ramifications terminales de l'axone se fixent de manière serrée à la membrane cellulaire, à la fibre musculaire (membrane postsynaptique), à l'occasion de quoi la membrane de la cellule musculaire forme un appareil intensif de plis pour agrandir la surface (c). Dans le cytoplasme de la fibre musculaire, on rencontre un nombre extrêmement élevé de noyaux de la cellule musculaire (d), ce qui provoque un léger bombement de toute la plaque terminale. De cette manière se forme un lieu de contact énorme où une seule impulsion nerveuse peut déclencher une excitation de la fibre musculaire. Les vésicules (e) synaptiques présentes dans les terminaisons des axones contiennent de l'acétylcholine en tant que transmetteur qui selon le mécanisme se déroulant dans les synapses se fixe aux récepteurs de la membrane postsynaptique et entraîne à cet endroit la formation d'une nouvelle excitation de la fibre musculaire.

C40/5 Synapse

Par synapse, on désigne une structure de contact spécifique servant à la transmission de l'excitation par laquelle une cellule nerveuse „inerve“ (1) une autre cellule. En principe, on fait une distinction entre les synapses électriques et les synapses chimiques. Les synapses électriques transmettent directement l'excitation à une membrane avoisinante; très rare dans le système nerveux de l'homme - entre les cellules auditives de l'oreille interne ou entre les cellules sensorielles de la rétine (illustrations). En ce qui concerne les synapses chimiques, la cellule nerveuse se termine par des petits renflements bulbiformes (boutons terminaux, ill. C40/1, e) qui se sont spécialisés dans la transmission des informations. Synapse chimique, cela signifie que l'excitation a lieu indirectement par l'intermédiaire de certaines substances chimiques. L'excitation qui a été conduite par la cellule nerveuse le long de la membrane cellulaire jusqu'au renflement bulbiforme est transformée en une libération corrélée temporaire de substances de transmission encapsulées dans des structures vésiculaires (vésicules synaptiques) (a). L'impulsion nerveuse, dénommée dépolarisation, ouvre temporairement les canaux calciques contrôlés par tension dans la membrane encore située avant le lieu de transmission proprement dit. Étant donné que la concentration de calcium à l'extérieur des cellules est toujours 1000 fois plus élevée qu'à l'intérieur de la cellule, le calcium se répand dans la cellule nerveuse et la concentration croissante de calcium déclenche la libération de vésicules contenant des transmetteurs.

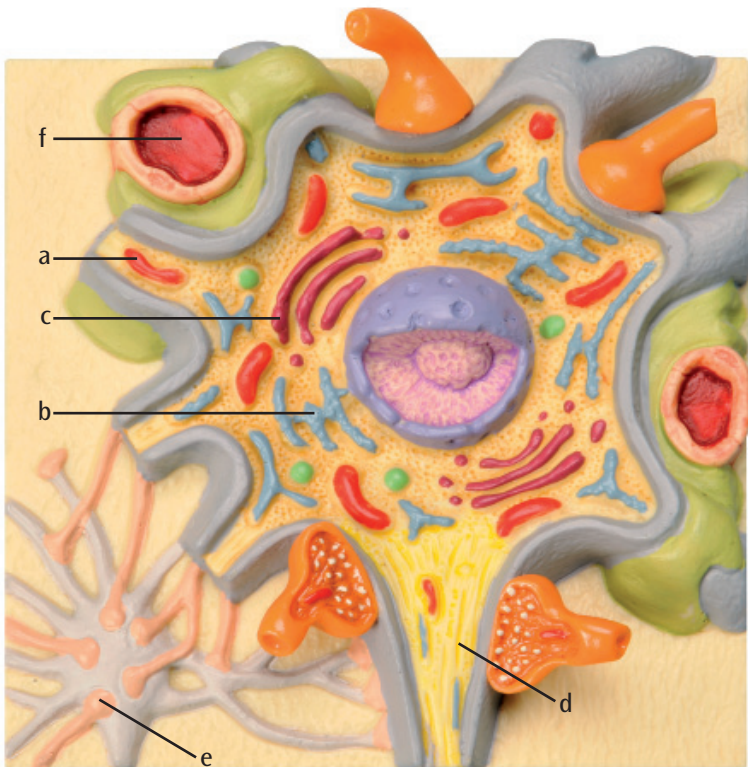
Les vésicules se mélangent tout d'abord à la membrane présynaptique (c), à l'occasion de quoi les transmetteurs sont ensuite libérés dans la fente synaptique (d) et sont recueillis ensuite par la membrane postsynaptique. C'est précisément là que les transmetteurs se fixent aux récepteurs spécifiques (e) et ouvrent des canaux couplés qui par la pénétration d'ions de sodium dépolarisent la membrane des cellules suivantes dans une région délimitée. Par un mécanisme de réaction en chaîne, l'ouverture d'autres canaux avoisinants est réalisée et une dépolarisation se reproduisant naît, se répandant sur toute la membrane plasmique de la cellule suivante. Après la dépolarisation, les transmetteurs se dégradent ou sont réabsorbés dans le renflement bulbiforme.

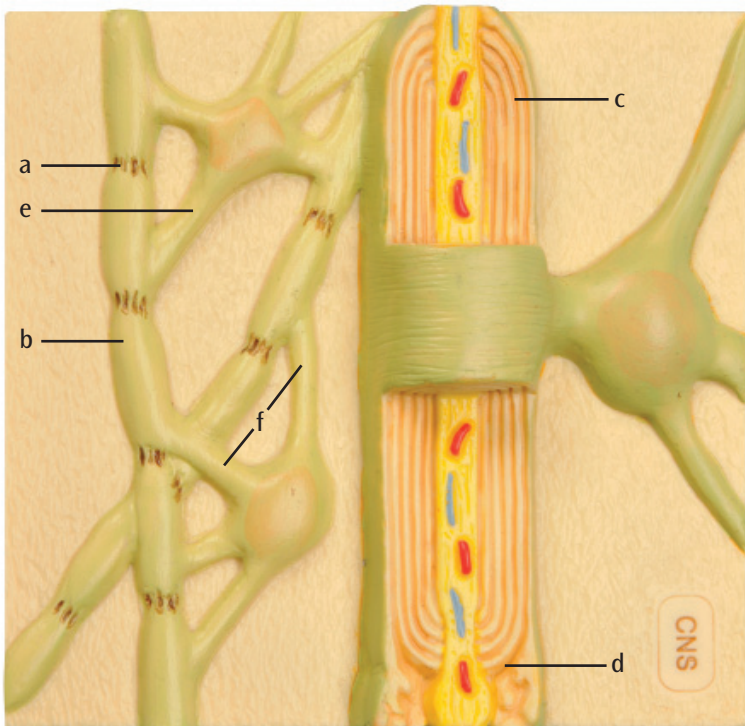
Étant donné qu'une synapse doit réaliser ce processus en un temps souvent très court (plusieurs fois par seconde), elle est donc un lieu d'activité métabolique intense. C'est la raison pour laquelle on y trouve des mitochondries (f) présentant un haut bilan énergétique ainsi que des prolongements du réticulum endoplasmique (g) en tant qu'indice d'un haut bilan de substances. Les filaments du cytosquelette (neurofilaments) (h) contenus dans la synapse servent de structure de transmission pour le transport axonal qui sert de chemin aux transmetteurs et aux éléments constitutifs de la membrane, p.ex. du péricaryon à la synapse.

Selon le genre des vésicules synaptiques et des épaississements de la membrane présynaptique et postsynaptique, on distingue deux types de synapses (Gray I et II). Les synapses de type Gray I possèdent des vésicules rondes et claires ainsi qu'une fente d'une largeur de 30 nm, bien que la membrane postsynaptique soit plus épaisse que la membrane présynaptique (2). Les synapses de type Gray II ont une fente d'une largeur de 20 nm et présentent un épaississement de la membrane postsynaptique étroit et très souvent, plusieurs champs actifs se trouvent les uns à côté des autres (3). Les synapses de type Gray I sont désignées comme synapses activatrices et les synapses de type Gray II comme synapses inhibitrices. Les synapses inhibitrices suppriment la possibilité d'excitation de la cellule suivante.

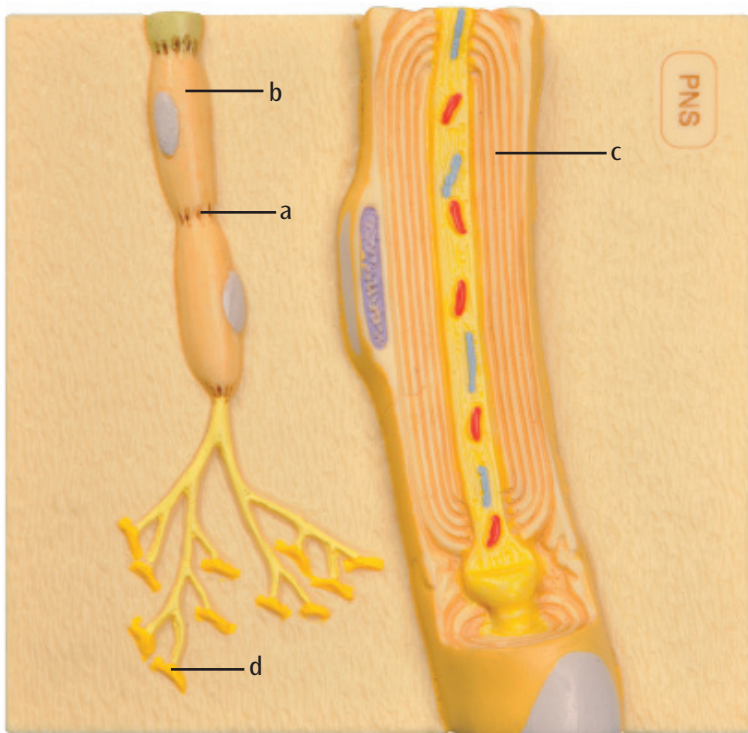
En plus de ces types de base, il existe également des formes spéciales quant à la forme et l'étroite différenciation des fonctions: p.ex. des synapses avec des bandes synaptiques (4) et des synapses complexes avec bandes (5). Les axones peuvent également former des synapses „en passant“ (6). Elles ont soit les membranes présynaptiques et postsynaptiques typiques ou elles ont des terminaisons libres (dans le système nerveux végétatif). Elles ne sont alors plus entourées de cellules gliales à leur terminaison et cèdent les transmetteurs à distance aux cellules avoisinantes. La plaque motrice terminale est également une forme spéciale de synapse.

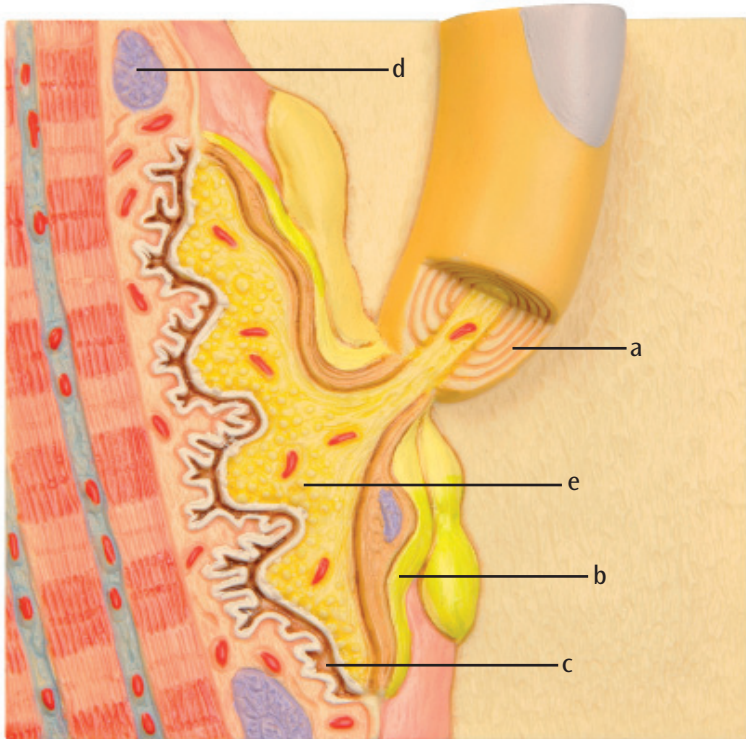
C40/1



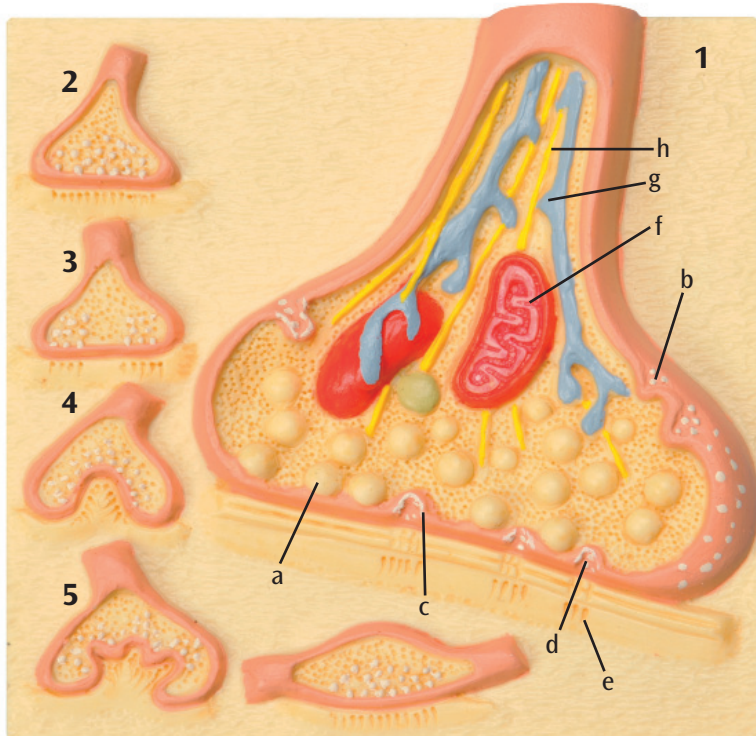


C40/3





C40/5



Anatomia funcional das células nervosas

Células nervosas são as menores unidades independentes dos órgãos do sistema nervoso. Geralmente fazemos uma distinção entre o sistema nervoso central e o periférico: o cérebro (hemisférios e cerebelo) e a medula espinhal pertencem ao sistema nervoso central. O sistema nervoso periférico consiste de todas as fibras nervosas da periferia (na pele, músculos e todos os órgãos viscerais). Existe uma diferenciação entre o sistema nervoso cêntrico (desejo ou sentidos), acessível ou somático e o sistema nervoso vegetativo (autônomo) que automaticamente, sem acesso voluntário assume o controle sobre os órgãos internos. A medula espinhal utiliza ciclos de reflexos para mediar entre o periférico e o cérebro, bem como para mediar para o sistema nervoso vegetativo e o somático.

O sistema nervoso exerce muitas tarefas indo desde captar impulsos (vendo, ouvindo, cheirando, sentindo, etc.) passando pela transmissão do impulso ou informação, processamento da informação e armazenamento para a resposta de entrada de informações com parâmetros correspondentes que resultam em movimentos voluntários. Esta variedade também espelha a forma e função das células nervosas individuais.

As células auxiliares (células gliais) devem ajudar às células nervosas a preencher suas funções metabólicas e de transporte. As células nervosas por si próprias concentram-se inteiramente em manter sua extremamente complicada estrutura, sendo o fator mais importante as superfícies, ou seja, as membranas. Isto se dá porque as membranas exercem a função principal na célula nervosa: o processo de excitação e não-excitação da membrana. Esta mudança pode ser determinada medindo-se a tensão (em mV). Uma diferença é feita entre o potencial de descanso e o de ação. Toda a estrutura da célula nervosa e da célula glial é baseada nessa função. Assim, certas células gliais (astróglia) são especializadas na tarefa de transportar substâncias dos capilares (f na figura C40/1) na direção da célula nervosa. Assim, nada fora de controle vem dos capilares mais densos no cérebro e medula espinhal para a célula nervosa. Outras células gliais são especializadas em cercar as células nervosas com tecidos insulados (oligodendróglia no sistema nervoso central, C40/2, ou células de Schwann no sistema nervoso periférico, C40/3). Outras células gliais cercam as células terminais dos nervos na periferia (telóglia, b na figura C40/4).

C40/1 Célula nervosa

Uma célula nervosa é dividida em massa central da célula agrupada ao redor do núcleo (pericário) e os numerosos processos nervosos. Os processos nervosos são divididos em dendritos, que transmitem a informação ao pericário, e o axônio (somente um está presente). Este transmite a informação para a próxima célula nervosa.

Se observarmos o pericário (aberto na figura), diversas características podem ser reconhecidas, as quais estão presentes em todas as células dos mamíferos: mitocôndria (a), retículo endoplasmático (b) aparato de Golgi (c) e as diversas fibrilas do citoesqueleto (d). O aparato de Golgi e o retículo endoplasmático estão particularmente destacados na célula nervosa por estarem ambos envolvidos na produção e renovação da enorme superfície da membrana da célula nervosa. Uma rede de fibras bem estruturada, uma sub-unidade do esqueleto da célula, pode ser encontrada em seus diversos ramos. Além disso, formações especiais dos ramos, tais como as diversas sinapses (e), podem ser vistas na metade esquerda da figura.

C40/2 Bainha de mielina do sistema nervoso central

A membrana da célula nervosa é responsável principalmente pelo processo de espalhar o impulso nervoso. Além disso, há uma ligação entre a espessura do processo nervoso e a velocidade de transmissão. Quanto mais espesso for o processo nervoso, maior será a velocidade de transmissão. Sem as devidas células auxiliares (células gliais especializadas), a transmissão do impulso é contínua (ocorre apenas em invertebrados ou em finas fibras do sistema nervoso vegetativo dos vertebrados). Afins de aumentar a velocidade de transmissão, fibras nervosas com formato de bainha de mielina são interrompidas pelos que são conhecidos como anéis de constrição (a) (nodos de Ranvier) em intervalos de 1 a 3 mm. Isto faz com que a velocidade de transmissão dos impulsos aumente consideravelmente, sem que o diâmetro do processo nervoso tenha que ser expandido. O impulso pula de um anel de constrição para outro e a transmissão fica cada vez mais rápida. A insulação entre os anéis de constrição individuais (b) ocorre valendo-se de substâncias que contenham gordura (lipídios, mielina, cefalina, fosfatídeos, lecitina, cerebrosídeos, etc.). Uma camada uniforme extremamente fina de proteína lipídica lamelar e a membrana da célula glial (c) é gerada. A insulação espiral é interrompida nos anéis de constrição (d).

No sistema nervoso central, as oligodendróglia assumem a tarefa de insular os processos nervosos. Uma característica das oligodendróglia é que elas podem insular diversos segmentos entre as constrições (segmentos interanulares) ao mesmo tempo (e) devido à diversos ramais com formato de estrela que também podem servir várias fibras nervosas (f).

C40/3 Glia das células nervosas periféricas

Da mesma forma que as oligodendróglia no sistema nervoso central, as células de Schwann formam a bainha de mielina no sistema nervoso periférico para insular o processo nervoso. Neste caso também, constrições (a) e segmentos interanulares (b) são formados. Uma característica das células gliais do sistema nervoso periférico é que cada célula fornece somente um segmento interanular. Assim a mudança para uma outra célula glial ocorre durante a constrição. A estrutura feita de bainhas de mielina e membranas das células gliais (c) é a mesma da célula oligodendroglial. A mudança de uma proporção insulada para uma membrana mais ou menos livre significa que o impulso pula de constrição em constrição (transmissão do impulso por saltos). Isso gera um considerável aumento na transmissão do impulso.

A subdivisão dos processos nervosos no final dos nervos periféricos pode ser extremamente variada. Eles podem terminar livremente em um outro tecido (terminação nervosa livre) (d). Eles são geralmente integrados em terminações complicada no final da glia (telóglia), assim como os corpúsculos tácteis ou outros complicados órgãos sensoriais.

C40/4 Placa terminal isolada

Na placa terminal isolada, um tipo especial de sinapse, os impulsos são transmitidos de uma célula nervosa para uma fibra do músculo esquelético estriado. Brevemente antes da placa terminal isolada, o processo nervoso perde a sua bainha de mielina (a) e é apenas cercado pela própria célula glial (telóglia, b). A seção terminal da célula nervosa estende-se do ponto de contato à fibra do músculo e reforma numerosas vesículas sinápticas, mitocôndrias e grânulos de diversos tipos. Os ramos terminais do processo nervoso acumulam-se na membrana celular, a fibra do músculo (membrana pós-sináptica) próximo a eles. A membrana da célula muscular forma um intenso aparato contra o aumento da superfície (c). Uma surpreendente quantidade de núcleos da célula muscular (d) são encontrados no citoplasma das fibras musculares, fazendo com que a placa terminal fique levemente arqueada. Isso leva a um enorme ponto de contato no qual um simples impulso nervoso pode disparar excitação das fibras musculares. As vesículas sinápticas (e) nas terminações do nervo contém acetilcolina transmissora que se estabelece nos receptores da membrana pós-sináptica de acordo com o mecanismo nas sinapses e de lá gera uma excitação renovada para as fibras musculares.

C40/5 Sinapse

Uma sinapse é uma estrutura de contato servindo especificamente para transmitir impulsos e usada por uma célula nervosa para „inervar“ a outra (1). Existem sinapses elétricas e químicas. As sinapses elétricas transmitem diretamente o impulso à uma membrana celular vizinha (muito raro no sistema nervoso humano, entre as células capilares do ouvido interno ou entre as células sensoriais da retina) (Figuras). No caso da sinapse química, a célula nervosa forma intumescências em forma de botões nos ramos terminais (botões, figura C40/1, e) os quais são especializados na transferência de informações. No caso das sinapses químicas, o impulso é transmitido indiretamente via certas substâncias químicas. O impulso, o qual é transmitido da célula nervosa através da membrana celular para as intumescências em forma de botão, é convertido para uma liberação tempo-correlata de substâncias transmissoras que são encapsuladas nas estruturas vesiculares (vesículas sinápticas) (a). O impulso nervoso, despolarização, temporariamente abre os canais de cálcio controlados por tensão na membrana os quais encontram-se à frente do real ponto de transmissão. Como as concentrações de cálcio são sempre 1000 vezes maiores do lado de dentro do que do de fora da célula, o cálcio flui na célula nervosa e o aumento na concentração de cálcio aciona a liberação das vesículas com substâncias transmissoras.

As vesículas primeiramente fundem-se com a membrana pré-sináptica (c), os transmissores são lançados na falha sináptica (d) e finalmente levados pela membrana pós-sináptica. As substâncias transmissoras juntam-se aos receptores específicos (e) e abrem canais iônicos que despolarizam a membrana das células vizinhas numa área limitada pelo fluxo dos íons de sódio. Uma reação em cadeia abre os canais vizinhos seguintes e uma despolarização que se auto distribui ocorre distribuindo-se para toda a membrana plasmática da célula seguinte. Após a despolarização, as substâncias transmissoras podem tanto serem submetidas à degradação como podem ser levadas novamente pelas intumescências pré sinápticas em forma de botão (b).

Como a sinapse deve frequentemente conduzir este processo num período muito curto de tempo (diversas vezes por segundo), este é um ponto de alta atividade metabólica. Assim, mitocôndrias (f) podem ser encontradas aqui, as quais mostram um metabolismo de alta energia, bem como os ramos do retículo endoplasmático (g), um sinal de alto metabolismo de substâncias. Os filamentos do citoesqueleto na sinapse (neurofilamentos) (h) são estruturas guia para o transporte axonal que é usado como rota para transmissores e componentes da membrana do pericário para a sinapse.

Uma distinção é feita entre os dois tipos de sinapses (Gray I e II), dependendo do tipo das vesículas sinápticas e da espessura das membranas pré e pós-sinápticas. As sinapses Gray I possuem leves vesículas arredondadas, uma fenda medindo 30 nm de comprimento e a membrana pós-sináptica é mais grossa do que a pré-sináptica (2). As sinapses Gray II tem uma fenda medindo 20 nm de comprimento e possuem um espessamento estreito da membrana pós-sináptica, diversos campos ativos geralmente estão localizados um ao lado do outro (3). As sinapses do tipo Gray I são tidas como sinapses excitadoras, as do tipo Gray II como sinapses inibidoras. Sinapses inibidoras suprimem a prontidão de excitação da célula subsequente.

Além destes tipos básicos, existem formas especiais baseadas no formato e na ligeira diferenciação de funções, como as sinapses com cordão sináptico (4), sinapses complexas com cordão (5). Processos nervosos podem formar sinapses quando em „em passant“ (6). Elas podem até mesmo ter as membranas pré e pós-sinápticas típicas ou ter terminações livres (no sistema nervoso vegetativo). Elas não são mais cercadas por células gliais em suas terminações externas e passam os transmissores para as células vizinhas bem mais distantes („à distance“). A placa terminal isolada também é uma forma especial de sinapse.

Anatomia funzionale dei neuroni

I neuroni sono le unità indipendenti più piccole da cui sono costituiti gli organi del sistema nervoso. In generale, si distingue tra sistema nervoso centrale e periferico: al primo appartengono il cervello, il cervelloletto e il midollo spinale, mentre il secondo comprende tutti le fibre nervose periferiche (ad es. nella cute, nei muscoli e in tutti gli organi interni). A questo riguardo, è necessario differenziare tra sistema nervoso volontario o somatico (ossia gestito dalla volontà o dalle sensazioni) e sistema nervoso vegetativo, che assume automaticamente, senza intervento intenzionale, il controllo degli organi interni. Il midollo spinale, tramite il cosiddetto arco riflesso spinale, rappresenta l'intermediario tra elementi periferici e cervello sia per il sistema nervoso vegetativo, sia per quello somatico.

Questi ultimi hanno molteplici compiti: dal rilevamento degli stimoli (vista, udito, olfatto, tatto ecc.) attraverso la comunicazione dello stimolo o dell'informazione, alla sua elaborazione e memorizzazione, fino alla risposta alle informazioni in ingresso con modelli corrispondenti, che sfociano infine in movimenti volontari. Questa molteplicità rispecchia la forma e la funzione dei singoli neuroni, in quanto ogni cellula rappresenta un insieme estremamente vario e multifunzionale dotato di numerose strutture speciali.

Le cellule gliali (cellule ausiliari) devono aiutare i neuroni a portare a termine i loro compiti metabolici e di trasporto. Questo perché il neurone si concentra sul mantenere la sua forma estremamente complicata, il cui elemento più importante sono le superfici, ossia le membrane, che, in effetti, assumono il fine principale del neurone: è qui che si verifica il passaggio da eccitazione a "non eccitazione" della membrana stessa. Questo passaggio viene determinato in base alla tensione (misurata in mV). A tal fine, si distingue tra un cosiddetto potenziale di riposo e d'azione. L'intera struttura di neuroni e cellule gliali è finalizzata a questa funzione, per cui determinate cellule (astroglia) si sono specializzate ad assumere il trasporto delle sostanze dai capillari (f nella fig. C40/1) in direzione del neurone. In questo modo, viene attuato un controllo costante di tutto ciò che viene trasferito ai neuroni dai capillari, estremamente densi, presenti nel cervello e nel midollo spinale. Altre cellule gliali circondano i neuroni con guaine isolanti (cellule oligodendrogliali nel sistema nervoso centrale, fig. C40/2, o cellule gliali di Schwann nel sistema nervoso periferico, fig. C40/3). Esistono infine cellule gliali che avvolgono le arborizzazioni terminali dei nervi periferici (teloglia, b nella fig. C40/4).

C40/1 Neurone

In un neurone si riconosce la massa cellulare centrale raggruppata intorno al nucleo (pericario) e i numerosi prolungamenti citoplasmatici, suddivisi tra i cosiddetti dendriti, che portano le informazioni al pericario, e l'unico neurite presente. Quest'ultimo trasporta le informazioni al neurone successivo.

Osservando il pericario (sezionato nella figura), è possibile riconoscere le numerose caratteristiche comuni a ogni cellula mammifera: il mitocondrio (a), il reticolo endoplasmatico (b), l'apparato del Golgi (c) e i molteplici filamenti del citoscheletro (d). All'interno del neurone, l'apparato del Golgi e il reticolo endoplasmatico sono particolarmente marcati, in quanto entrambi sono addetti alla produzione e al rinnovamento dell'enorme superficie della membrana della cellula. Nelle numerose arborizzazioni si trova una rete di fibre molto ben strutturata che costituisce una sottounità dello scheletro cellulare.

Inoltre, a sinistra nella figura è possibile riconoscere formazioni speciali delle arborizzazioni: le sinapsi (e), presenti in grande numero.

C40/2 Guaina mielinica del sistema nervoso centrale

La membrana del neurone è la principale responsabile per i processi di propagazione dell'impulso nervoso. Esiste inoltre un legame tra lo spessore del prolungamento citoplasmatico e la velocità di trasferimento: più spesso è un prolungamento, più alta è la velocità di trasferimento. Senza le relative cellule ausiliarie (cellule gliali specializzate), la trasmissione degli impulsi avviene in modo continuo (si verifica solo negli invertebrati o nelle fibre sottili del sistema nervoso vegetativo dei vertebrati). Per aumentare la velocità di trasferimento, si formano fibre nervose dotate di guaina mielinica che presenta interruzioni di 1-3 mm dette nodi di Ranvier (a). In questo modo, la trasmissione dell'impulso viene notevolmente velocizzata senza che a ciò debba corrispondere un marcato incremento del diametro del prolungamento. L'impulso salta da un nodo all'altro e la trasmissione avviene più rapidamente. L'isolamento tra i singoli nodi di Ranvier (b) è assicurato dalla presenza di sostanze contenenti grasso (lipidi, mielina, cefalina, fosfolipidi, lecitina, cerebrosidi ecc.), che consentono la formazione di uno strato uniforme di lamelle lipoproteiche estremamente sottili e della membrana della cellula gliale (c). Questo isolamento a spirale è interrotto in corrispondenza dei nodi (d).

Nel sistema nervoso centrale, la funzione di isolamento viene assunta dai prolungamenti citoplasmatici, le cosiddette cellule oligodendrogliali. La loro caratteristica consiste nella capacità di isolare contemporaneamente più segmenti tra i nodi (segmenti internodali, e) tramite molteplici arborizzazioni a forma di stella e di poter inoltre servire diverse fibre nervose (f).

C40/3 Cellule gliali dei neuroni periferici

Analogamente alle cellule oligodendrogliali nel sistema nervoso centrale, le cosiddette cellule di Schwann formano le guaine mieliniche per isolare i prolungamenti nel sistema nervoso periferico. Anche in questo caso vengono creati nodi (a) e segmenti internodali (b). La loro particolarità è che ogni singola cellula serve un solo segmento internodale, per cui al momento dell'allacciamento si verifica un passaggio a un'altra cellula gliale. La struttura di guaine mieliniche e membrane delle cellule gliali (c) corrisponde a quella delle cellule oligodendrogliali. Il passaggio da una porzione isolata a una membrana più o meno libera significa, per la funzione del prolungamento nervoso, che lo stimolo salta da un nodo all'altro (conduzione saltatoria dell'impulso), il che a sua volta porta a una trasmissione dell'impulso stesso notevolmente più efficace.

C40/4 Placca motrice

La suddivisione dei prolungamenti all'estremità dei nervi periferici può essere molto varia. Essi possono terminare liberamente in un altro tessuto (terminazioni nervose libere, d), oppure, come spesso accade, essere integrati in terminazioni complesse delle cosiddette cellule di teloglia, come i corpuscoli tattili o altri organi sensoriali altamente strutturati.

Nella placca motrice, una forma speciale di sinapsi, avviene la trasmissione dell'impulso da un neurone a un fascio muscolare scheletrico striato. Poco prima della placca motrice, il prolungamento nervoso perde la sua guaina mielinica (a) e viene avvolto solo dalla cellula gliale (teloglia, b). La sezione terminale del neurone si diffonde sul fascio muscolare in corrispondenza del punto di contatto, creando nuovamente vescicole sinaptiche, mitocondri e grani numerosi e svariati. Le ramificazioni terminali del prolungamento si accumulano sulla membrana del fascio muscolare (membrana postsinaptica), per cui la membrana della cellula muscolare costituisce un intensivo sistema di ripiegamento per l'ingrandimento della superficie (c). Nel citoplasma del fascio muscolare si trovano numerosi nuclei della cellula muscolare (d), il che porta a una leggera protrusione della placca motrice. In questo modo si crea un enorme punto di contatto, sul quale anche un solo impulso nervoso può causare l'eccitazione del fascio muscolare. Le vescicole sinaptiche (e) presenti nelle terminazioni dei prolungamenti contengono acetilcolina, un neurotrasmettitore che, secondo il meccanismo in corso nelle sinapsi, si lega ai recettori della membrana postsinaptica e conduce in tale sede a una nuova eccitazione dei fasci muscolari.

C40/5 Sinapsi

Per sinapsi si intende una specifica struttura di contatto che contribuisce alla conduzione dell'impulso e tramite la quale un neurone „innerva“ (1) un'altra cellula. Si parla, in generale, di sinapsi elettriche e chimiche. Le sinapsi elettriche veicolano direttamente l'impulso a una membrana cellulare adiacente, cosa che accade molto raramente nel sistema nervoso umano, ad esempio tra le cellule capellute dell'orecchio interno o tra le cellule sensoriali della retina (v. figure). Nel caso delle sinapsi chimiche, il neurone produce sulle sue arborizzazioni terminali dei rigonfiamenti a forma di bottone (chiamati perciò bottoni sinaptici, fig. C40/1, e) che si sono specializzati nella trasmissione delle informazioni. La denominazione „sinapsi chimica“ sta a indicare che l'impulso viene inviato indirettamente per mezzo di determinate sostanze chimiche. Di conseguenza, lo stimolo, trasportato dal neurone al bottone sinaptico lungo la membrana cellulare, viene convertito in un rilascio correlato a livello temporale di trasmettitori incapsulati in strutture a forma di vescica (le cosiddette vescicole sinaptiche, a). La depolarizzazione della membrana determina l'apertura temporanea di canali di calcio controllati tramite tensione e posizionati ancora prima dell'effettivo punto di trasmissione.

Qui si trovano anche le vescicole di pinocitosi (b). Poiché la concentrazione di calcio al di fuori della cellula è sempre mille volte superiore che non all'interno di essa, il calcio penetra nel neurone e la concentrazione crescente avvia la distribuzione di vescicole contenenti trasmettitori. Le vescicole si fondono con la cosiddetta membrana presinaptica (c), per cui i neurotrasmettitori vengono rilasciati nello spazio sinaptico (d) e infine assorbiti dalla membrana postsinaptica, dove si legano a specifici recettori (e) e aprono coppie di canali che depolarizzano la membrana delle cellule successive in un'area delimitata attraverso l'affluenza di ioni di sodio. Si verifica quindi un effetto a catena che porta all'apertura di altri canali vicini e quindi a una depolarizzazione autoriproduttiva che si diffonde sull'intera membrana plasmatica della cellula successiva.

Poiché una sinapsi deve eseguire questo processo in poco tempo (più volte al secondo), essa rappresenta una zona di intensa attività metabolica. È quindi possibile individuare mitocondri (f), che mostrano un alto metabolismo energetico, e arborizzazioni del reticolo endoplasmatico (g), che indicano invece un'elevata elaborazione di sostanze. I filamenti del citoscheletro (neurofilamenti, h) presenti nelle sinapsi agiscono da guida per il cosiddetto trasporto assonico, che veicola ad es. i neurotrasmettitori e i componenti della membrana dal pericario alla sinapsi stessa.

Esistono due tipi di sinapsi (Gray I e II), che si differenziano dal tipo di vescicole sinaptiche e dallo spessore della membrana pre e postsinaptica. Le sinapsi di tipo Gray I presentano vescicole chiare e tonde e uno spazio di 30 nm di larghezza, per cui la membrana postsinaptica è molto più spessa di quella presinaptica (2). Le sinapsi di tipo Gray II sono caratterizzate da uno spazio di 20 nm di larghezza e da una membrana postsinaptica piuttosto sottile, il che comporta spesso la presenza di più campi attivi uno accanto all'altro (3). Le sinapsi di tipo Gray I sono eccitatorie, quelle di tipo Gray II inibitorie. Queste ultime reprimono l'eccitabilità di una cellula successiva.

Accanto ai due principali, esistono altri tipi speciali che dipendono dalla forma e da sottili differenze funzionali, ad es. sinapsi con le cosiddette bande sinaptiche (4) e complesse sinapsi dotate di bande (5). I prolungamenti nervosi possono produrre sinapsi anche „en passant“ (6), in cui esse presentano le tipiche membrane pre e postsinaptiche, oppure terminano liberamente (nel sistema nervoso vegetativo). Il loro terminale esterno non è più ricoperto di cellule gliali e veicolano i neurotrasmettitori alle cellule vicine su distanze maggiori. Anche la placca motrice è una forma speciale di sinapsi.

神経細胞の機能解剖

神経細胞は神経系の最小単位の器官です。

中枢神経と末梢神経は明確に区別されます。脳（大脳と小脳）と脊髄は、中枢神経系に属し、末梢神経系はすべての末梢への神経線維（例えば皮膚、筋、全ての内臓への線維）より構成されています。

末梢神経系は更に随意の感覚や運動を司る動物性（体性）神経系と、全ての内臓の調節を自動的に行う植物性（自律性）神経系から成ります。

脊髄は抹消と脳との間を媒介すると同時に、反射回路を用いて自律性と体性の神経を媒介します。神経系にはたくさんの役割があり、見る、聴く、嗅ぐ、感じるといった求心性の刺激の受信、刺激や情報の伝達、随意運動に伴う伝達などがあります。

この多様性は個々の神経細胞の形態と機能にも反映されています。

個々の細胞は、非常に変化に富み、特有の形状によりさまざまな機能を有しています。

神経膠細胞（グリア細胞）は神経細胞の代謝と伝導機能を助けます。

神経細胞の最も重要な要素は膜であり、神経細胞自体はその複雑な形態を維持することに重点が置かれています。

膜は神経細胞の主な役割を担っており、興奮期と非興奮期の変化はここで行われます。

この変化は電圧（mV）を測定することで判別でき、変化は静止、活動電位との差で生じることがわかります。

神経細胞と神経膠細胞（グリア細胞）の全体の構造はこの機能のために形成されています。

特定の神経膠細胞（星状膠細胞）は毛細血管から神経細胞へ伝達物質をわたします。（図C40/1, f）

脳や脊髄にある非常に緻密な毛細血管から神経細胞に伝達されるものはここで全てコントロールされています。

他のグリア細胞は神経鞘を伴った神経細胞を囲んでいます。（中枢神経系の希突起神経膠細胞C40/2, 末梢神経系のシュワン細胞C40/3）

末梢神経終末の細胞を囲むグリア細胞もあります。（終末グリア 図C40/4, b）

C40/1 神経細胞

神経細胞は核を含む神経細胞体（核周部）と無数の神経突起から成ります。神経突起は信号を受け取り神経細胞体にその情報を送る樹状突起（複数本）と次の神経細胞に情報を伝える軸索（基本的には1本のみ）に分かれます。

神経細胞体を解剖図で見ると（a）ミトコンドリア、（b）小胞体、（c）ゴルジ体、（d）細胞骨格を作る無数の繊維など、多くの構造が観察できます。

ゴルジ体と小胞体は、神経細胞の膜の形成や再生に関わっています。

このパートでは、張りめぐらされた神経線維のネットワークや細胞骨格が観察でき、神経突起の特殊な形状、無数のシナプス（e）が図中の左側に確認できます。

C40/2 中枢神経の中に見られるミエリン鞘（髄鞘）

神経細胞膜は主に神経からの刺激を伝導する役割を果たしています。神経突起の太さと伝導の速度には関連があり、太いほど伝導速度は速くなります。

適当な神経膠細胞がないと刺激は軸索上を連続的に伝導します（無脊椎動物の神経線維または、脊椎動物の自律神経系の細かい神経線維でのみ起きます）。

ミエリン鞘を被った神経線維は1mmから3mmほどの間隔で見られるランヴィエ絞輪（a）で伝導部位が断絶されます。このため刺激は絞輪から次の絞輪へと跳躍するので伝導速度が速くなります。

絞輪間（b）は脂肪を含んだ物質で構成されています（脂質、ミエリン、セファリン、リン脂質、レシチン、セレブロシドなど）。

非常に薄い脂蛋白の層と神経膠細胞の膜から構成され（c）絞輪（d）のところでとぎれています。

中枢神経では、希突起膠細胞（オリゴデンドロサイト）が軸索を覆い髄鞘が形成されています。希突起膠細胞の特徴としては、神経突起の複数箇所を覆い（e）、星状に分岐して様々な神経線維（f）に関与することがあげられます。

C40/3 末梢神経の神経膠細胞

中枢神経系の希突起膠細胞と同様、末梢神経系では神経膠細胞の一つであるシュワン細胞が神経突起を取り囲みミエリン鞘を形成します。

この場合も、ランヴィエ絞輪（a）と絞輪間（b）が形成されます。末梢神経系の場合、一つの神経膠細胞が1つのミエリン鞘部分を形成しています。

そのため1つの絞輪間に1つの神経膠細胞が現れます。ミエリン鞘と神経膠細胞の膜の構造は希突起膠細胞と同様です。

刺激は絞輪から絞輪へとジャンプして伝えられる（跳躍伝導）ので、ミエリン鞘を持たない神経と比べると刺激の伝導が早くなると考えられています。

末梢神経終末にある神経突起の一部分はかなり変化に富み、他の組織に到達するものもあります（自由神経終末（d））。それらは触覚小体や他の感覚器などのような複雑な末端を持つ終末膠細胞（終末グリア）につながります。

C40/4 運動終板

運動終板では特殊なシナプスが神経細胞から横紋筋線維へと刺激を伝達します。

運動終板の直前で神経突起はミエリン鞘（a）を失い、終末膠細胞だけで被われるだけになります（終末グリア（b））。

軸索の終末部は筋線維との接合部で拡がっており、無数のシナプス小胞、ミトコンドリア、様々な型の粒が存在します。この軸索の終末部から細胞膜や筋線維（シナプス後膜）へと刺激が伝達されます。

筋細胞の膜はひだ状の構造を形成し、表面積を広くしています（c）。無数の筋細胞の核（d）が筋線維の細胞質内にあり、運動終板をわずかに膨らませています。

この大きな接点を通じて、神経からの刺激が筋線維の興奮を引き起こします。神経終末のシナプス小胞（e）は伝達物質のアセチルコリンを含み、これが分泌されるとアセチルコリンがシナプス後膜のレセプターに結合して筋線維の興奮が促されます。

C40/5 シナプス

シナプスは細胞間接合体であり、特に神経細胞から他の神経細胞への刺激伝達に用いられます（1）。シナプスには電気シナプスと化学シナプスの2種類があります。

電気シナプスは直接、刺激を隣り合う細胞膜に伝達します（人間の神経系には非常に稀で、内耳の有毛細胞間または網膜の感覚細胞間で起こります）。

化学シナプスの場合、神経細胞は末端のところでボタン状の形に隆起しており、化学物質を介して刺激が伝達されます（図C40/1, e）。

刺激が神経細胞の細胞膜からボタン状の隆起にまで伝導されると、伝達物質をカプセル状に包み込んだシナプス小胞（a）が分泌されます。

この分泌は脱分極により引き起こされます。刺激が伝導され脱分極がおこると、一時的に細胞膜のカルシウムチャンネルが開かれます。カルシウム濃度は細胞の内側より外側の方が常に1000倍は高いためカルシウムは神経細胞内に流れ込み、細胞内のカルシウム濃度が高くなります。これにより伝達物質を含んだシナプス小胞が放出されます。

シナプス小胞はまず、シナプス前膜（c）に融合し、シナプス間隙（d）に伝達物質が放出され、最終的に伝達物質はシナプス後膜に取り込まれます。

伝達物質は特殊な受容体（e）と融合しカルシウムチャンネルを開き、ナトリウムイオンが流れこむことによって隣接する神経細胞の特定の細胞膜を脱分極させます。連鎖的に次のチャンネルが開き、周りの細胞の細胞膜全体に脱分極が広がります。脱分極が起こると伝達物質は分解されるか、またはシナプス前膜のボタン状の隆起に再度吸収されます。

シナプスはこの過程を非常に短時間で行わなくてはならないため（1秒間に数回）、この部位の代謝活動は高くなります。これを示すように、シナプスでは代謝が高いことをあらわすミトコンドリア（f）や小胞体（g）が確認されます。

シナプスの細胞骨格のフィラメント（ニューロフィラメント（h））は核周部とシナプスの間の伝達物質や膜成分の通り道ともなります（軸索輸送）。

シナプス小胞の形状とシナプス前膜、シナプス後膜の厚みの違いにより、2タイプのシナプスに分けることができます（グレイⅠ型シナプス、グレイⅡ型シナプス）。

グレイⅠ型シナプスは丸い小胞、幅30nmほどの間隙をもち、シナプス後膜がシナプス前膜より厚みがあります。（2）

グレイⅡ型シナプスの間隙は幅20nmほどで、シナプス後膜には狭い肥厚部があり、シナプス小胞が分かれて存在しています。（3）。

グレイⅠ型シナプスは興奮性シナプス、グレイⅡ型シナプスは抑制性シナプスと呼ばれています。抑制性シナプスは細胞の興奮状態を抑制します。

この基本タイプ以外に特殊な形状をしたシナプスもあります。例）リボンシナプス（4）、複雑な形状のシナプス（5）

軸索の末端が軸索誘導により伸張すると、軸索末端と標的との間にシナプスが形成されます（6）。シナプスはシナプス前膜、シナプス後膜、植物性神経系では自由神経終末で形成されます。

神経突起の終末部分はグリア細胞には覆われておらず、伝達物質を隣り合う細胞へ伝えます。運動終板もシナプス特有の型です。

Функциональная анатомия нейронов

Нейроны – это наименьшие независимые элементы органов нервной системы. Обычно проводят различие между центральной и периферической нервной системой: головной мозг (мозг и мозжечок) и спинной мозг принадлежат центральной нервной системе. Периферическая нервная система состоит из всех нервных волокон на периферии (например, в коже, мышцах и всех висцеральных органах). Разграничение делается между доступной сознанию (воле или чувствам), или соматической нервной системой, и вегетативной (автономной) нервной системой, которая автоматически, без сознательного намерения, контролирует внутренние органы. Взаимодействие между периферией и головным мозгом, а также между вегетативной и соматической нервной системой опосредуется спинным мозгом с помощью рефлекторных циклов.

Нервная система решает много задач, от усвоения импульсов (зрение, слух, запахи, осязание и т.д.), передачи импульсов или информации, обработки и хранения информации до ответа на поступающую информацию в соответствии с шаблонами, которые приводят к волевым движениям. Это разнообразие также отражает форму и функционирование отдельных нейронов. Отдельная клетка – это очень разнообразная, многофункциональная структура с множеством специальных форм.

Дополнительные клетки (глиальные клетки) должны помогать нейронам выполнять их метаболические и транспортные функции. Сами по себе нейроны в целом сосредоточены на поддержании своей крайне сложной структуры, самым важным фактором которой являются поверхности, т.е. мембраны. Это происходит потому, что мембраны выполняют главную задачу нейронов: здесь происходят изменения состояния мембраны от возбужденного до невозбужденного. Это изменение можно определить измерением напряжения (в мВ). Различают потенциал покоя и потенциал действия. Все строение нейрона и глиальной клетки основано на этой функции. Так, определенные глиальные клетки (астроциты) специализируются на транспорте веществ из капилляров (f на рис. C40/1) в направлении нейрона. Таким образом, из очень плотной сети капилляров головного и спинного мозга к нейронам ничего не транспортируется бесконтрольно. Другие глиальные клетки специализируются на окружении нервных клеток изолирующей оболочкой (олигодендроглия в центральной нервной системе, C40/2, или шванновские клетки в периферической нервной системе, C40/3). Другие глиальные клетки окружают терминальные клетки нервных окончаний на периферии (телоглия, b на рис. C40/4).

C40/1 Нейрон

Нейрон разделяют на центральную клеточную массу, сгруппированную вокруг ядра (перикарион) и многочисленные нервные отростки. Нервные отростки делятся на дендриты, которые передают информацию к перикариону, и аксон (один в клетке). Он передает информацию следующему нейрону. Если посмотреть на перикарион (открытый срез на рисунке), можно обнаружить множество характерных особенностей, которые представлены во всех клетках млекопитающих: митохондрии (a), эндоплазматический ретикулум (b), аппарат Гольджи (c) и множество фибрилл и цитоскелет (d). Аппарат Гольджи и эндоплазматический ретикулум в нейроне особенно выражены, поскольку и тот, и другой вовлечены в продуцирование и восстановление огромной поверхности мембраны нейрона. Хорошо структурированную сеть волокон, структурных единиц скелета клетки, можно найти во множестве ответвлений. Кроме того, в левой части рисунка можно увидеть специальные образования отростков, т.е. многочисленные синапсы (e).

C40/2 Миелиновая оболочка центральной нервной системы

Мембрана нейрона ответственна в основном за процесс распространения нервного импульса. Кроме того, существует связь между толщиной нервного отростка и скоростью передачи. Чем толще нервный отросток, тем выше скорость передачи. Без соответствующих вспомогательных клеток (специализированных глиальных клеток) передача импульса продолжительна (наблюдается только у беспозвоночных или в тонких волокнах вегетативной нервной системы позвоночных). Для того чтобы увеличить скорость передачи, формируются нервные волокна с миелиновой оболочкой, которая прерывается структурами, которые известны как кольца сужения (истончения миелиновой оболочки) (а) (перехват Ранвье), с интервалами от 1 мм до 3 мм. Это вызывает значительное ускорение передачи импульсов без большого увеличения диаметра нервных отростков. Импульс прыгает от одного кольца сужения к другому, и передача ускоряется. Изоляция между отдельными кольцами сужения (b) возникает благодаря жиродержащим субстанциям (липидам, миелину, кефалину, фосфатидам, лецитину, цереброзидам и т.д.). Образуется однородный слой, состоящий из крайне тонкой липопротеиновой пластинки и мембраны глиальных клеток (с). Данная спиральная изоляция прерывается в кольцах сужения (d).

В центральной нервной системе задачу изоляции нервных отростков берет на себя олигодендроглия. Отличительная черта олигодендроглии в том, что она может изолировать несколько сегментов между истончениями (участки между перехватами Ранвье) в одно и то же время (е) благодаря нескольким отросткам звездчатой формы, также она может обслуживать различные нервные волокна (f).

C40/3 Глия периферических нейронов

Также, как и олигодендроглия в центральной нервной системе, шванновские клетки в периферической нервной системе образуют миелиновую оболочку для изоляции нервных отростков. В данном случае также формируются истончения (а) и участки между перехватами Ранвье (b). Отличительное свойство глиальных клеток периферической нервной системы состоит в том, что каждая клетка снабжает только один сегмент. Таким образом, в месте перехвата происходит смена глиальной клетки на другую. Структура, образованная миелиновыми оболочками и мембранами глиальных клеток (с), идентична состоящей из клеток олигодендроглии. Изменение изолированной части больше или меньше свободной мембраны означает, что импульс «перескакивает» от истончения к истончению (сальтаторная передача импульса). Это вызывает значительное увеличение скорости передачи импульса.

Разделение нервных отростков на концы периферических нервов может сильно варьировать. Они могут свободно оканчиваться в другой ткани (свободные нервные окончания) (d). Часто они объединяются в сложных окончаниях конечной глии (телоглии), таких как осязательные тельца или другие сложные органы чувств.

C40/4 Концевая пластинка мотонейрона

В концевой пластинке мотонейрона, специальном типе синапса, импульсы передаются от нервной клетки к поперечнополосатому волокну скелетной мышцы. Непосредственно перед концевой пластинкой мотонейрона нервный отросток теряет свою миелиновую оболочку (а) и остается покрытым только самой глиальной клеткой (телоглия, b). Конечный сегмент нейрона в точке контакта с мышечным волокном расширяется и образует множество синаптических пузырьков, митохондрий и гранул различных типов. Конечные веточки нервного отростка скапливаются в мембране клетки, мышечное волокно (постсинаптическая мембрана) находится близко к ней. Мембрана мышечной клетки образует множество складок для увеличения площади поверхности (с). В цитоплазме мышечных волокон находится количество поразительно большое количество ядер мышечной клетки (d), обуславливая незначительное выпячивание конечной пластинки. Это приводит к гигантской площади контакта, на которой единственный нервный импульс может инициировать возбуждение мышечных волокон. Синаптические пузырьки (е) в нервных окончаниях содержат медиатора ацетилхолин, который связывается с рецепторами постсинаптической мембраны в соответствии с механизмом в синапсах и, таким образом, вызывает новое возбуждение мышечных волокон.

C40/5 Синапс

Синапс – это контактная структура, которая специально служит для передачи импульсов и используется для того, чтобы один нерв «иннервировал» другой (1). Существуют электрические и химические синапсы. В электрических синапсах импульс напрямую передается на мембрану соседней клетки (очень редко встречается в нервной системе человека, между волосковыми сенсорными клетками внутреннего уха или между сенсорными клетками сетчатки) (см. рисунки). В случае химических синапсов на конечной веточке нервной клетки формируются утолщения (бляшки, рис. C40/1, e), которые специализируются на передаче информации. В случае химических синапсов импульс передается не напрямую, а посредством определенных химических веществ. Импульс, который передается от нейрона вдоль мембраны клетки на утолщение, преобразуется в коррелирующее со временем высвобождение передающих веществ, которые содержатся внутри пузырчатых структур (синаптические пузырьки) (a). Нервный импульс, деполяризация, временно открывает контролируемые напряжением кальциевые каналы в мембране, которые находятся перед фактическим местом передачи. Так как концентрация кальция снаружи клетки всегда в 1000 раз больше, чем внутри, кальций поступает в нейрон и увеличивающаяся концентрация кальция запускает высвобождение передающих веществ из пузырьков. Сначала пузырьки сливаются с пресинаптической мембраной (c), затем в синаптическую щель высвобождается медиатор (d), и в конце концов он захватывается постсинаптической мембраной. Передающие вещества связываются со специфическими рецепторами (e) и открывают связанные каналы, которые деполяризуют мембрану соседних клеток в ограниченной области путем поступления внутрь ионов натрия. Цепная реакция дальше открывает соседние каналы и возникает самораспространяющаяся деполяризация, которая охватывает всю плазматическую мембрану следующей клетки. После деполяризации передающие вещества либо подвергаются расщеплению, либо их опята захватывает пресинаптическая бляшка (b).

Так как этот процесс должен происходить в синапсе часто за очень малое время (несколько раз в секунду), он является участком высокой метаболической активности. Таким образом, здесь находят митохондрии (f), которые отображают высокий энергетический метаболизм, а также ответвления эндоплазматического ретикула (g), показатели высокого уровня метаболизма веществ. Филаменты цитоскелета в синапсе (нейрофиламенты) (h) являются направляющими структурами для аксонального транспорта, которые используются как пути для медиаторов и компонентов мембран от перикариона к синапсу.

Различают два типа синапсов (Gray I и II) в зависимости от типа синаптических пузырьков и толщины пресинаптической и постсинаптической мембраны. В синапсах типа Gray I пузырьки светлые, круглые, ширина щели 30 нм, и постсинаптическая мембрана толще, чем пресинаптическая (2). В синапсах типа Gray II ширина щели 20 нм, постсинаптическая мембрана узкая, есть несколько активных полей, часто расположенных близко друг к другу (3). Синапсы типа Gray I рассматриваются как возбуждающие синапсы, а типа Gray II – как тормозящие синапсы. Тормозные синапсы подавляют готовность следующей клетки к возбуждению.

Кроме этих основных типов существуют специальные виды, основанные на форме и тонкой дифференциации функции: например, синапсы с синаптическими тяжами (4), сложные синапсы с тяжами (5). Нервные отростки могут формировать синапсы на ходу („en passant“) (6). У них либо есть типичные пресинаптические и постсинаптические мембраны, либо имеются свободные окончания (в вегетативной нервной системе). Они больше не окружены глиальными клетками на внешнем окончании и передают медиаторы соседним клеткам на большее расстояние („a distance“). Концевая пластинка мотонейрона также является особой формой синапса.

神经细胞的功能性解剖

神经细胞是神经系统器官的最小的独立单位。在中枢神经系统和周围神经系统之间通常有一个明显的差异。脑（大脑和小脑）和脊髓属于中枢神经系统。周围性神经包括所有的外周神经纤维（例如，存在于如皮肤，肌肉以及所有内脏器官中）。在受意识（意愿和感觉）影响或者躯体神经系统，与植物（自主）神经系统之间存在着差异，后者是自动的，没有主观意识对其内部器官进行控制。脊髓利用反射环来调节脑和周围神经系统，也同样对植物神经系统和躯体神经系统进行调解。神经系统有许多任务，包括通过冲动和信息的传导，来进行冲动的摄取（视、听、嗅和感觉等等）、信息的处理和储存，以便通过相应的模式对进入的信息进行应答，最终产生主观意愿的行为。这种变化也会反应在单个神经细胞的形状和功能上面。单个的细胞是极端变化的、复合功能的结构，有着许多特殊的结构。它是如此高度专门化，因此它单个存在的时候是没有活性的。它甚至没有再生的能力（例如，在皮肤细胞中所保持的这种特性）。这就意味着，在神经系统充分发育之后，如果神经细胞死亡了，它是不可能被完全代替。只有周围神经进程可以再生，其生长速率最大为1mm/天。

辅助细胞（神经胶质细胞）必须帮助神经细胞完成其代谢和运输功能。神经细胞自身则完全集中在维持其极端复杂的结构，以及存在于表面的最为重要的因子上，例如膜上面。这是因为细胞膜承担了神经细胞的主要任务：膜的兴奋和非兴奋的变化是在这里完成。这种变化可以同过测量张力（mV）来确定。在休息和运动的潜力上存在着差异。神经细胞和神经胶质细胞的完整的结构是以此功能为基础的。因此，某种神经胶质细胞（星形神经胶质）（C40/1）专门负责沿神经细胞方向，运送来自毛细血管的物质。因此，来自脑和脊髓的、到神经细胞的非常密集的毛细血管的一切都在控制之中。其他的胶质细胞则负责带有绝缘壳的周围神经细胞（在中枢神经系统是少突胶质细胞，C40/2，在周围神经系统是雪旺氏胶质细胞，C40/3）。其它的胶质细胞则围绕在周围神经末端的终末细胞周围（在图C40/4中的b）。

C40/1 神经细胞的功能性解剖

一个神经细胞被分为细胞核周围的中央细胞团块（核周体）和众多的神经突出。神经突出可以分为树突和轴突（只呈现一个），树突可以将信息传递到核周体。然后将信息传递到下一个神经细胞。如果对核周体进行观察（在图中被剖开），就可以观察到，在每一个哺乳动物细胞中存在的许多的特征物质：线粒体（a）、内质网（b）、高尔基复合体（c）、大量的细胞骨架纤维（d）。高尔基复合体和内质网在神经细胞中特别的显著，因为它们与大量的神经细胞的膜表面的产生和再生有关。在许多分支中，都可以看到一个细胞骨架的亚单位，它是一个结构良好的纤维网。另外，在左手一侧的图中可以看到特殊分支的形成，例如大量的突触。

C40/2 中枢神经系统的髓鞘

神经细胞的膜原则上是负责神经冲动的播散过程。此外，神经突出的厚度和传导速度上也存在一定联系。神经突出越厚，冲动传导的速度越快。没有适合的辅助细胞（专门的胶质细胞），神经传导是继续的（只发生在无脊椎动物，或者脊椎动物的植物神经系统的薄纤维中）。为了增加传导的速度，带有髓鞘的神经纤维会被一个已知的痉挛性狭窄环（a）（郎飞氏结）所打断，每个间隔是1到3个毫米。这样，不需要增加神经突出的直径，就可以引起传导的速度得到极大的加速。冲动从一个狭窄环跳到下一个狭窄环，传导速度变得更快了。两个独立的狭窄环之间的绝缘部分（b）是通过含有脂肪的物质（脂质、髓磷脂、脑磷脂、磷脂、卵磷脂、脑苷脂等等）来实现的。胶质细胞会出现一层均匀的极薄的脂质蛋白围褶和膜（c）。此螺旋形的绝缘部分在狭窄环的地方被打断（d）。

在中枢神经系统中，少突神经胶质细胞承担着绝缘的任务。它们对于神经细胞的新陈代谢也很重要。少突神经胶质细胞的特点在于它能够同时绝缘狭窄环间的几个节（e）（环间节段），因为它具有几个星形的分支，它们还能够为各种神经纤维服务（f）。

C40/3 周围神经细胞的神经营胶质

与中枢神经系统的少突胶质细胞有着同样作用，在周围神经系统中，来自髓鞘的雪旺氏细胞也可以绝缘神经突出，它也会形成狭窄环（a）以及环间节段（b）。周围神经系统的胶质细胞的特点是，每一个细胞只能供应一个环间节段。因此，在收缩期间就另一个胶质细胞就会发生改变。由髓鞘和胶质细胞膜所构成的结构和少突神经胶质细胞相同。从一个绝缘节到一个更多或者更少的无膜部分（c）的变化意味着从一个缩窄到另一个缩窄的跳跃（跳跃性冲动传导）。这就引起了传导速度极大的加快。

在周围神经末端神经突出的再细分，可能会有很大的变化。它们可以自由的终结于其他的组织（无神经末端）（d）。它们经常会整合为末端胶质细胞的复杂末端（神经胶质被膜），例如触觉小体或其他复杂的感觉器官。

C40/4 运动终板

运动终板，是一种特殊类型的突触，冲动可以从神经细胞传导到条纹的骨骼肌纤维。在运动终板前，神经突出会失去它的髓鞘（a），并且只能够由胶质细胞自身形成其髓鞘（神经胶质被膜，b）。神经细胞的末端在其肌纤维的接触点变得宽大，重新形成许多突触小泡、线粒体、以及许多类型的颗粒。神经突出的末端分支会在细胞膜上聚集，肌纤维在此与其靠近（突触后膜）。在朝向表面扩大的部分，肌肉的细胞膜形成了一个密集的折叠装置（c），在肌纤维的细胞浆中，发现了惊人数量的肌细胞的细胞核（d），引起了终板轻微的膨胀。这就导致了一个巨大接触点，在此处一个单独的冲动就可以引发肌纤维的兴奋。神经末端的突触小泡（e）包含有递质乙酰胆碱，它能够根据突触的结构，与突触后膜的受体结合，从那里重新引起肌纤维的兴奋。

C40/5 突触

突触是一个特殊的接触结构，它是用来传导神经冲动，从一个神经细胞到另一个“神经支配的”细胞（1）。有电突触和化学突触两种，电突触直接传到冲动给一个邻近的细胞膜（在人类的神经系统中很少见，在内耳的毛细胞之间或者在视网膜的感觉细胞之间存在）（图）。就化学突触而言，神经细胞在其末端的分支形成“纽扣样”的肿胀（小结，图C40/1,e），它专门用于信息的传导。化学突触是通过某种化学物质进行间接的传导，神经冲动是从神经细胞沿着细胞膜传导到一个纽扣样的肿胀处，然后转化为与时间相关的递质的释放，这种物质是被包裹在小泡结构之中的（突触小泡）（a）。

神经冲动，去极化，临时的开放了膜上的张力控制的钙离子通道，膜是处于实际的传递位点前面。细胞外面的钙离子浓度要高于细胞内的1000多倍，钙离子流入神经细胞内，增加的钙离子浓度触发了带有递质的小泡的释放。小泡首次与突触前膜（c）融合，递质被释放入突触裂隙（d），最后被突触后膜所摄取，递质与特殊的受体（e）相结合，开放配对的通道，这会使得钠离子流入，从而导致相邻细胞在有限区域内去极化。一连串的反应会进一步开放相邻的通道，发生自我扩张的去极化，这会扩张到下一个细胞的整个胞浆膜。

在去极化之后，递质或者是进行降解，或者是被突触前膜的纽扣样肿胀处再次吸收（b）。

作为神经递质，必须在很短的时间内完成这一过程（每秒几次），这是一个高代谢活动的位点。因此，会在此发现线粒体（f），它代表着一个高能量代谢，和内质网（g）的分支一样，是一个高的物质代谢的标志。在突触上，细胞骨架的细丝（神经细丝，h）对于轴突运输来说是一个向导性的结构，它可以用来作为一个递质的通路，和从核周体到突触的膜构件。

在两种突触（Gray I 和 II）之间存在着截然不同的差异，这取决于突触小泡和突触前膜和后膜的厚度，Gray I 型突触为浅的、圆的小泡，裂隙的宽度测量大约为30nm，突触后膜与突触前膜相比更厚（2）。Gray II 型突触裂隙的宽度大约为20nm，狭窄的突触后膜变厚，几个活跃的区域经常是位于彼此的旁边（3）。Gray I 型突触被认为是兴奋性突触，而Gray II 型突触被认为是抑制性突触。抑制性突触会抑制下一个细胞的兴奋状态。

除了这些基本的类型，还有根据其形状和良好功能来区分的特殊类型的突触：例如带有突触束的突触（4）、带有束的复杂突触（5）。当顺便时（附带的）（6），神经突出可以看成是神经突触。它们既具有典型的突触前膜和后膜，也有游离的末端（在植物神经系统）。在其外部的末端，它们不再被胶质细胞所包围，能够将递质传递到更远距离的相邻细胞（“远距离”）。运动终板也是一种特殊类型的突触。

Also available from 3B Scientific®:

1000238 Spinal Cord with Nerve Endings

Ebenfalls bei 3B Scientific® erhältlich:

1000238 Rückenmark mit Nervenenden

Tambien disponible en 3B Scientific®:

1000238 Médula espinal con terminaciones nerviosas

Egalement disponible auprès de 3B Scientific® :

1000238 Moelle épinière avec terminaisons nerveuses

Também disponível na 3B Scientific®:

1000238 Medula espinhal com terminações nervosas

Disponibile anche presso 3B Scientific®:

1000238 Midollo spinale con terminazioni nervose

3B Scientific®では他にも他のモデルをご用意しております

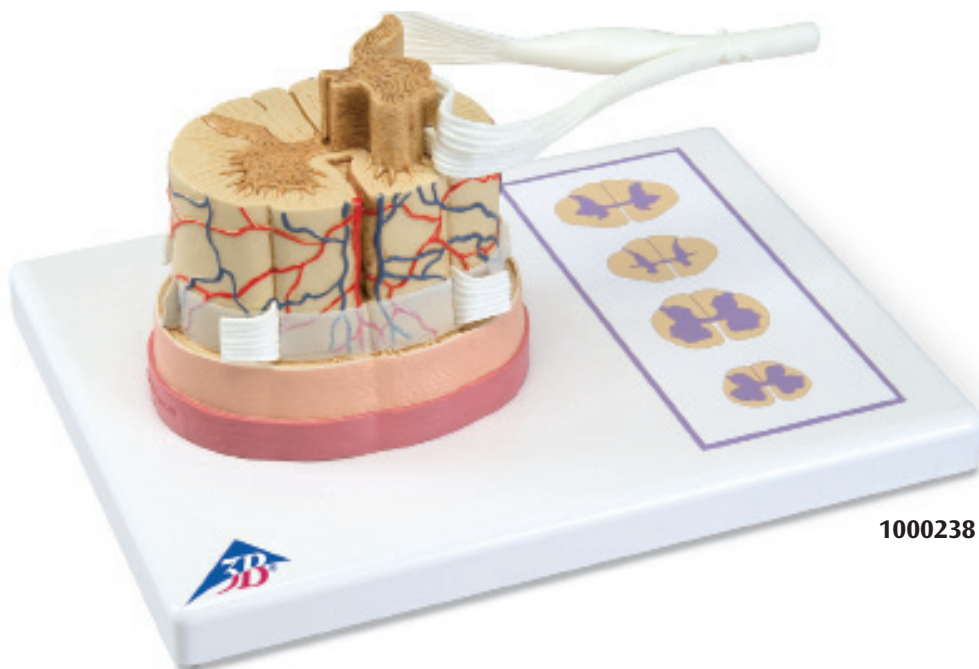
1000238 脊髓と末梢神経モデル

в ассортимент продуктов 3B Scientific® также входят

Спинальный мозг с нервными окончаниями

您可以从3B Scientific®处购买

脊髓与末梢神经模型



1000238

Also available from 3B Scientific®:

1000231 Nervous System, 1/2 life-size

Ebenfalls bei 3B Scientific® erhältlich:

1000231 Nervensystem, 1/2 natürliche Größe

Tambien disponible en 3B Scientific®:

1000231 El Sistema Nervioso, 1/2 de su tamaño natural

Egalement disponible auprès de 3B Scientific® :

1000231 Système nerveux, échelle 1/2

Também disponível na 3B Scientific®:

1000231 Sistema nervoso, 1/2 do tamanho natural

Disponibile anche presso 3B Scientific®:

1000231 Sistema nervoso, metà della grandezza naturale

3B Scientific®では他にも他のモデルをご用意しております

1000231 神経系 1/2 実物大

в ассортимент продуктов 3B Scientific® также входят
Нервная система, 1/2 натуральной величины

您可以从3B Scientific®处购买
神经系统模型，实物的1/2

1000231



Also available from 3B Scientific®:

Charts

Ebenfalls bei 3B Scientific® erhältlich:

Lehrtafeln

Tambien disponible en 3B Scientific®:

Láminas

Egalement disponible auprès de 3B Scientific® :

Planches

Também disponível na 3B Scientific®:

Pôsteres

Disponibile anche presso 3B Scientific®:

Tavole didattiche

3B Scientific®では他にも他のモデルをご用意しております

医学チャート

в ассортимент продуктов 3B Scientific® также входят
Плакаты

您可以从3B Scientific®处购买
挂图

