



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

BIOMECHANICS

Motor Control System of Humans

JAN ŠVEC

**Department of Experimental Physics, Faculty of Science,
Palacký University Olomouc, CZ**

Univerzita Palackého jako komplexní vzdělávací instituce

CZ.02.2.69/0.0/0.0/16_015/0002337

BIOMECHANIKA

Řídící pohybový systém člověka

JAN ŠVEC

**Katedra experimentální fyziky, Př.F.,
Univerzita Palackého v Olomouci**

Řídící pohybový systém člověka

skripta M. Janura, FTK UP:

Úvod do biomechaniky pohybového systému člověka

Motor Control System of Humans

Literature: M. Janura, FTK UP:

Introduction to Biomechanics of human locomotor system (Úvod do biomechaniky pohybového systému člověka)

<http://aleph.vkol.cz/pub/svk01/00067/94/000679439.htm>

Opakování: Pohybový systém člověka

Umožňuje pohyb

Základní podsystemy:

- Řídící

- Svalový

**- Kosterní (včetně mezilehlých prvků) -
pasivní**

- Energetický

V biomechanice je málo informací (vynecháván)

Repetition: Motion system of humans

Subsystems allowing movement :

- Motor Control**
- Muscles**
- Skeleton (bones and connecting elements) - passive**
- Energy supply**

Not much information in biomechanics (usually omitted)

Opakování: Pohybový systém člověka

Umožňuje pohyb

Základní podsystémy:

- Řídící

- Svalový

**- Kosterní (včetně mezilehlých prvků) -
pasivní**

Probráno

- Energetický

Repetition: Motion system of humans

Subsystems allowing movement :

- Motor Control

- Muscles

- Skeleton (bones and connecting elements) - passive

- Energy supply

Already gone through

Opakování: Pohybový systém člověka

Umožňuje pohyb

Základní podsystemy:

- Řídící

- Svalový

- Kosterní (včetně mezilehlých prvků) -
pasivní

- Energetický

Repetition: Motion system of humans

Subsystems allowing movement :

- Motor Control

- Muscles

- Skeleton (bones and connecting elements) - passive

- Energy supply

ŘÍDÍCÍ SYSTÉM (angl. Motor Control) (zajišťuje nervová soustava) :

Řídící systém - rozhodující subsystém, který řídí optimální provedení pohybu pomocí koordinace síly svalů

Základní stavební jednotkou nervové soustavy je **neuron**.

Tři základní funkce neuronu:

- a) recepce informace
- b) „vyhodnocení“ vstupního signálu pro určení možnosti jeho přenosu
- c) přenos signálu

MOTOR CONTROL SYSTEM (Operating via nervous system):

Motor Control System – a critical subsystem that controls optimal execution of movement by coordinating muscle activity

The basic building block of the nervous system is a **neuron**.

Neuron has three basic functions:

- a) reception of information
- b) "evaluation" of the input signal to determine the possibility of its transmission
- c) signal transfer

Funkční dělení neuronu:

a) aferentní – senzorické

Předávají informace ze sensorů – receptorů (vnějšího i vnitřního prostředí) do centrální nervové soustavy (CNS). Axon aferentního neuronu vstupuje do zadních rohů nebo zadních provazců míšních nebo je veden příslušnými hlavovými nervy (nervy vedoucí do mozku).

c) eferentní – motorické (motoneurony)

Přenášejí informace z CNS do výkonného efektoru – svalu. Jejich axony vystupují z předních rohů míšních nebo vlákno probíhá v motorických hlavových nervech. Tvoří dráhu, kterou musí proběhnout všechny vzruchy, bez ohledu na svůj původ, jestliže mají zapůsobit na svalová vlákna, ke kterým vedou.

b) interneurony – vmezeřené

Tvoří 99 % všech neuronů. Jejich funkce je velice rozmanitá. Jsou součástí reflexních oblouků, které tvoří pohybové programy; vytvářejí spojení mezi aferentním a eferentním neuronem; mohou působit tlumivě na alfa-motoneurony (Renshawovy buňky); vytvářejí spojení mezi segmenty (např. pravá a levá strana), apod.

Functional classification of neurons:

a) afferent – sensory neurons

They transmit information from sensors - receptors (in external and internal environments) to central nervous system (CNS). Axons of afferent neurons enter the spinal cord from the posterior side or enter the cranial nerves (nerves leading to the brain).

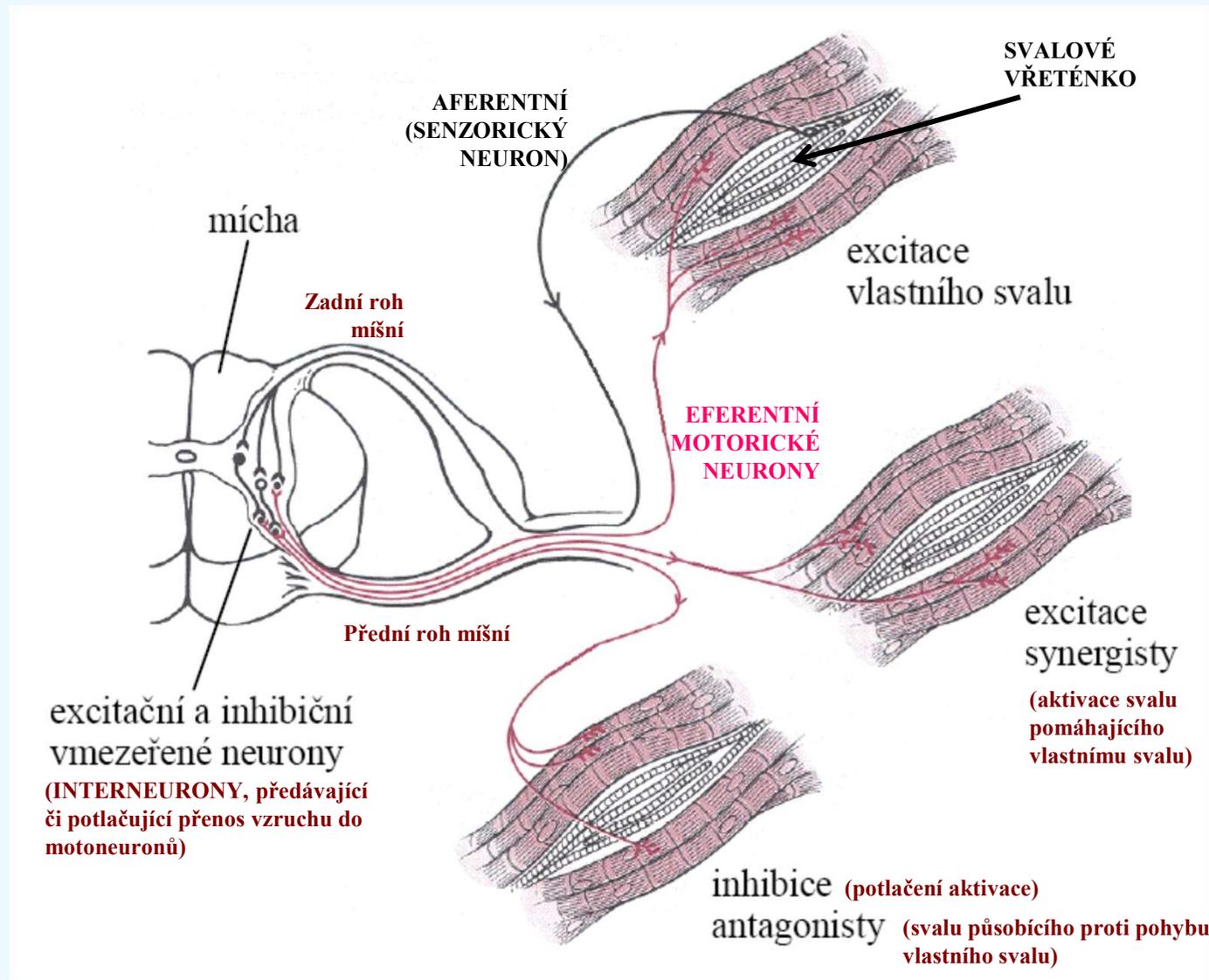
c) efferent - motor neurons

They transmit information from the CNS to the effector executive muscle. Their axons come out of the anterior part of spinal cord or from the cranial nerves. They form the paths for all the impulses, regardless of their origin, in order to activate the connected muscle fibers.

b) interneurons – intermediate neurons

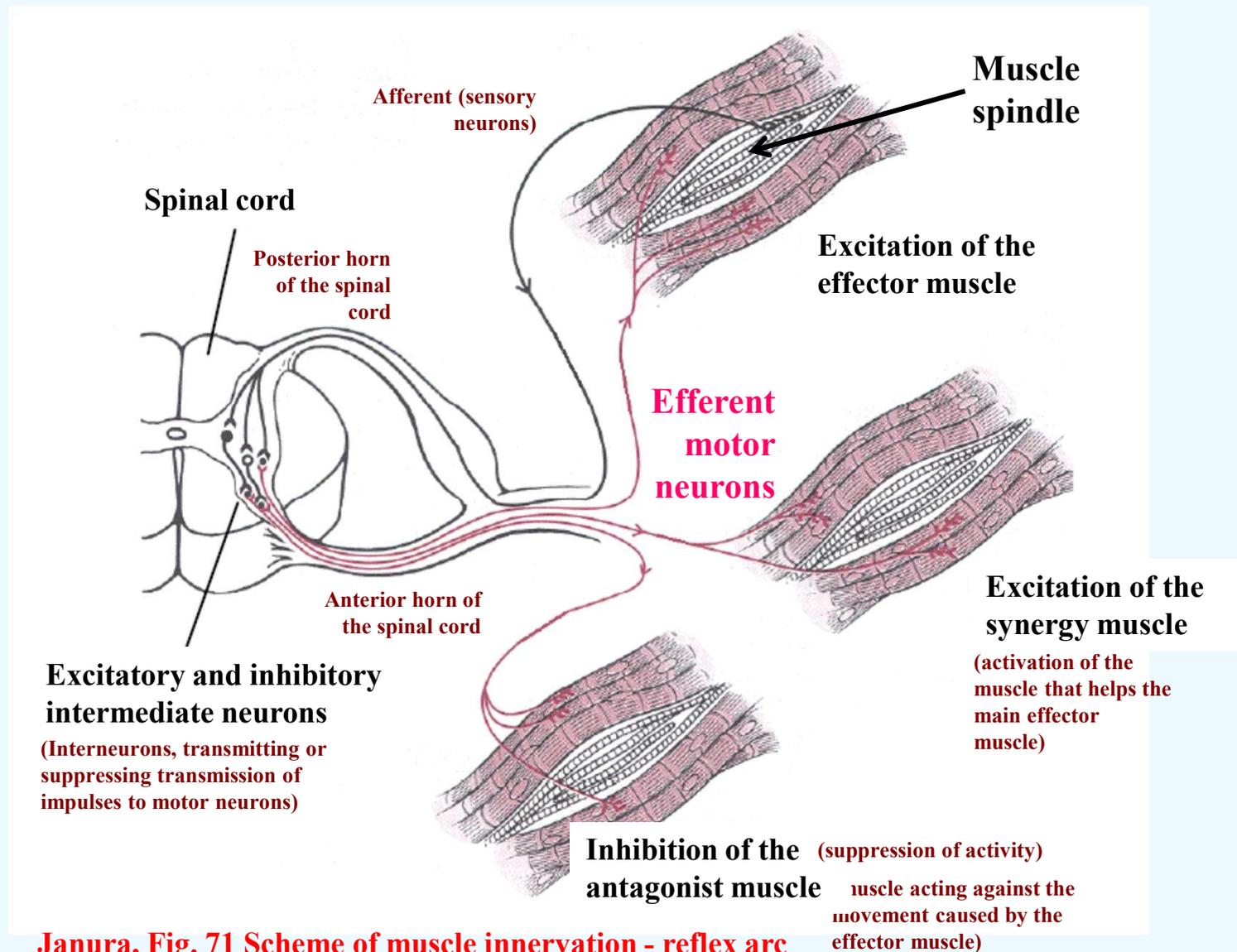
99% of all neurons. Their function is very diverse. They take part in reflex arcs responsible for physical activity programs; form connections between afferent and efferent neuron; can suppress activity of alpha motoneurons (Renshaw cells); form connections between segments (eg. right and left side), etc.

3 typy neuronů (senzorické, interneurony a motoneurony) zapojené do reflexního oblouku:



Janura, Obr. 71 Schéma inervace svalu – reflexní oblouk (upraveno podle Hamill & Knutzen, 1995)

Three types of neurons (sensory, motor neurons and interneurons) involved in the reflex arc:



Janura, Fig. 71 Scheme of muscle innervation - reflex arc (adapted from Hamill & Knutzen, 1995)

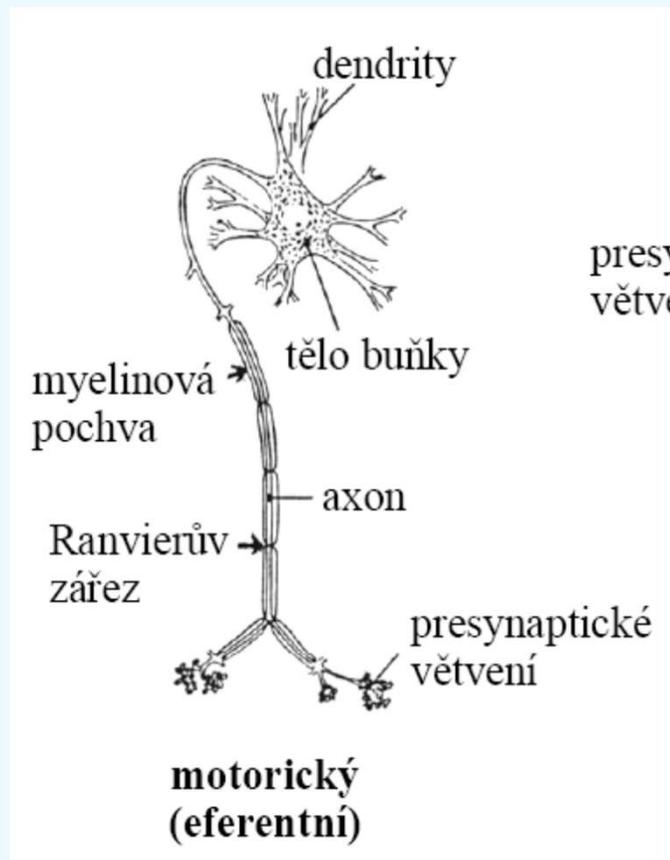
Morfologie motoneuronu (obr. 69):

Tělo buňky (soma) - umístěna v mozku nebo v šedé hmotě míšni

Výběžky: *axon* - dlouhý i přes 100 cm, odstředivé vedení vzruchu (od těla buňky)

dendrity - vedou vzruchy do těla buňky (dostředivé vedení)

Presynaptické větvení (terminál): větvení pro propojení s dalšími buňkami

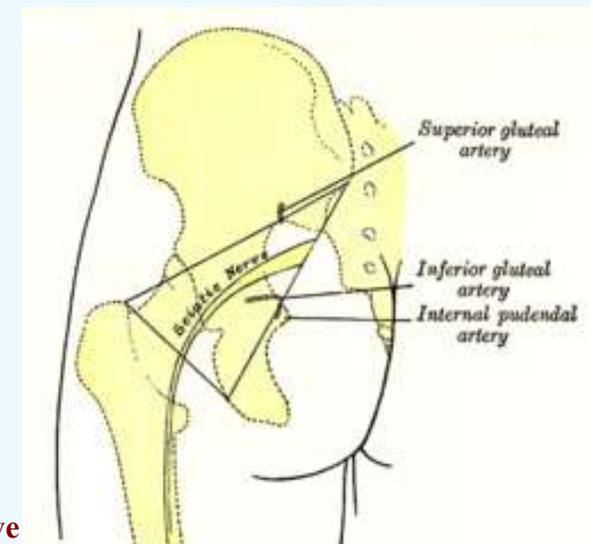


Nerv:

Soubor axonů obalených vazivovou tkání.

Nejdelší neuron:

Běží v sedacím nervu (*nervus ischiadicus*, **sciatic nerve**, also known as the **ischiatric nerve**) od dolní části páteře k palci u nohy.

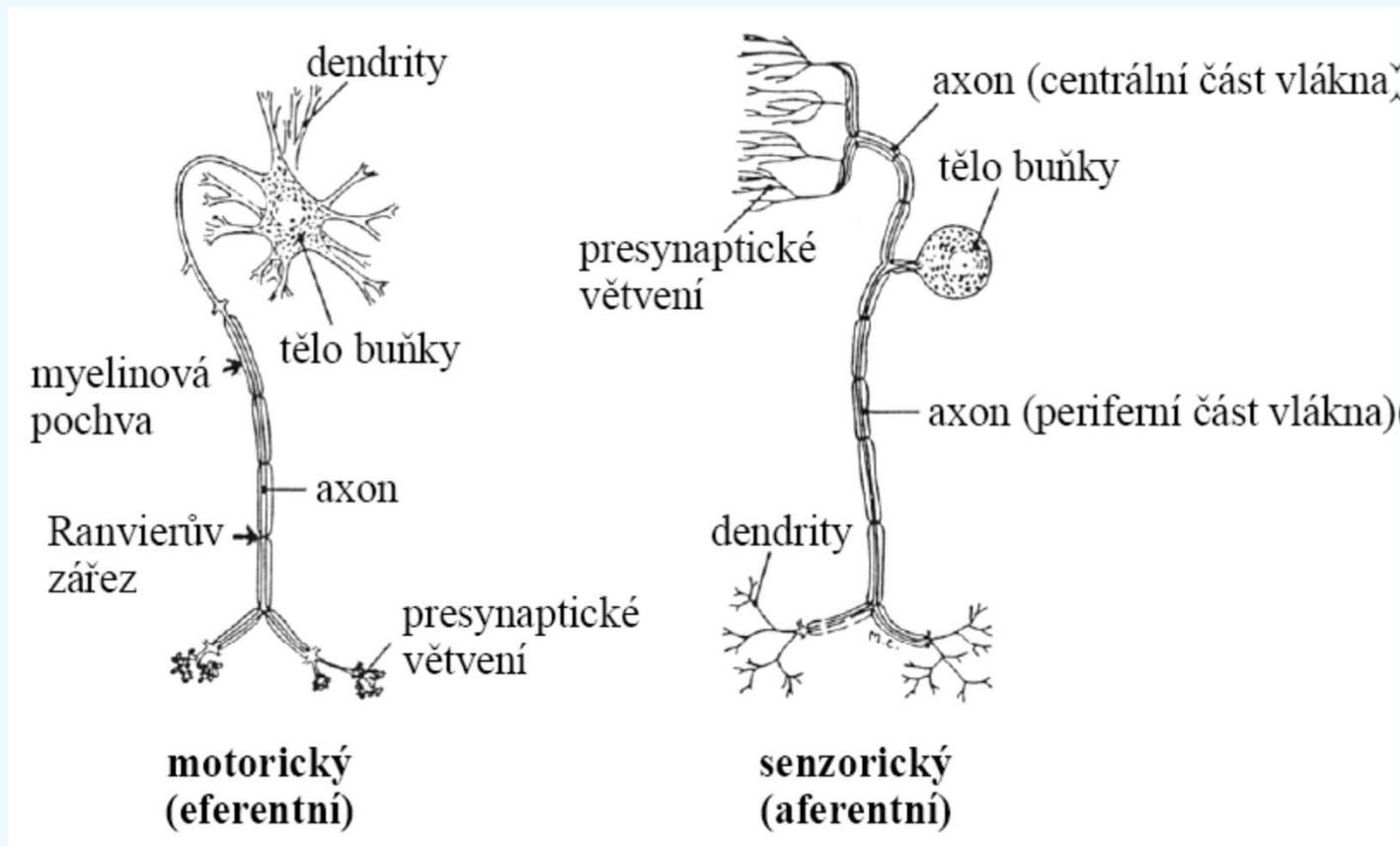


Morfologie neuronu (obr. 69):

Synapse – funkční spojení mezi membránami dvou buněk, z nichž alespoň jedna je neuron.

Pro řízení činnosti kosterního svalstva mají význam tlumivé a budivé synapse.

Každý motoneuron předních rohů míšních má asi 6 000 synapsí.



Janura, Obr. 69 Základní části motorického a senzorického neuronu

Neuron Morphology (Fig. 69):

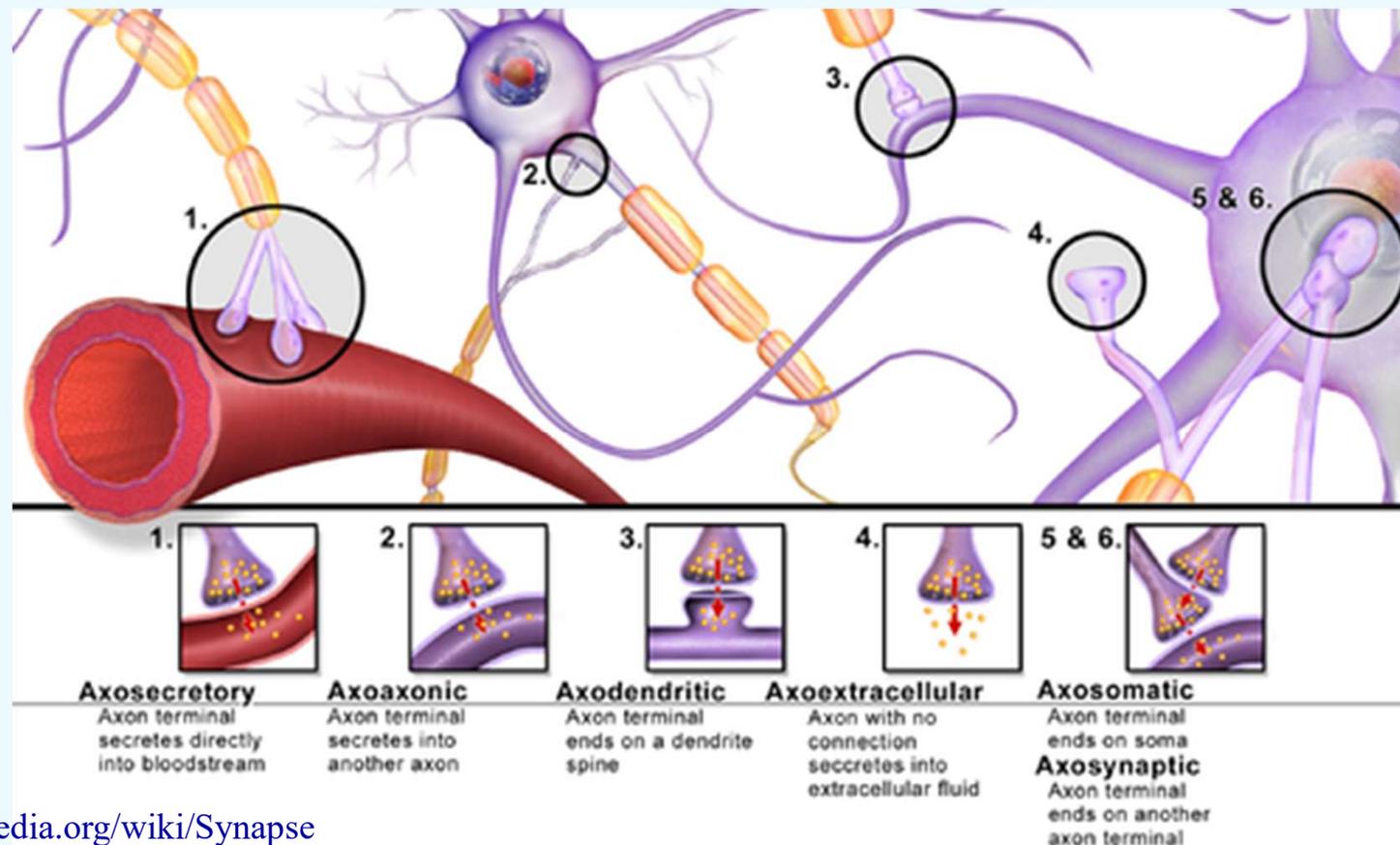
Synapse - a functional link between two membranes of cells, where at least one of them is a neuron.

The term comes from a Greek word “synapsis” meaning *conjunction*.

There are different kind of synapses – see fig. below

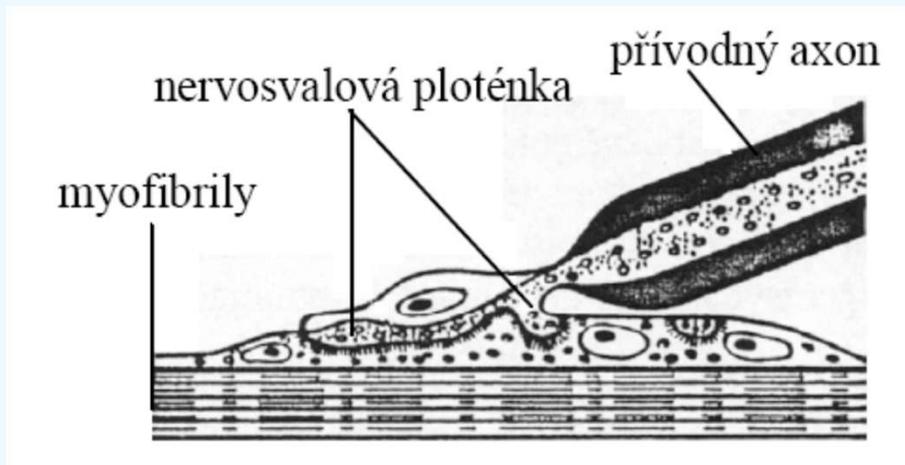
Activities of skeletal muscles are controlled by *inhibitory* and *non-inhibitory* synapses between neurons

Each motor neuron coming out of the anterior horn of spinal cord has about 6000 synapses.



Přenos vzruchu z nervu do svalu:

K přenosu vzruchu z nervu na sval dochází na nervosvalové ploténce (obr. 70).



Poznámka: Název „ploténka“ je určen tvarem presynaptické membrány, která vytváří silnější destičku. Z hlediska unavitelnosti i rychlosti přenosu je nervosvalové (neuromuskulární) spojení nejslabším článkem v motorické jednotce.

Janura, Obr. 70 Napojení neuronu na svalové vlákno v nervosvalové ploténce (Dylevský, 1994)

Přenos signálu se realizuje chemicky pomocí acetylcholinu, který je při aktivaci vyloučen a putuje štěrbinou mezi nervovým výběžkem a membránou svalové buňky (myocyty). V membráně svalové buňky je acetylcholin zachycen receptory a způsobí chemickou reakci v buňce svalu vedoucí ke svalové kontrakci.

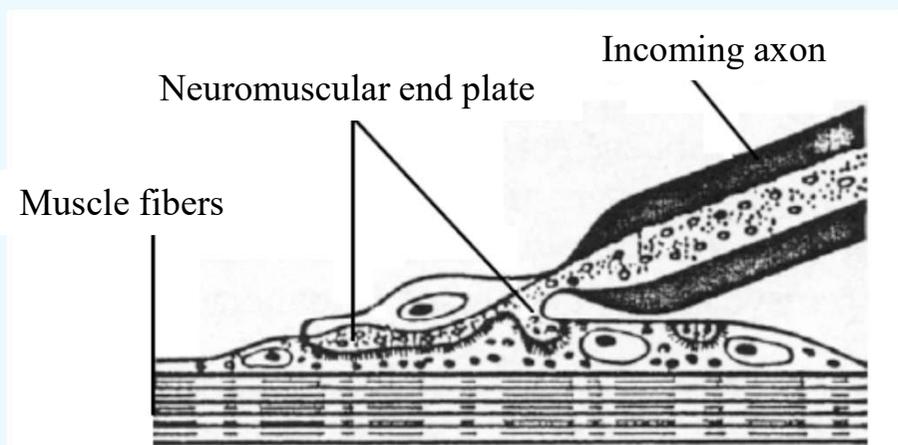
Poruchy přenosu vzruchu z nervu do svalu

Nemoc myasthenia gravis - autoimunní reakce proti receptorům acetylcholinu zabrání přenosu vzruchu. Projeví se jako svalová ochablost a únava.

Různé toxiny, např. botulinum toxin zabraňují uvolnění acetylcholinu a způsobí svalovou paralýzu (obrnou).

Transmission of impulses from nerve to muscle:

The conduction of the impulse from nerve to muscle occurs at the *neuromuscular end plates* (Fig. 70).



Note: The name “end plate” is determined by the shape of the presynaptic membrane, which creates a thicker plate. In terms of fatigue and the speed of neuromuscular transmission this connection presents the weakest link in the motor unit.

Janura, Fig. 70: Connection of the neuron to the muscle fiber (after Dylevský 1994)

Signal transmission is carried out chemically by means of acetylcholine, which is expelled upon activation and travels through the gap between the axon terminal and the muscle fiber (myocyte) membrane. The myocyte membrane captures the acetylcholine through acetylcholine receptors and causes a chemical reaction in the muscle cell, causing the muscle contraction.

Disorders of neuromuscular junction:

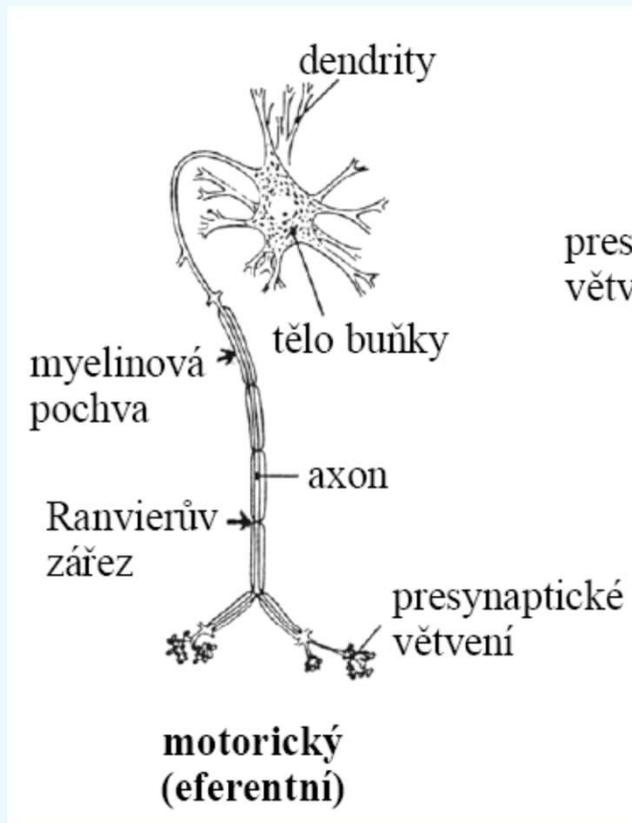
Myasthenia gravis - an autoimmune reaction against acetylcholine receptors. It prevents impulse transmission. It manifests itself as muscle weakness and fatigue.

Some toxins, such as **botulinum toxin** (Botox) prevent the release of acetylcholine and cause muscle paralysis (no muscle activity).

Motorický neuron (motoneuron):

Spouštěcím mechanismem pro vznik svalové kontrakce je akční potenciál (iontový přesun na vzrušivé membráně), který se šíří na membráně svalového vlákna.

Depolarizační vlna na povrchu membrány má v průběhu svého trvání stále stejnou amplitudu, její velikost neklesá. Jestliže dojde k vzniku vzruchu, jedná se o nevratný děj, který proběhne vždy až do konce. Reakce membrány na podráždění buď neproběhne, nebo se vyznačuje maximální amplitudou. Její činnost se tedy řídí zákonem „**vše nebo nic**“.



Rychlost přenosu vzruchu je přímo úměrná průměru vlákna,

Její hodnota se mění s mírou myelinizace („izolace“) vlákna.

Myelinizovaným vláknem se depolarizační vlna šíří skokem přes Ranvierovy zářezy, které myelin přerušují.

Základní typy neuronových vláken a rychlost vedení vzruchu jsou uvedeny v tabulce 9 (viz dále).

Janura, Obr. 69 Základní části motorického a senzorického neuronu

Motor neuron:

The triggering mechanism causing muscle contraction is the *action potential* (ion transfer on excitable membranes) that travels across the membrane (myelin sheath) of the nerve fiber.

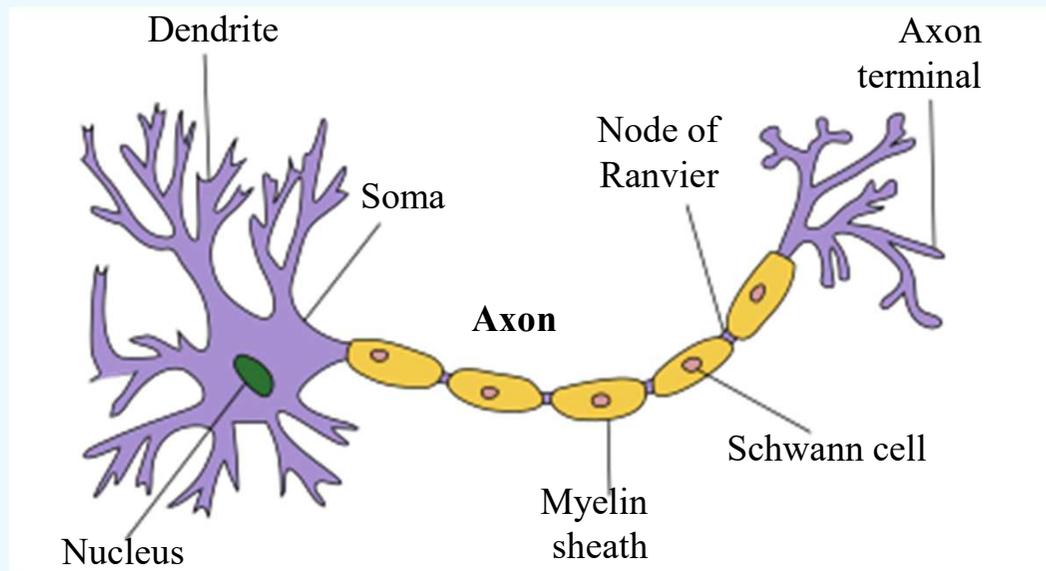
Depolarization wave on the membrane surface keeps the same amplitude during the travel.

When impulse is excited, it is an irreversible process which is normally carried out fully. Reaction of the membrane on irritation either not occurs at all or it occurs with a maximum amplitude. This activity fulfils the law "all or nothing".

The conduction velocity of the action potential is directly proportional to nerve fiber diameter.

Its value varies with the amount of myelination ("isolation") of the fibers.

The depolarization wave jumps across the nodes of Ranvier, which are interrupting the myelin sheath.



Basic types of neural fibers and conduction velocity are shown in Table 9 (see below).

Typy nervových vláken a rychlost vedení akčního potenciálu

Základní typy neuronových vláken a rychlost vedení vzruchu jsou uvedeny v tabulce 9.

<i>Typ vlákna</i>	<i>Inervace</i>	<i>Průměr vlákna (μm)</i>	<i>Rychlost vedení vzruchu ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)</i>
Eferentní	- motoneurony		
A α	kosterní sval	15	100
A β	kosterní sval, svalové vřetenko	8	50
A γ	svalové vřetenko	5	20
B	sympatikus – pregangliová vlákna	3	7
C	sympatikus – postgangliová nemyelinizovaná vlákna	1	1
Aferentní	- senzorická		
Ia	svalové vřetenko	13-20	80-120
Ib	Golgiho tělísko	13-20	80-120
II	svalové vřetenko	6-12	35-75
III	tlakové senzory ve svalu, ostatní mechanorecepce	1-5	5-30
IV	bolest (nemyelinizovaná), teplota	0,2-1,5	0,5-2

Janura, Tab 9

Pozn: sympatikus – nervový systém působící na orgány těla, reguluje nervový a hormonální stres (např. „fight or flight response“), roztažení pupily, močení atd.

Types of nerve fibers and of the action potential conduction velocity

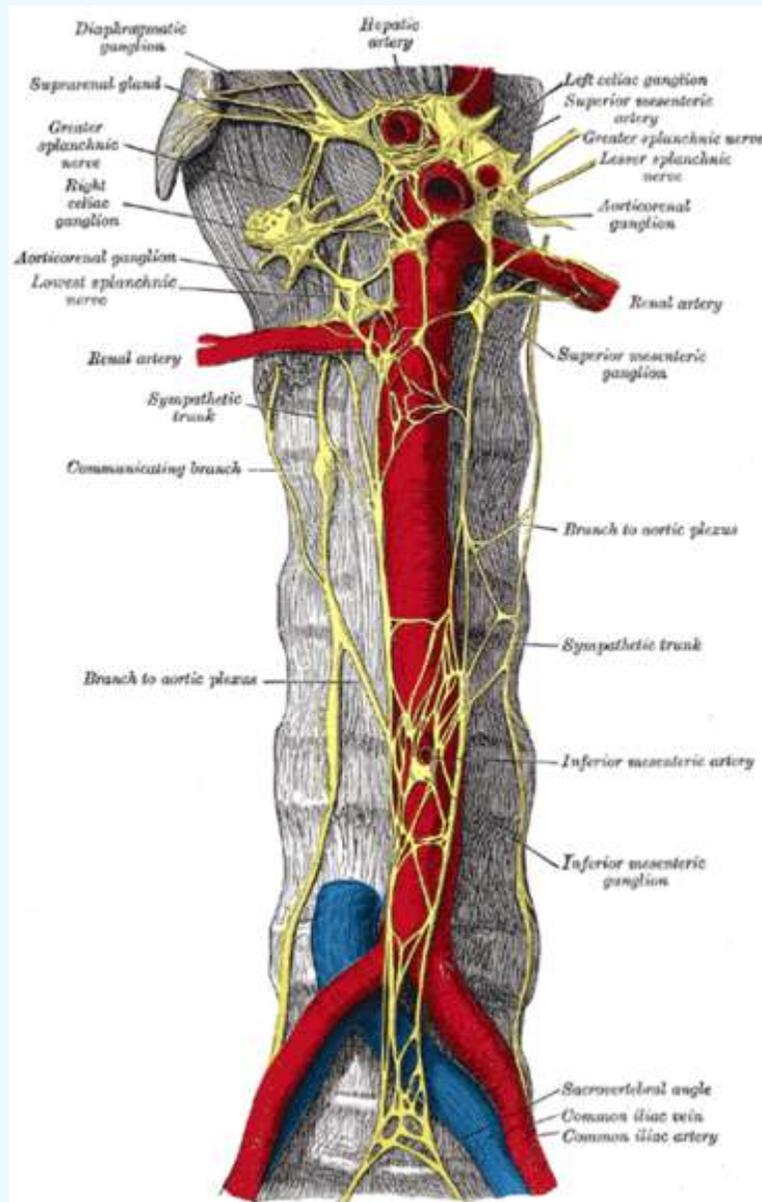
Basic types of neural fibers and conduction velocity are shown in Table 9.

Fiber type	Innervation	Diameter (μm)	Conduction velocity (m/s)
Efferent	Motor neurons		
A α	Skeletal muscle	15	100
A β	Skeletal muscle, muscle spindle	8	50
A γ	Muscle spindle	5	20
B	n. sympaticus – preganglionic fibers	3	7
C	n.Sympaticus – postganglionic nonmyelinated fibers	1	1
Afferent	Sensory neurons		
Ia	Muscle spindle	13-20	80-120
Ib	Golgi tendon organ	13-20	80-120
II	Muscle spindle	6-12	35-75
III	Pressure receptors in muscles, other mechanireception	1-5	5-30
IV	Pain (nonmyelinated fibers), temperature	0,2-1,5	0,5-2

Janura, Tab 9

Note: n. sympaticus = nervous system acting on the internal organs of the body, it also regulates the nervous and hormonal stress (eg. the "fight or flight response"), pupils' dilatation, urination, etc.

Paravertebrální ganglia:



Nervová zauzlení v okolí páteře

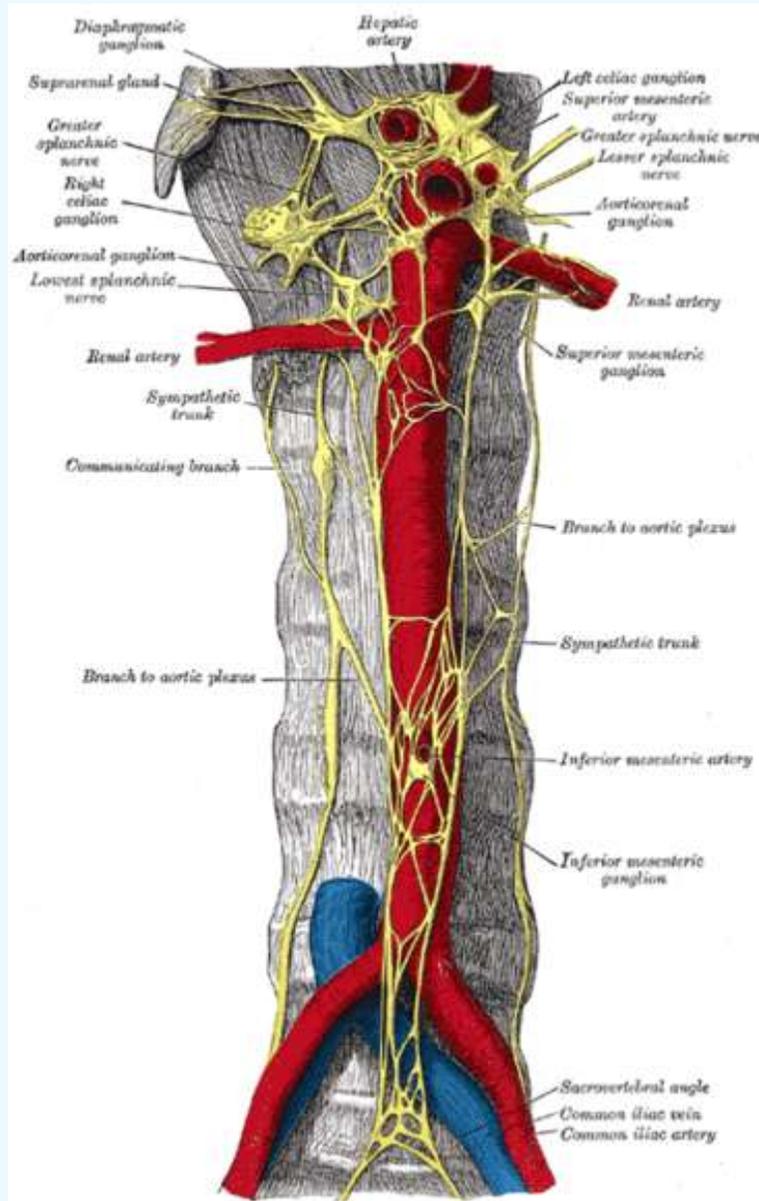
Cesty vegetativního nervstva přerušují ganglia. Vystupují z míchy krční, hrudní a bederní. Zauzlina je blízko míchy.

Along the length of the sympathetic trunk are ganglia known as **ganglia of sympathetic trunk** or **paravertebral ganglia**. The ganglia are distinguished as cervical, thoracic, lumbar, and sacral and, except in the neck, they closely correspond in number to the vertebrae.

Abdominal portion of the sympathetic trunk, with the celiac plexus and hypogastric plexus. (Sympathetic trunk labeled at center left.)

http://en.wikipedia.org/wiki/Paravertebral_ganglia

Paravertebral ganglia:



Nerve nodes around the spine

Paths of autonomic nerves are interrupted by ganglia. They emerge from the spinal cord at cervical, thoracic and lumbar parts. The nodes are near the spinal cord.

Along the length of the sympathetic trunk are ganglia known as **ganglia of sympathetic trunk** or **paravertebral ganglia**. The ganglia are distinguished as cervical, thoracic, lumbar, and sacral and, except in the neck, they closely correspond in number to the vertebrae.

Abdominal portion of the sympathetic trunk, with the celiac plexus and hypogastric plexus. (Sympathetic trunk labeled at center left.)

http://en.wikipedia.org/wiki/Paravertebral_ganglia

Motoneurony

Typy motoneuronů:

α -motoneurony - největší průměr, inervují extrafuzální svalová vlákna (vlákna určená pro produkci síly, kontrakci způsobující pohyb), nejrychlejší vedení vzruchu

β -motoneurony – menší průměr, inervace extrafuzálních a intrafuzálních svalových vláken. Jejich funkce není zcela zřejmá.

γ -motoneurony - nejmenší průměr, inervace intrafuzálních vláken (vlákna svalového vřeténka), určená pro nastavení citlivosti detekce napětí svalu

Motor neurons

Types of motor neurons:

α motor neurons – of largest diameter, innervate extrafusal muscle fibers (fibers for the production of force, causing contraction movement), fastest conduction velocity

β motor neurons – of medium diameter, innervate extrafusal and intrafusal muscle fibers. Their function is not completely clear.

γ motor neurons – of smallest diameter, innervate intrafusal fibers (sensory fibers of muscle spindles), designed to adjust the sensitivity of muscle tension detection

Extrafuzální a intrafuzální svalová vlákna

Extrafuzální svalová vlákna (extrafusal muscle fibers) :

- Typ svalových vláken inervovaných alfa-motoneurony.
- Produkují sílu, mechanickou práci a dovolují pohyb v důsledku kontrakce
- Extrafuzální svalová vlákna a příslušné motoneurony vytváří motorickou jednotku (motor unit).
- Spojení mezi alfa-motoneuronem and extrafuzálním svalovým vláknem se nazývá nervosvalové spojení (neuromuscular junction).
- Neurotransmitter zodpovědný za kontrakci je acetylcholin.

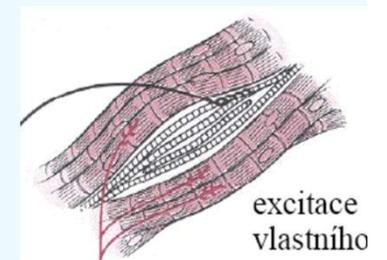
Intrafuzální svalová vlákna (Intrafusal muscle fibers):

- Svalová vlákna tvořící svalové vřetenko (muscle spindle).
- Jsou to vlákna senzorká a jsou inervována gama-motoneurony.
- Intrafuzální vlákna jsou obalena sensorickými receptory (sensory receptors).
- Tyto vlákna jsou oddělena od zbytku svalu kolagenním pouzdrém (collagen sheath) vřetenovitým tvarem ("fusiform" shape, hence the name "intrafusal,") o

O protažení svalu a o rychlosti protažení poskytují informace tyto dva senzorké druhy nervových vláken:

Typ Ia sensorické vlákno (reaguje na protažení a rychlost změny)

Typ II sensorické vlákno (reaguje na protažení)



Extrafusal and intrafusal muscle fibers

Extrafusal muscle fibers:

- Type of muscle fibers innervated by alpha-motoneurons.
- Produce force, mechanical work and allow movements due to contraction
- Extrafusal muscle fibers and motor neurons together form the motor unit.
- The connection between the alpha-motoneuron and extrafusal muscle fiber is called neuromuscular junction.
- The neurotransmitter responsible for muscle contraction is acetylcholine.

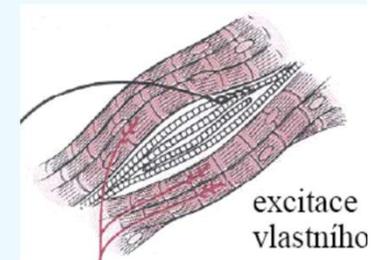
Intrafusal muscle fibers:

- Muscle fibers in the muscle spindle.
- Sensory fibers which are innervated by gamma-motoneurons.
- Intrafusal fibers are inside sensory receptors.
- These fibers are separated from the rest of muscle by collagen sheath with a spindle shape ("fusiform" shape, hence the name "intrafusal")

The muscle elongation and elongation velocity are detected by these two types of sensory nerve fibers:

Type Ia sensory fiber (responds to elongation and the velocity of elongation)

Type II sensory fiber (responds to elongation)



Typy nervových vláken a rychlost vedení akčního potenciálu

Základní typy neuronových vláken a rychlost vedení vzruchu jsou uvedeny v tabulce 9.

Typ vlákna	Inervace	Průměr vlákna (μm)	Rychlost vedení vzruchu ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
- motoneurony			
Eferentní			
A α	kosterní sval	15	100
A β	kosterní sval, svalové vřetenko	8	50
A γ	svalové vřetenko	5	20
B	sympatikus – pregangliová vlákna	3	7
C	sympatikus – postgangliová nemyelinizovaná vlákna	1	1
Aferentní - senzorická			
Ia	svalové vřetenko	13-20	80-120
Ib	Golgiho tělísko	13-20	80-120
II	svalové vřetenko	6-12	35-75
III	tlakové senzory ve svaly, ostatní mechanorecepce	1-5	5-30
IV	bolest (nemyelinizovaná), teplota	0,2-1,5	0,5-2

Janura, Tab 9

Pozn: sympatikus – nervový systém působící na orgány těla, reguluje nervový a hormonální stres (např. „fight or flight response“), roztažení pupily, močení atd.

Types of nerve fibers and of the action potential conduction velocity

Basic types of neural fibers and conduction velocity are shown in Table 9.

Fiber type	Innervation	Diameter (μm)	Conduction velocity (m/s)
Efferent	Motor neurons		
Aα	Skeletal muscle	15	100
Aβ	Skeletal muscle, muscle spindle	8	50
Aγ	Muscle spindle	5	20
B	n. sympaticus – preganglionic fibers	3	7
C	n. sympaticus – postganglionic nonmyelinated fibers	1	1
Afferent	Sensory neurons		
Ia	Muscle spindle	13-20	80-120
Ib	Golgi tendon organ	13-20	80-120
II	Muscle spindle	6-12	35-75
III	Pressure receptors in muscles, other mechanireception	1-5	5-30
IV	Pain (nonmyelinated fibers), temperature	0,2-1,5	0,5-2

Janura, Tab 9

Note: n. sympaticus = nervous system acting on the internal organs of the body, it also regulates the nervous and hormonal stress (eg. the "fight or flight response"), pupils' dilatation, urination, etc.

Biomechanické vlastnosti nervové tkáně

Velké zatížení může způsobit mechanickou deformaci periferních nervů, která se projeví v zhoršení jejich funkce. Při dalším nárůstu dochází ke strukturálním změnám. Hlavními způsoby namáhání periferních nervů je tah a tlak. Maximální protažení, které umožní návrat do původního stavu, se pohybuje kolem 20 % klidové délky. Při protažení, které způsobí změnu délky asi o 30 %, dochází k přetržení nervu. Vlastnosti vybraných nervů jsou uvedeny v tabulce 10.

<i>Nerv</i>	<i>Mez pevnosti v tahu (MPa)</i>	<i>Maximální protažení (%)</i>
n. ischiadicus	12,8	18,2
n. femoralis	13,0 ± 0,1	18,5 ± 0,1
n. intermedius	13,2	18,3
n. intercostalis	13,0 ± 0,1	18,4 ± 0,1
n. phrenicus	13,5 ± 0,2	18,4 ± 0,1
n. vagus	13,2 ± 0,2	18,4 ± 0,2
nn. sympathici	13,5 ± 0,1	18,3 ± 0,1

Janura, Tab. 10 Mez pevnosti v tahu a maximální protažení některých nervů (upraveno podle Valenta a kol., 1985)

Vlastnosti nervové tkáně se mění vlivem věku. Po pozvolném poklesu na začátku dospělosti se větší dysfunkce objevují kolem 70. roku života. Zatímco rychlost vedení vzruchu v nervových vláknech se u mladých jedinců pohybovala mezi 50 až 70 m.s⁻¹, došlo ve věku mezi 60. až 80. rokem k poklesu asi o 10 m.s⁻¹ (Nordin & Frankel, 1989).

Biomechanical properties of nerve tissues

High loads can cause mechanical deformation of the peripheral nerves, which is reflected in deterioration of their function. Upon further increase structural alterations occur.

The main types of stress in peripheral nerves are elongation and pressure. The maximum elongation, which allows the nerve to return to the original state is around 20% of resting length. Elongation with a change in length by about 30% causes rupture of the nerve. Properties of selected nerves are shown in Table 10.

Nerve	Tensile yield strength (MPa)	Maximum strain (%)
n. ischiadicus	12,8	18,2
n. femoralis	13,0 ± 0,1	18,5 ± 0,1
n. intermedius	13,2	18,3
n. intercostalis	13,0 ± 0,1	18,4 ± 0,1
n. phrenicus	13,5 ± 0,2	18,4 ± 0,1
n. vagus	13,2 ± 0,2	18,4 ± 0,2
nn. sympathici	13,5 ± 0,1	18,3 ± 0,1

Janura, Tab. 10 Tensile strength and maximum elongation of certain nerves (edited by Valenta et al., 1985)

The properties of nerve tissues changes due to age. After gradual aging starting from early adulthood, larger dysfunctions appear around 70th year of life. While the speed of conduction of the nerve fibers ranges between 50 to 70 ms⁻¹ in young subjects, there was a decrease by about 10 ms⁻¹ between 60th to 80th year of age (Nordin & Frankel, 1989).

Zpětnovazebné receptory

Nedílnou součástí řízení pohybu je okamžitá a nepřetržitá informace o průběhu kontrakce a o velikosti vyvíjené síly.

Tato informace je předávána do CNS na základě údajů zpětnovazebných receptorů, umístěných přímo v masité nebo šlašité části svalu.

Receptory můžeme charakterizovat jako specializované buňky nebo struktury, které mění své vlastnosti na základě vnějších stimulů (Latash, 1998).

V případě řízení svalové kontrakce jsou základními receptory:

- a) **svalová vřeténka** (modifikovaná svalová vlákna, paralelně se svalovými vlákny)
- b) **Golgiho tělíska**

Další vybrané receptory:

c) **Paciniho tělíska** (Pacinian corpuscles) – v hlubké vrstvě kůže, reagují na dotek, tlak a vysokofrekvenční vibrace (vjem vibrací, lechtání)

e) **Meissnerova tělíska** (Meissner's corpuscles) - na prstech, dlaních, chodidlech, rtech, jazyku - důležitá pro hmat a také detekují nízkofrekvenční vibrace (vjem poklepávání, chvění) [pozor, také existuje Meissnerův plexus, který má jinou funkci – nervová pleteň ve stěně trávicí trubice – reguluje trávení]

d) **Ruffiniho tělíska** (Ruffini corpuscles) – v kůži a kloubech, reagují na protažení kůže a na polohu a rychlost pohybu kloubu

Feedback receptors

An integral part of the motor control is an instantaneous and continuous monitoring of the course of contraction and the magnitude of forces applied.

This information is passed to the CNS on the basis of signals from feedback receptors located directly in the muscle or in the tendons.

Receptors can be characterized as specialized cells or structures that change their properties based on external stimuli (Latasha, 1998).

In case of control muscle contraction the following receptors are essential:

- a) **muscle spindles** (modified muscle fibers, parallel to the muscle fibers)
- b) **Golgi tendon organs**

There are also other feedback receptors:

c) **Pacinian corpuscles** - in deep layer of the skin, react to touch, pressure and high-frequency vibrations (sensation of vibration or tickling)

d) **Meissner corpuscles** – located on the fingers, palms, soles, lips, and tongue – important for touch sensation and for detecting low-frequency vibrations (sensation of tapping-flutter).

[Note: There is also the Meissner's plexus, which has a different function – it is a nerve plexus in the wall of the digestive tract that regulates digestion.]

e) **Ruffini corpuscles** - in the skin and joints, respond to skin stretch and to joint position and velocity

Svalová vřeténka (zpětnovazebné receptory)

Protáhlé útvary délky 2-10 mm, které jsou tvořeny intrafuzálními svalovými vlákny.

Jejich počet ve vřeténku se podle různých autorů pohybuje mezi 4 až 6, resp. 2 až 12.

Intrafuzální vlákna jsou orientována rovnoběžně s extrafuzálními vlákny kosterního svalu.

Svalová vřeténka reagují na velikost protažení svalu – změnu délky. Jejich množství ve svalu je relativně stálé a pohybuje se od několika vřetének až po několik desítek.

Inervace intrafuzálních svalových vláken je pomocí gama-neuronů - slouží pro modifikování citlivosti svalového vřeténka na protažení svalu.



A muscle spindle, with γ motor and Ia sensory fibers (http://en.wikipedia.org/wiki/Type_Ia_sensory_fiber)

Muscle spindles (feedback receptors)

Elongated bodies of 2-10 mm length, created by intrafusal muscle fibers.

According to different authors, their number in the spindle varies between 4-6, or 2-12

Intrafusal fibers are oriented parallel to the extrafusal fibers of skeletal muscle.

Muscle spindle responds to the change of length.

There are several spindles to few tens of spindles inside of the muscle.

Innervation of the intrafusal muscle fibers is accomplished through gamma motor neurons – these are used to modify the sensitivity of muscle spindles to muscle strain.

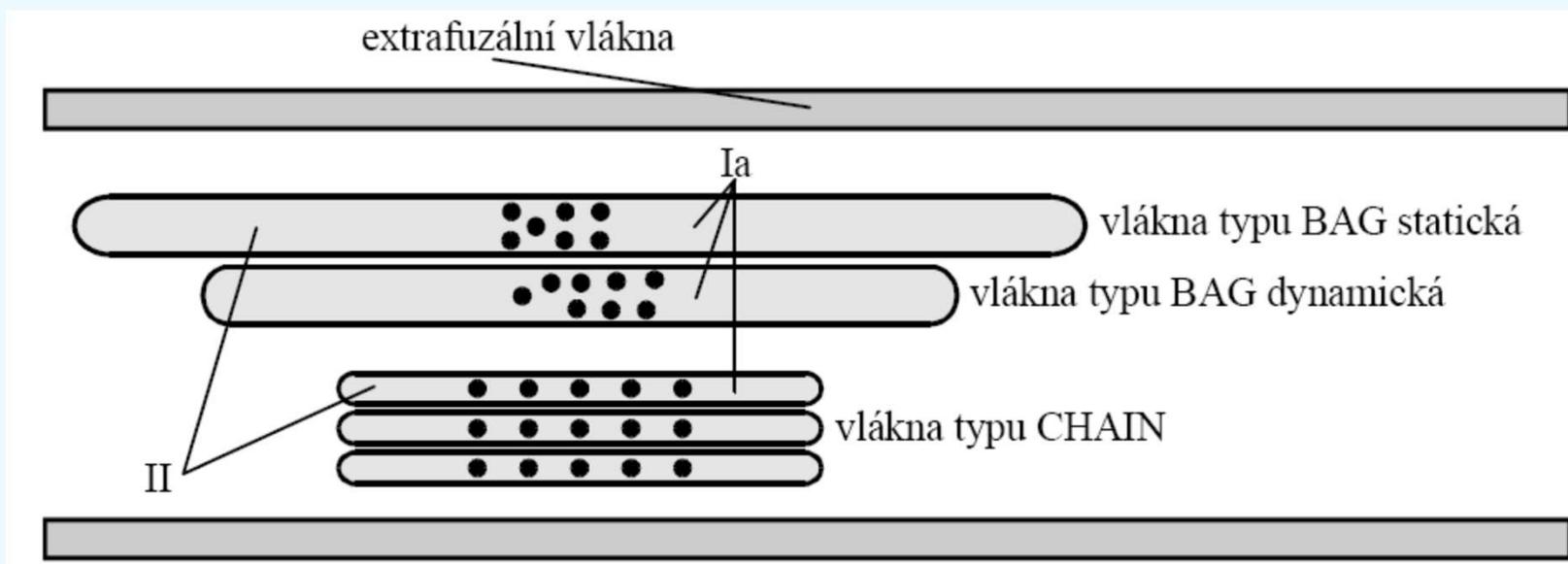


A muscle spindle, with γ motor and Ia sensory fibers (http://en.wikipedia.org/wiki/Type_Ia_sensory_fiber)

Svalová vřeténka (zpětnovazebné receptory)

intrafuzální vlákna se dělí na dvě skupiny, podle uspořádání buněčných jader (obr. 72):

- „**nuclear BAG**“ (B) – delší, jejich název vznikl podle uspořádání jader do shluků. Dále se dělí na vlákna:
 - a) statická (Bs)
 - b) dynamická (Bd).
- „**nuclear CHAIN**“ (CH), ve kterých můžeme uspořádání jader označit jako lineární.



Janura, Obr. 72 Schematické znázornění svalového vřeténka a typů vláken

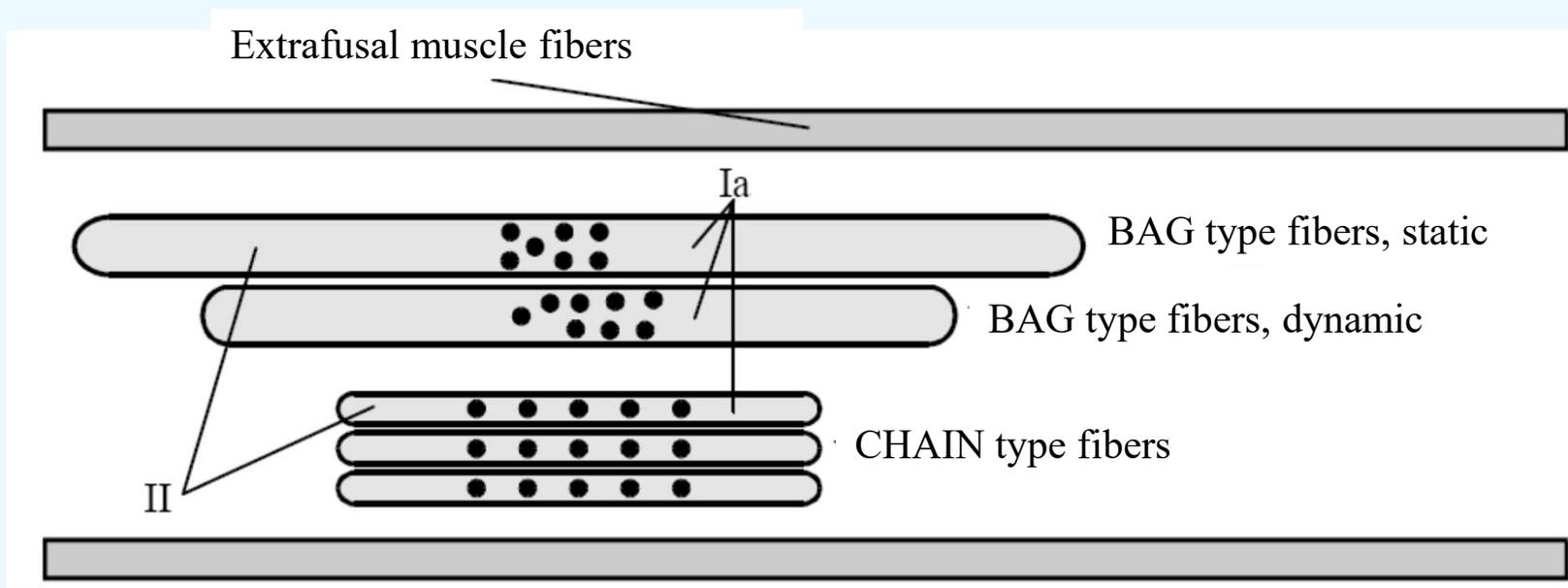
Muscle spindles (feedback receptors)

Intrafusal muscle fibers can be divided into two groups depending on the arrangement of cell nuclei (Fig. 72):

- **"Nuclear BAG" (B)** – longer length, they obtained their name due to arrangement of nuclei into clusters. Furthermore, these fibers are divided into:

- a) static (Bs)
- b) dynamic (Bd).

- **"Nuclear CHAIN" (CH)**, where the nuclei are positioned along a line.



Janura, Fig. 72 Schematic illustration of the muscle spindle and the types of fibers

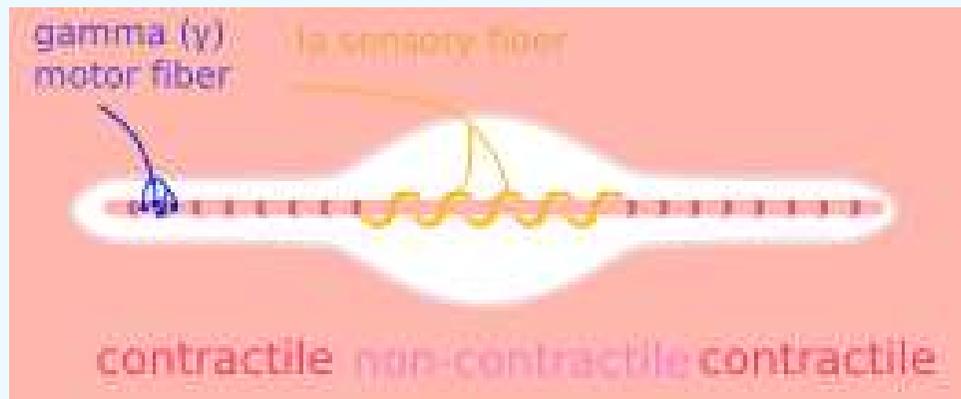
Svalová vřeténka (zpětnovazebné receptory)

Výstupy ze svalových vřetének jsou předávány pomocí dvou typů aferentních nervových zakončení.

Vlákna Ia - jsou citlivá na změnu délky (protažení) i na rychlost těchto změn. Jejich zakončení je běžné pro vlákna typu BAG i CHAIN.

Axony vláken II reagují pouze na změnu délky. Jejich zastoupení na intrafuzálních vláknech typu BAG-dynamická je výjimečné.

Aferentní neurony, které spirálovitě obtáčí intrafuzální vlákna, pokračují dále jako vlákna míšního nervu a vstupují do zadních rohů míchy. V míše se tato vlákna napojují přímo na α -motoneurony předních rohů míšních, nebo prostřednictvím interneuronů na motoneurony antagonistických svalů.



A muscle spindle, with γ motor and Ia sensory fibers (http://en.wikipedia.org/wiki/Type_Ia_sensory_fiber)

Muscle spindles (feedback receptors)

Outputs from muscle spindles are transmitted using two types of afferent nerve endings.

Ia fibers - sensitive to change in length (stretching) as well as to the speed of these changes. Their termination is common in fibers of type BAG and CHAIN.

Axons of type II fibers respond only to change in length. Their representation in the intrafusal fibers of BAG-dynamic is unusual.

The afferent neurons helically encircle the intrafusal fibers. The further they continue as spinal cord fibers. They enter the posterior horns of the spinal cord. In the spinal cord they directly connect to the fibers of α -motor neurons in the anterior horn of the spinal cord, or they connect via interneurons to the motor neurons of the antagonistic muscles.



A muscle spindle, with γ motor and Ia sensory fibers (http://en.wikipedia.org/wiki/Type_Ia_sensory_fiber)

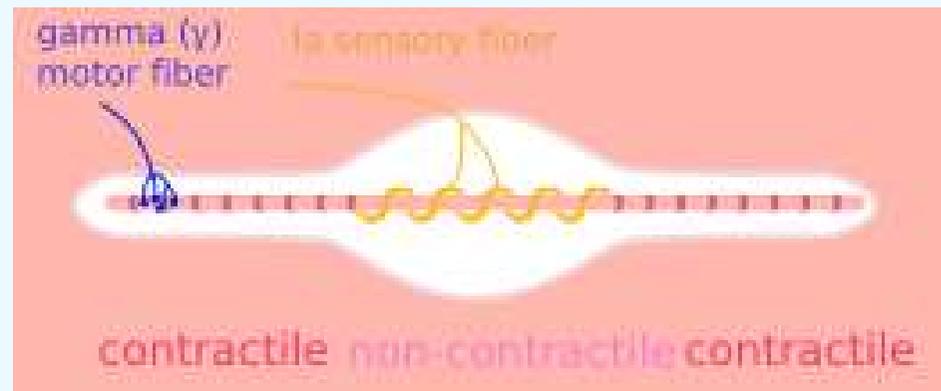
Svalová vřeténka (zpětnovazebné receptory)

Citlivost svalového vřeténka je nastavena pomocí γ -motoneuronů, které jsou mnohem menší než α -motoneurony. γ -motoneurony způsobují kontrakci příslušných intrafuzálních vláken, čímž se změní citlivost vřeténka na změny ve svalu.

- Dynamická BAG vlákna jsou inervována pomocí „dynamických“ γ -motoneuronů, pro statická BAG vlákna a pro vlákna typu CHAIN slouží „statický“ γ -motoneuron.

- Rychlost vedení vzruchu je pro oba typy γ -motoneurony podobná (asi $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) a odpovídá asi $1/3$ až $1/5$ rychlosti vedení vzruchu α -motoneuronem.

Vřeténka jsou natahována zároveň s prodloužením svalu. Dochází ke zpětnovazebnému dráždění α -motoneuronů, které vyvolávají svalovou kontrakci. Svalová vřeténka tedy fungují jako autoregulační systém, který nastavuje citlivost receptoru – tzv. γ -smyčka.



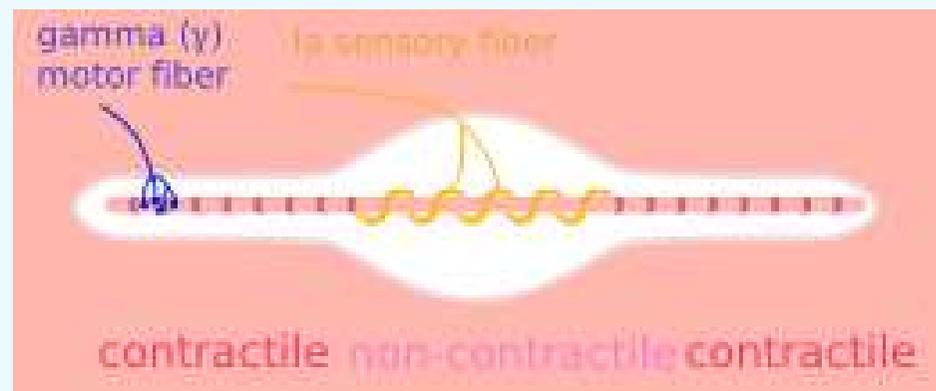
A muscle spindle, with γ motor and Ia sensory fibers (http://en.wikipedia.org/wiki/Type_Ia_sensory_fiber)

Muscle spindles (feedback receptors)

The sensitivity of the muscle spindle is set using γ -motoneurons, which are much smaller than α -motoneurons. Gamma-motoneurons cause contraction of the specific intrafusal fibers in the muscle spindle – that changes the sensitivity of the muscle spindle to muscle changes.

- Dynamic BAG fibers are innervated through the "dynamic" γ -motoneurons,
- Static BAG fibers and CHAIN fiber types are innervated through "static" γ -motoneurons.
- Conduction velocity for both types of γ -motoneurons is similar (about 20 ms^{-1}) and corresponds to about 1/3 to 1/5 the speed of conduction of α - motoneurons.

Spindles are stretched simultaneously with the muscle. This causes feedback irritation of α -motoneurons, which trigger muscle contraction as the response. Muscle spindles thus serve as a self-regulating system, which adjusts the sensitivity of the receptor - this is called the „gamma-loop.“



A muscle spindle, with γ motor and Ia sensory fibers (http://en.wikipedia.org/wiki/Type_Ia_sensory_fiber)

Patelární reflex/Patellar reflex:

Svalová vřeténka (zpětnovazebné receptory)

Úder pod koleno způsobí přes česku natažení šlach stehenních svalů (quadriceps tendon).

Toto natažení je registrováno receptory, zejména svalovými vřeténky.

Tato posílají signál aferentními vlákny femorálního nervu do bederní části páteře.

Vzruch je přes přímou synapsi převeden do motoneuronu vedoucího ke stehennímu svalu (quadriceps femoris muscle), který se kontrahuje.

Zároveň je vzruch přes vmezežené interneurony převeden do antagonistických svalů (hamstring muscles, ischiokrurální svaly - od kolena vzadu) způsobující jeho relaxaci. (Inhibiční synapse).

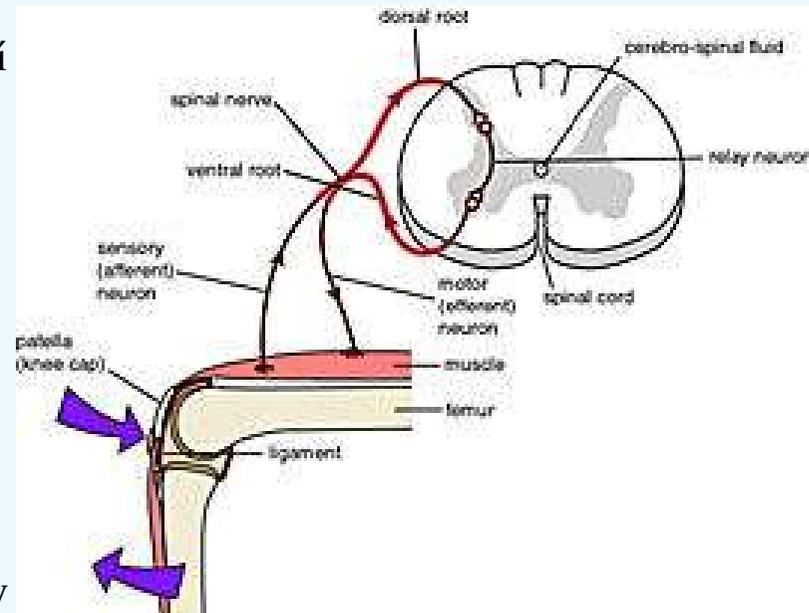
Tato činnost svalů způsobí vykopnutí nohy.

Tento reflex napomáhá udržení vzpřímené polohy, dovoluje chůzi bez přemýšlení.

Zpoždění vykopnutí za stimulem – důsledkem omezené rychlosti vedení vzruchu nervem.

Tento reflex lze vybavit i při úderu přímo na šlachu stehenního svalu nad kolenem.

Všechny svaly reagují na natažení jejich šlachy.



Obr. Patelární reflex. (Všimněte si, že v tomto obrázku je nesprávně zahrnut interneuron na nervové dráze svalu agonisty. Interneuron ale je na dráze k antagonistickému svalu, který zde není ilustrován). *Ponaučení – na wikipedii někdy mohou být chyby.*

(http://en.wikipedia.org/wiki/Patellar_reflex)

Patelární reflex je klasický příklad monosynaptického reflexního oblouku. V dráze vedoucí k flexi stehenního svalu není žádný interneuron. Ale inhibiční interneuron je použit pro relaxaci antagonistického svalu (hamstring muscle).

Patellar reflex:

Muscle spindles (feedback receptors)

A hit just below the knee moves the patella down distally and stretches the tendon of the thigh muscle (quadriceps tendon).

This stretch is registered by receptors, especially muscle spindles.

They send a signal through afferent fibers of the femoral nerve into the lumbar spine.

The stimulus is transmitted through a direct synapse to the motoneuron of the thigh muscle (m. quadriceps femoris), which contracts (Excitatory synapse).

Simultaneously, this stimulus is transmitted through the interneurons into the antagonistic muscles (hamstring and ischiocrural muscles – at the back of the knee) causing these to relax (Inhibitory synapse).

These events causes the leg to perform a kick.

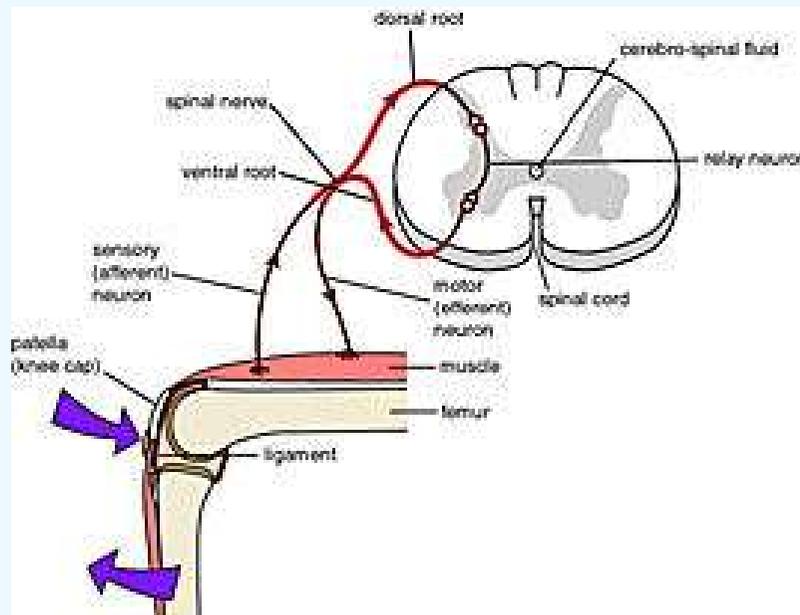


Fig. Patellar reflex. Note that this image wrongly includes an interneuron in the pathway to the agonist muscle. Interneurons are there on the path to the antagonist muscles which are not illustrated here.

(http://en.wikipedia.org/wiki/Patellar_reflex, image downloaded in 2007)

Beware of wikipedia – not all the information there is necessarily correct!

Fig: Patellar reflex. (http://en.wikipedia.org/wiki/Patellar_reflex)

Patellar reflex:

Muscle spindles (feedback receptors)

A hit just below the knee moves the patella down distally and stretches the tendon of the thigh muscle (quadriceps tendon).

This stretch is registered by receptors, especially muscle spindles.

They send a signal through afferent fibers of the femoral nerve into the lumbar spine.

The stimulus is transmitted through a direct synapse to the motoneuron of the thigh muscle (m. quadriceps femoris), which contracts (Excitatory synapse).

Simultaneously, this stimulus is transmitted through the interneurons into the antagonistic muscles (hamstring and ischiocrural muscles – at the back of the knee) causing these to relax (Inhibitory synapse).

These events causes the leg to perform a kick.

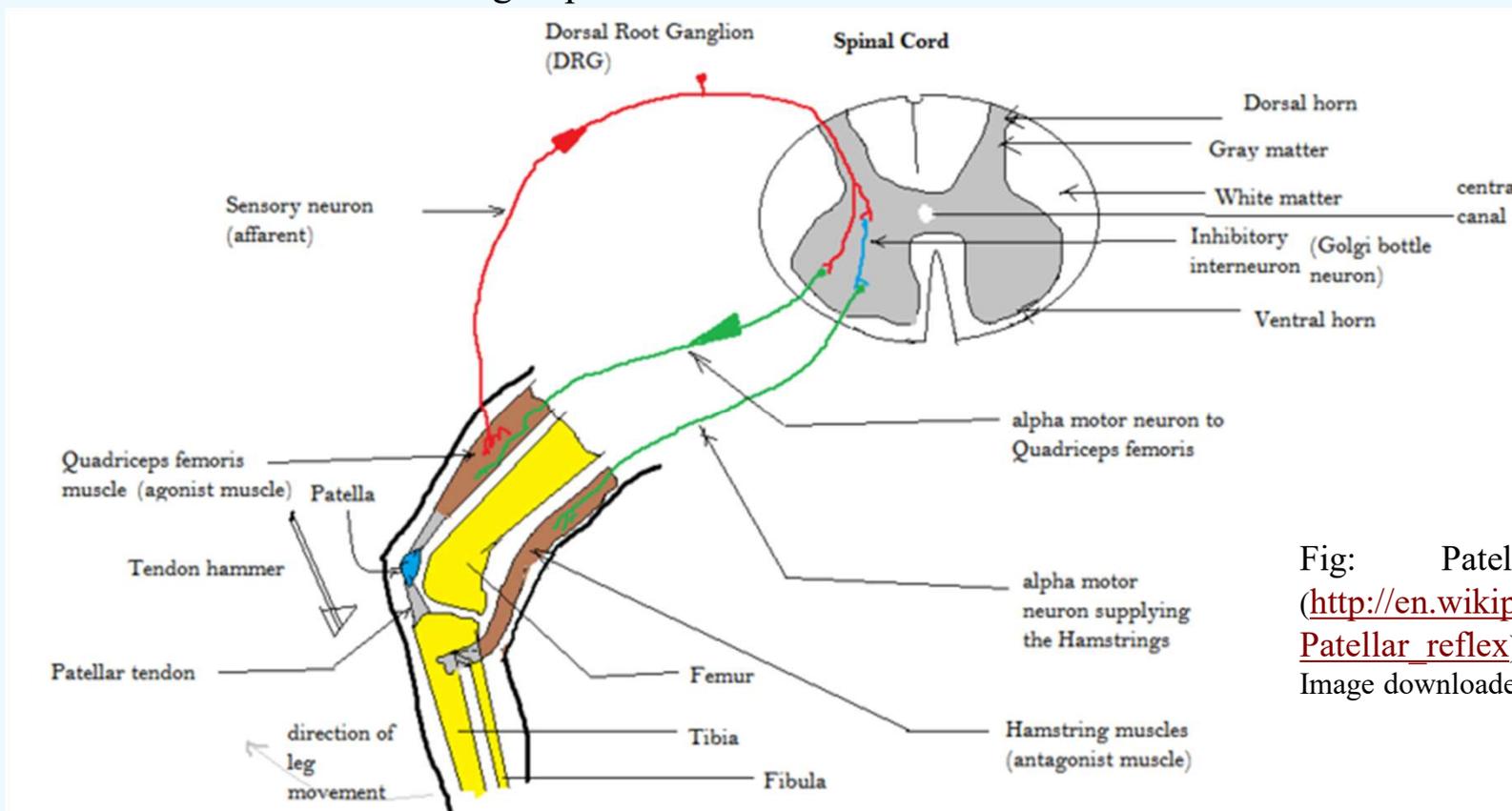


Fig: Patellar reflex.
(http://en.wikipedia.org/wiki/Patellar_reflex)
Image downloaded in 2019.

Patellar reflex:

Muscle spindles (feedback receptors)

The patellar reflex is a classic example of the monosynaptic reflex arc. There is no interneuron on the path leading to the agonist muscle. But an inhibitory interneuron is used to relax the antagonistic muscle (hamstring muscle).

Patellar reflex is related to the feedback loop which helps to maintain an upright position - allows walking without thinking.

Delay of the kick after the hit stimulus – caused by the limited speed of nerve conduction.

This reflex can also be elicited with a hit directly on the thigh tendon above the patella.

Similar reflexes occur all over the body -generally, all striated muscles react when their tendon is stretched.

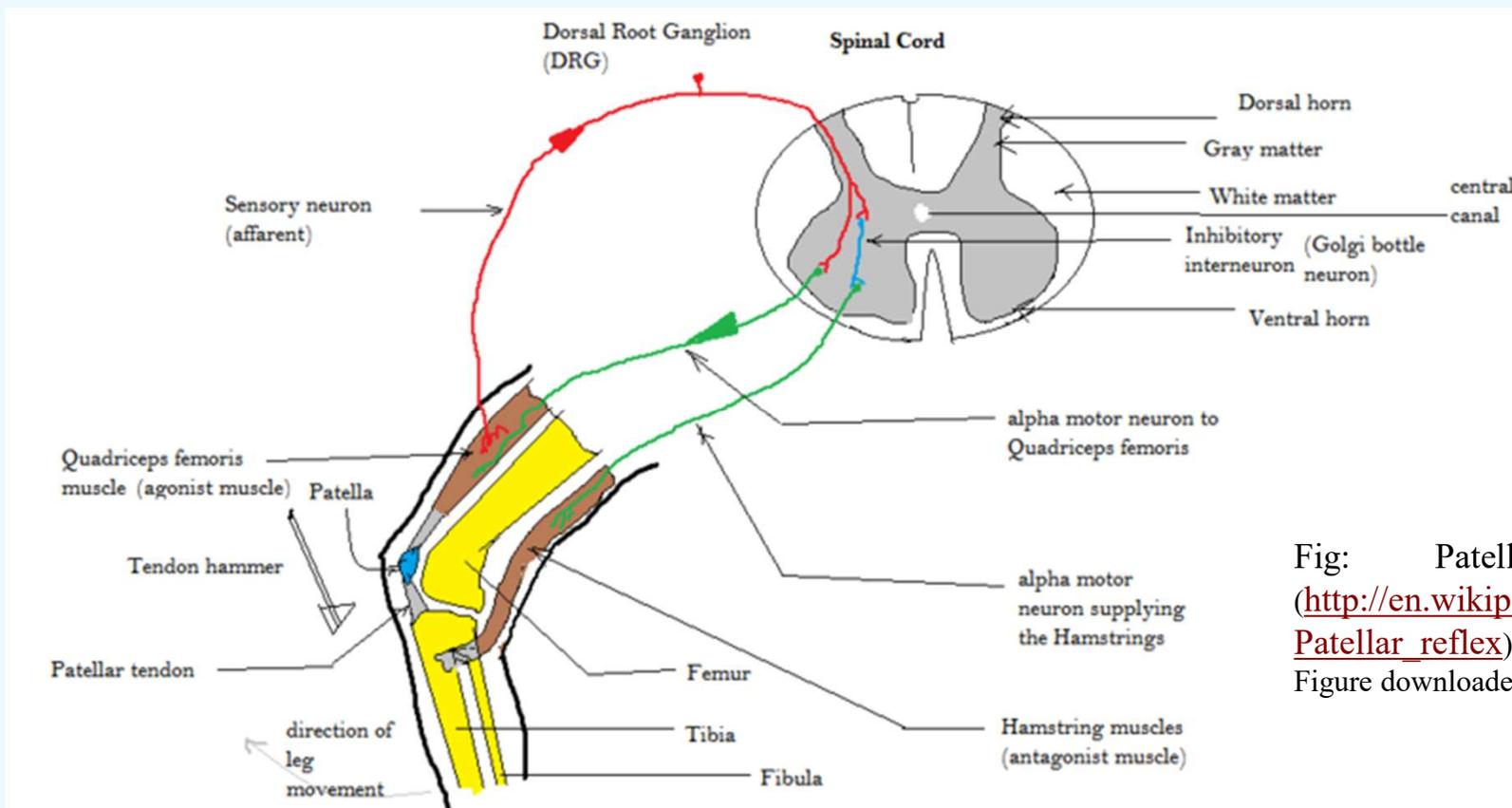


Fig: Patellar reflex.
(http://en.wikipedia.org/wiki/Patellar_reflex)
Figure downloaded in 2019.

Zpětnovazebné receptory

Nedílnou součástí řízení pohybu je okamžitá a nepřetržitá informace o průběhu kontrakce a o velikosti vyvíjené síly.

Tato informace je předávána do CNS na základě údajů zpětnovazebných receptorů, umístěných přímo v masité nebo šlašité části svalu.

Receptory můžeme charakterizovat jako specializované buňky nebo struktury, které mění své vlastnosti na základě vnějších stimulů (Latash, 1998).

V případě řízení svalové kontrakce jsou základními receptory:

a) **svalová vřeténka** (modifikovaná svalová vlákna, paralelně se svalovými vlákny),

b) **Golgiho tělíska.**

Další vybrané receptory:

c) Paciniho tělíska (Pacinian corpuscles) – v hlubké vrstvě kůže, reagují na dotek a tlak

d) Ruffiniho tělíska (Ruffini corpuscles) – v kůži a kloubech, reagují protažení kůže a na polohu a rychlost pohybu kloubu

e) Meissnerova tělíska (Meissner's plexus) - koordinují pohyby a kontrakci střev

Feedback receptors

An integral part of the motor control is an instantaneous and continuous monitoring of the course of contraction and the magnitude of forces applied.

This information is passed to the CNS on the basis of signals from feedback receptors located directly in the muscle or in the tendons.

Receptors can be characterized as specialized cells or structures that change their properties based on external stimuli (Latasha, 1998).

In case of control muscle contraction the following receptors are essential:

- a) **muscle spindles** (modified muscle fibers, parallel to the muscle fibers)
- b) **Golgi tendon organs**

There are also other feedback receptors:

- c) Pacinian corpuscles - in deep layer of the skin, react to touch and pressure
- d) Ruffini corpuscles - in the skin and joints, respond to skin stretch and joint position and velocity
- e) Meissner's plexus - coordinates movement and contraction of the bowel

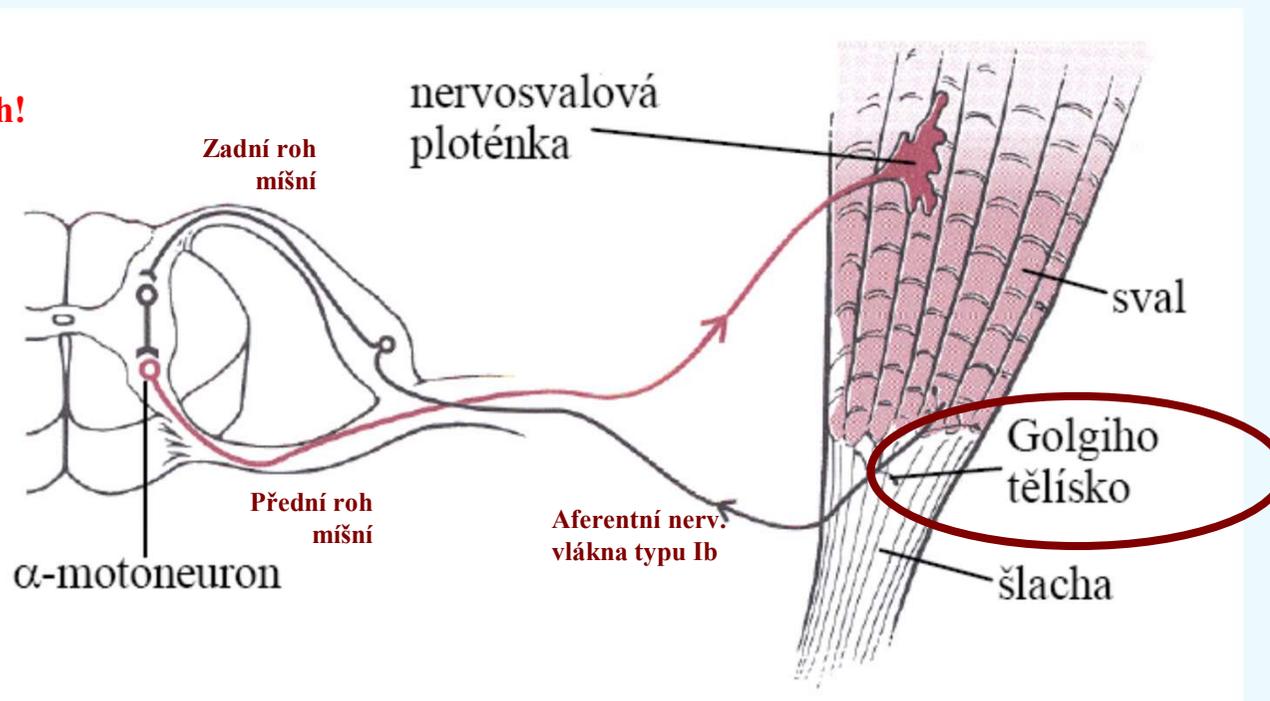
Golgiho tělíska (zpětnovazebné receptory)

Golgiho tělísko je tvořeno svazkem kolagenních vláken v jemném vazivovém pouzdře, která se nacházejí na přechodu šlachy a svalu a ve kterých jsou nervová zakončení.

Jsou citlivá na mechanickou deformaci, tedy na změnu velikosti výstupní síly (obr. 73).

Vedou z nich aferentní vlákna typu Ib, nemají eferentní inervaci.

Neplést s Golgiho aparátem v buňkách!



Janura, Obr. 71 Schéma inervace svalu – reflexní oblouk (upraveno podle Hamill & Knutzen, 1995)

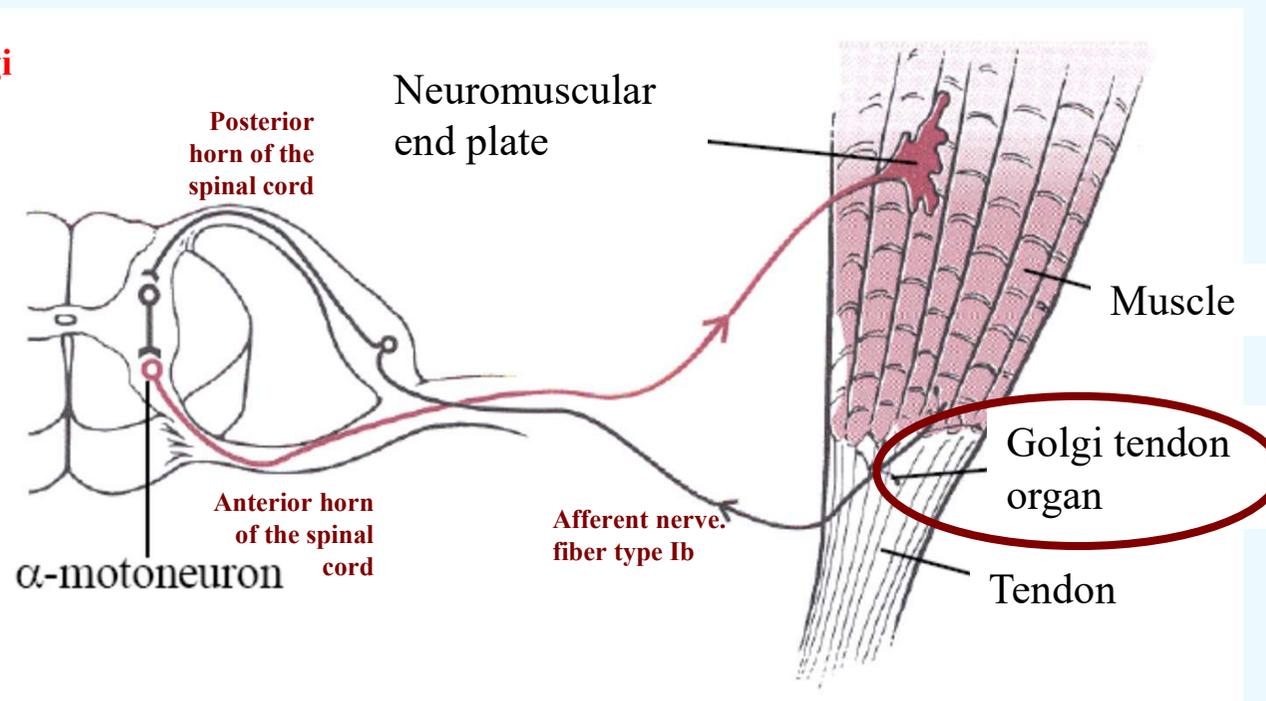
Golgi tendon organs (feedback receptors)

Golgi tendon organs are created by bundles of collagen fibers wrapped in a thin ligament housing, which are located at the border between the tendons and muscles, at the same location where nerve endings are.

They are sensitive to mechanical deformation (stretch), i.e. to the change of the magnitude of the muscle force (Fig. 73).

They are connected to afferent (sensory) fibers of type Ib; they do not have efferent innervation.

Do not confuse with the Golgi body (Golgi Apparatus) in cells!



Janura, Fig. 71 Scheme of muscle innervation - reflex arc (adjusted Hamill & Knutzen, 1995)

Typy nervových vláken a rychlost vedení akčního potenciálu

Základní typy neuronových vláken a rychlost vedení vzruchu jsou uvedeny v tabulce 9.

<i>Typ vlákna</i>	<i>Inervace</i>	<i>Průměr vlákna (μm)</i>	<i>Rychlost vedení vzruchu ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)</i>
- motoneurony			
Eferentní			
A α	kosterní sval	15	100
A β	kosterní sval, svalové vřetenko	8	50
A γ	svalové vřetenko	5	20
B	sympatikus – pregangliová vlákna	3	7
C	sympatikus – postgangliová nemyelinizovaná vlákna	1	1
Aferentní - senzorická			
Ia	svalové vřetenko	13-20	80-120
Ib	Golgiho tělísko	13-20	80-120
II	svalové vřetenko	6-12	35-75
III	tlakové senzory ve svalu, ostatní mechanorecepce	1-5	5-30
IV	bolest (nemyelinizovaná), teplota	0,2-1,5	0,5-2

Janura, Tab 9

Types of nerve fibers and of the action potential conduction velocity

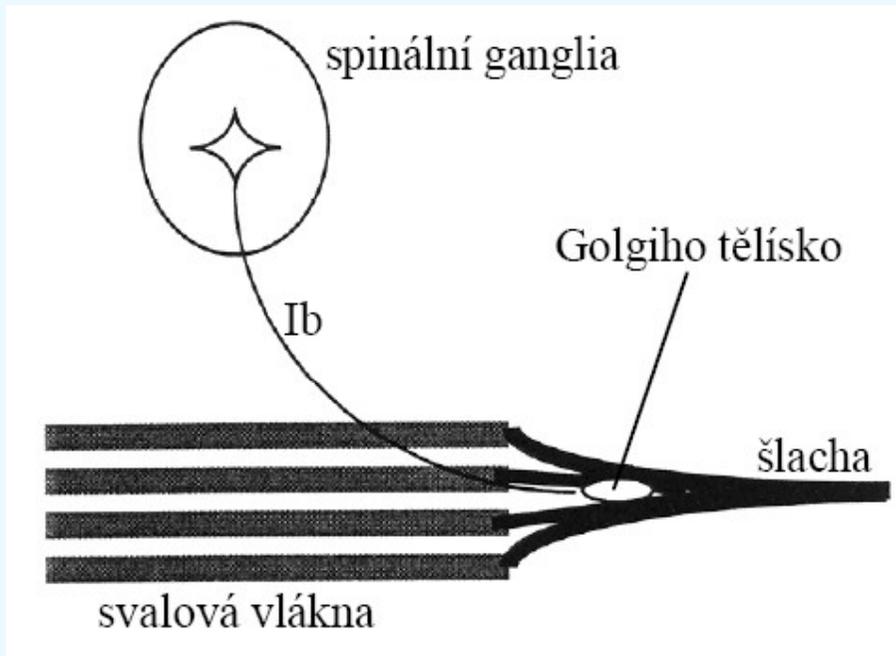
Basic types of neural fibers and conduction velocity are shown in Table 9.

Fiber type	Innervation	Diameter (μm)	Conduction velocity (m/s)
Efferent	Motor neurons		
Aα	Skeletal muscle	15	100
Aβ	Skeletal muscle, muscle spindle	8	50
Aγ	Muscle spindle	5	20
B	n. sympathetic – preganglionic fibers	3	7
C	n. Sympaticus – postganglionic nonmyelinated fibers	1	1
Afferent	Sensory neurons		
Ia	Muscle spindle	13-20	80-120
Ib	Golgi tendon organ	13-20	80-120
II	Muscle spindle	6-12	35-75
III	Pressure receptors in muscles, other mechanireception	1-5	5-30
IV	Pain (nonmyelinated fibers), temperature	0,2-1,5	0,5-2

Janura, Tab 9

Note: the sympathetic nervous system = nervous system acting on the internal organs of the body, it also regulates the nervous and hormonal stress (eg. the "fight or flight response"), pupils' dilatation, urination, etc.

Golgiho tělíska (zpětnovazebné receptory)



Janura Obr. 73 Umístění Golgiho tělíska v komplexu sval-šlacha (upraveno podle Watkins, 1999)

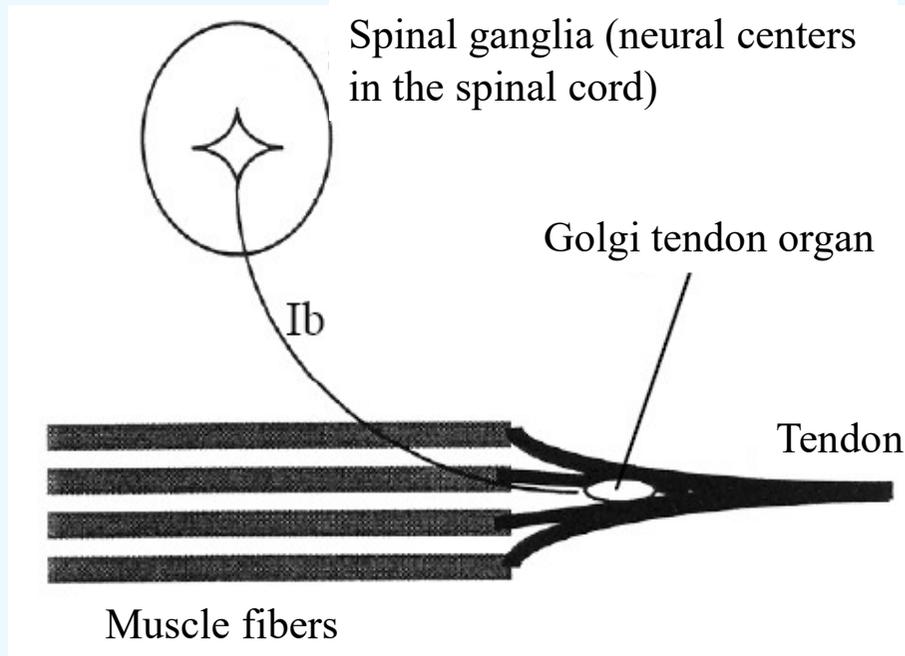
V porovnání se svalovými vřeténky je struktura Golgiho tělísek jednodušší. Obsahují jednoduchá aferentní spojení – vlákna typu Ib.

Golgiho tělíska jsou umístěna v sérii za skupinou extrafuzálních vláken a reagují na změny napětí, generované pouze těmito vlákny.

Je-li síla produkovaná vlákny, která leží mimo tuto oblast, aktivita Golgiho tělíska nenarůstá.

Vztah mezi nárůstem síly a „reakcí“ Golgiho tělíska není lineární. Na rozdíl od svalového vřeténka dochází k aktivaci tělíska i v případě zkrácení svalu.

Golgi tendon organ (feedback receptors)



Janura Fig. 73 Location of Golgi organ at the muscle-tendon boundary (modified after Watkins, 1999)

Compared to the muscle spindles, the structure of the Golgi tendon organ is simpler. There are simple afferent connections with fibers of type Ib.

Golgi tendon organs are placed in series with a group of extrafusal fibers and respond to force/tension changes generated only by these fibers.

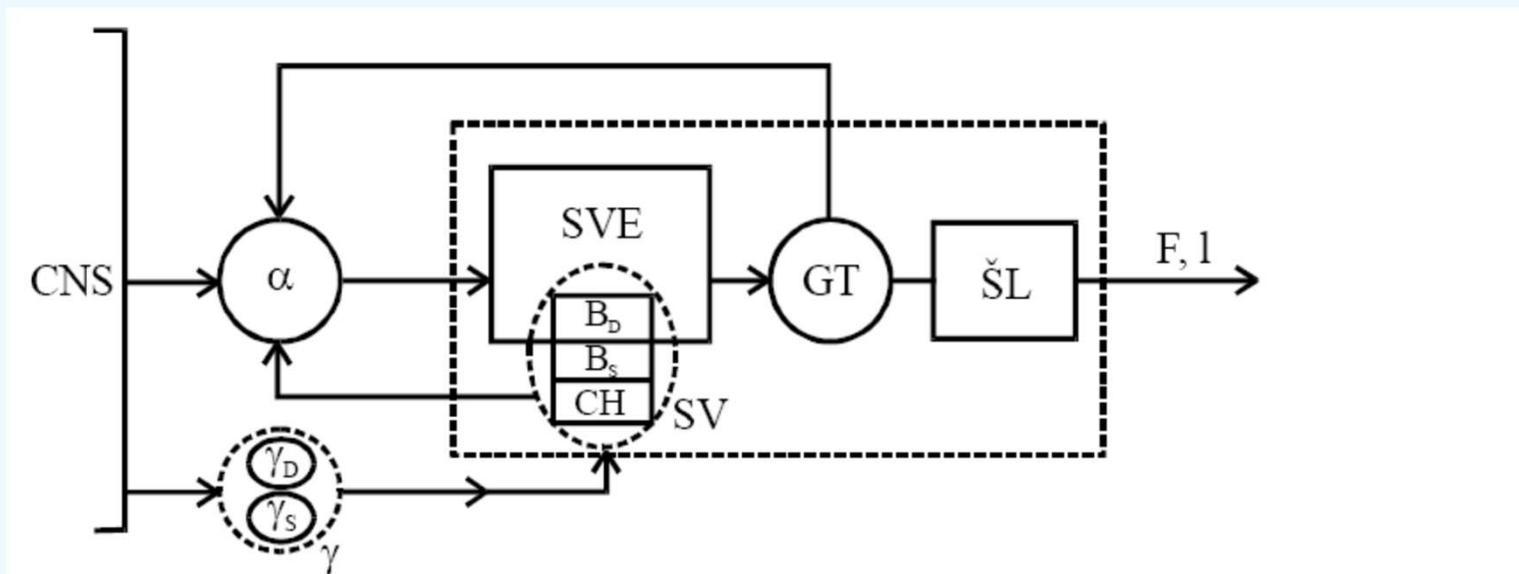
If some force is produced by fibers, which lie outside this locality, it is not reflected in the activity of the Golgi organ.

The relationship between the increase in force and "reaction" of the Golgi organ is not linear. In contrast to muscle spindle activation, Golgi activation occurs also when muscle is shortened.

Využití zpětnovazebných receptorů pro řízení svalové kontrakce

Viz Schéma

Pozn: Informace, které přicházejí z receptorů, nekončí pouze u motoneuronů předních rohů míšních, ale jsou předávány i do retikulární formace mozkového kmene, do mozečku, thalamu, mozkové kůry.

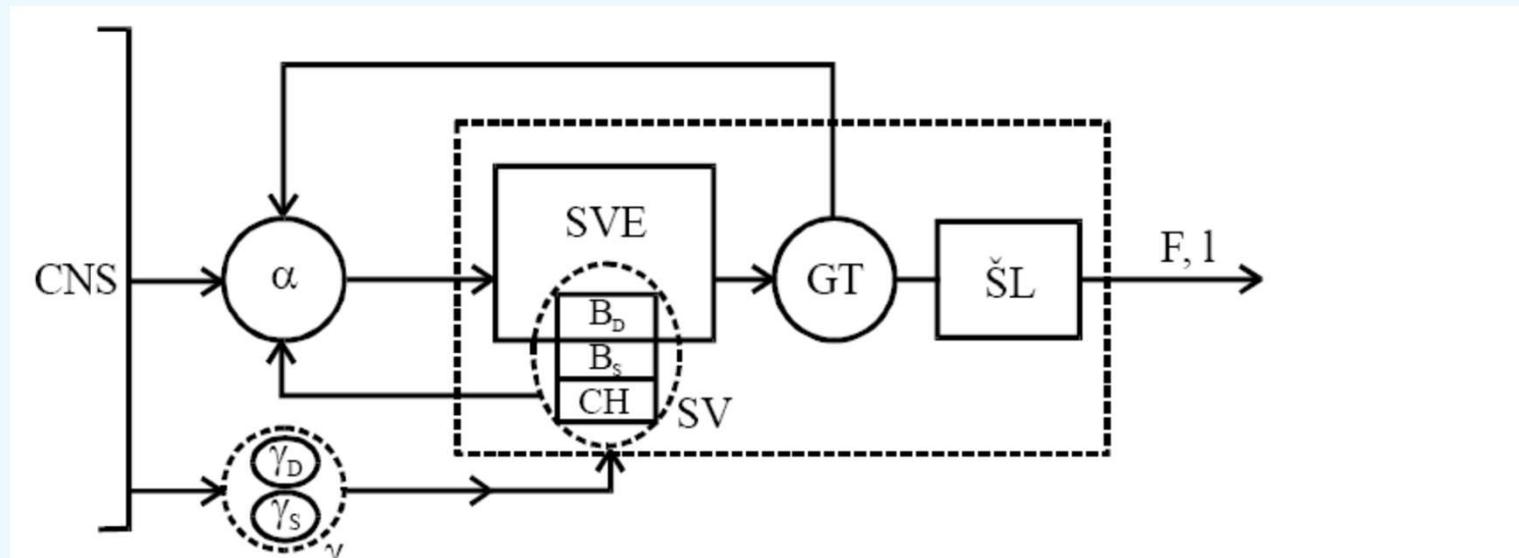


CNS – centrální nervový systém; α – motoneuronová inervační síť
 γ – systém; γ_D – dynamický γ -motoneuron; γ_S – statický γ -motoneuron
SVE – svalový efektor; SV – svalové vřetenko; GT – Golgiho tělísko; ŠL – šlacha
 B_D – BAG dynamická intrafuzální svalová vlákna
 B_S – BAG statická intrafuzální svalová vlákna
CH – CHAIN intrafuzální svalová vlákna; F – velikost výstupní síly; l – délka svalu

The use of feedback receptors for muscle contraction

See the diagram

Note: The information coming from the receptors, does not end only at the anterior horn motoneurons, but is passed also further in the CNS into the reticular formation of the brain stem, cerebellum, thalamus, cortex, etc.

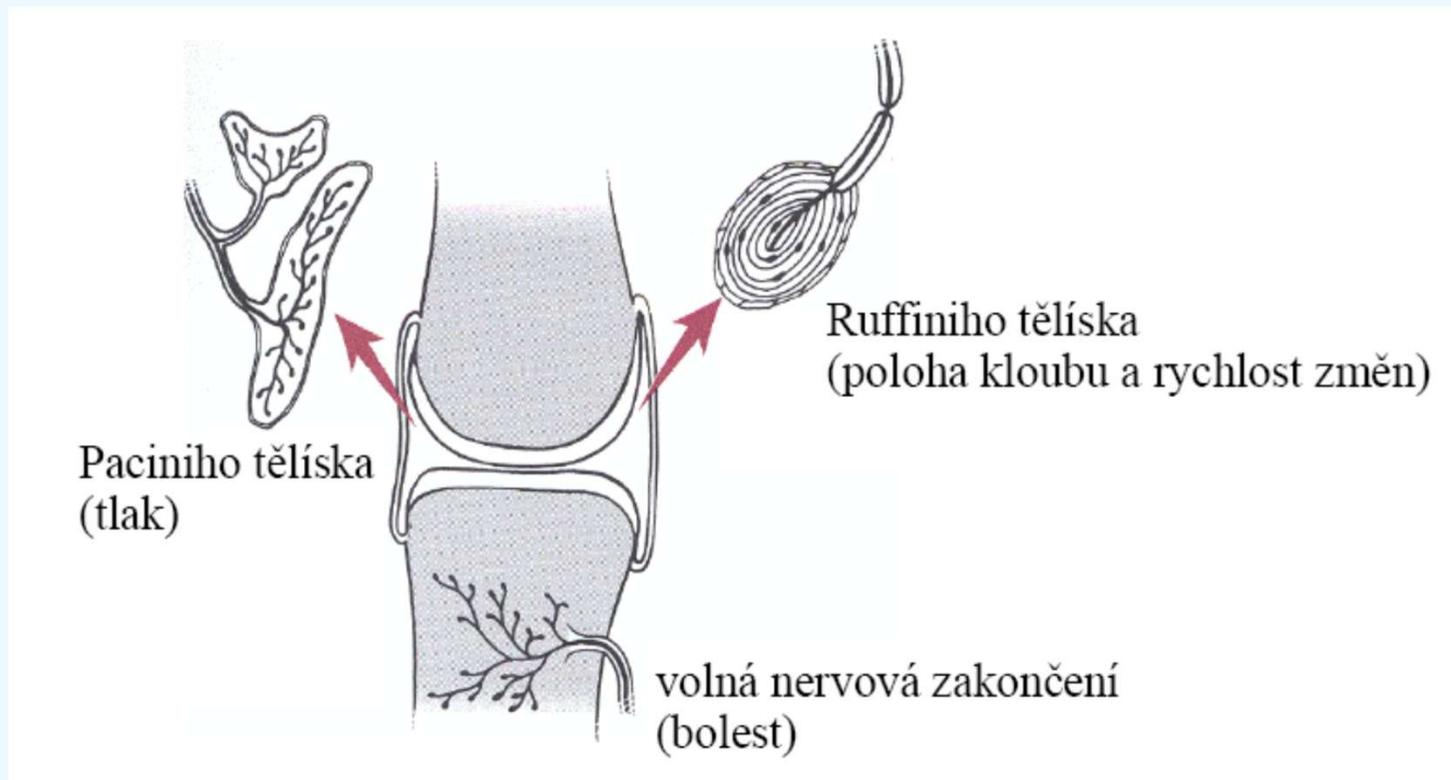


CNS – central nervous system, α - innervation network of motoneurons,
 γ - system (sensitivity regulator): γ_D – dynamic γ -motoneuron, γ_S – static γ -motoneuron,
 SVE – muscle effector, SV – muscle spindle, GT – Golgi tendon organ, $\check{S}L$ – tendon
 B_D – dynamic intrafusal muscle fibers,
 B_S – static intrafusal muscle fibers
 CH – CHAIN-type intrafusal muscle fibers; F – input force; l – muscle length

Janura, Fig. 74

Další receptory

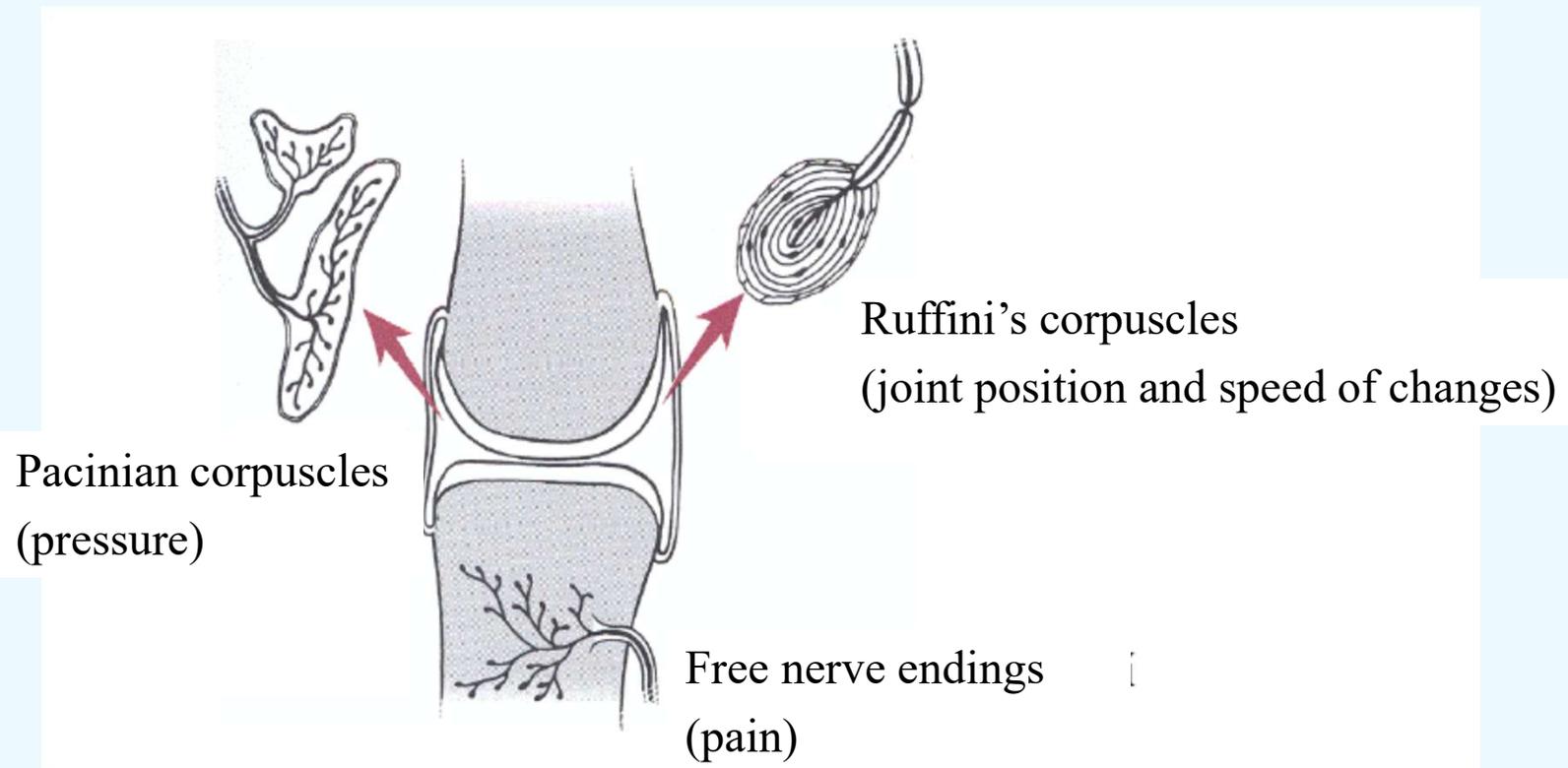
Další receptory, které přispívají k řízení činnosti svalů, jsou umístěné v kloubech a v kůži – **Paciniho tělíska** (v hluboké vrstvě kůže, reagují na dotek, tlak a vysokofrekvenční vibrace), **Meissnerova tělíska** (hlavně na prstech, důležitá pro hmat a nízkofrekvenční vibrace), **Ruffiniho tělíska** (hluboko v kůži a podkoží, reagují na natažení kůže a dlouhodobý tlak, vnímají polohu a rychlost pohybu kloubu – např. u prstů a ruky) a apod. (obr. 75).



Janura Obr. 75 Znárodnění kloubních a kožních proprioreceptorů umístěných v okolí synoviálního kloubu (upraveno podle Hamill & Knutzen, 1995)

Other receptors

Other receptors, which help to control muscle activity, are located in the joints and skin – **Pacinian corpuscles** (in the deep layer of the skin, responsive to touch, pressure and high-frequency vibration), **Meissner corpuscles** (mainly on fingers, touch receptors, also detect low-frequency vibration), **Ruffini's corpuscles** (deep in and under the skin, detect skin stretching and long-term pressure, sense position and velocity of joints – e.g., on fingers an hand), etc. (Fig. 75) .



Janura Fig. 75 Illustration of the receptors of the joints and skin placed around the location of a synovial joint (after Hamill & Knutzen, 1995)