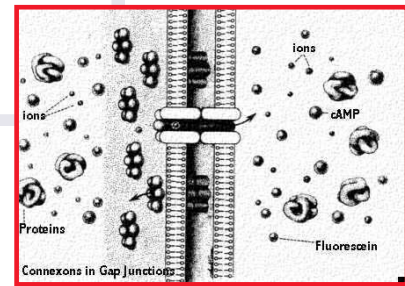
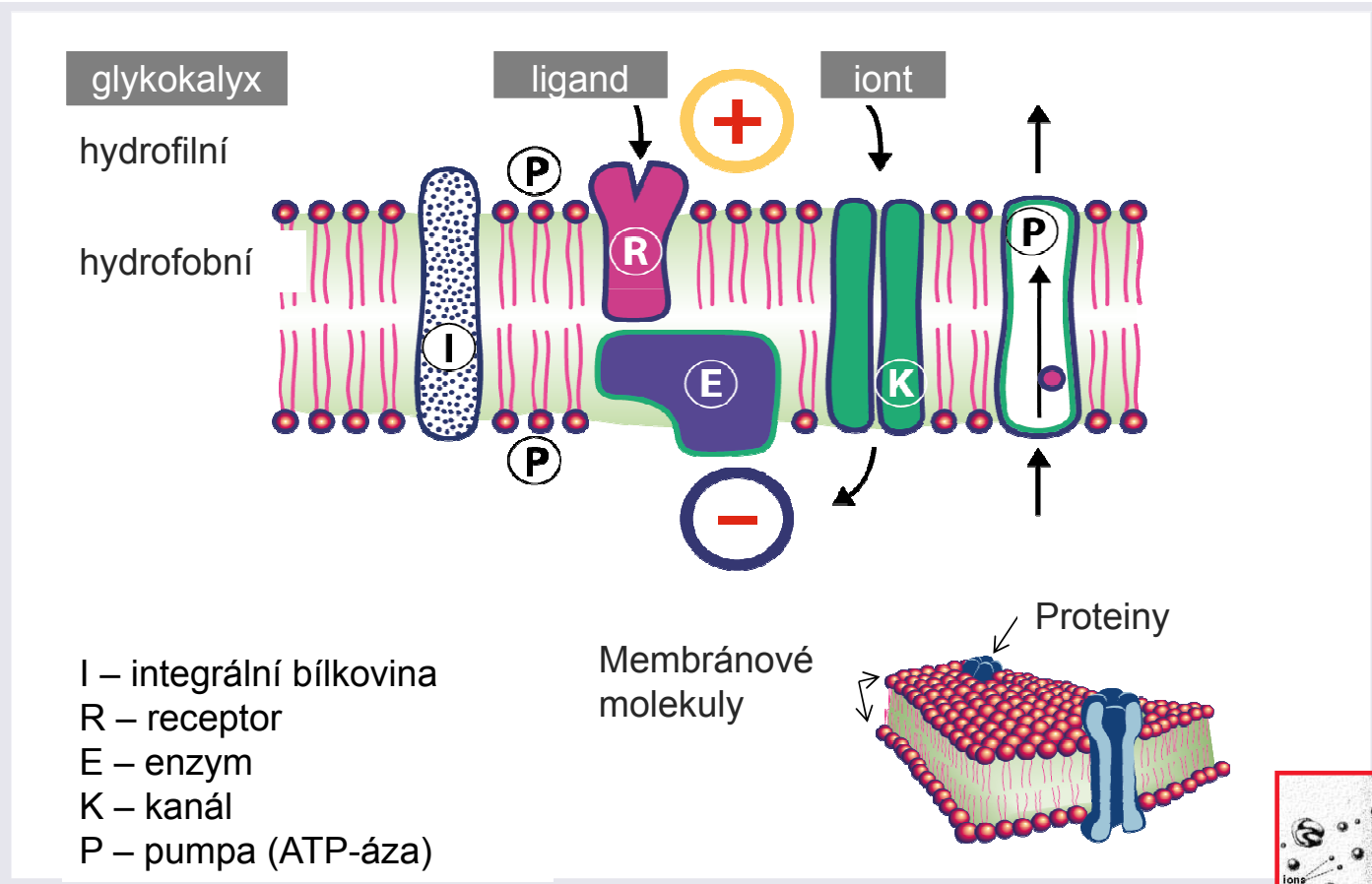


**MUNI
MED**

EXCITABILNÍ MEMBRÁNA.

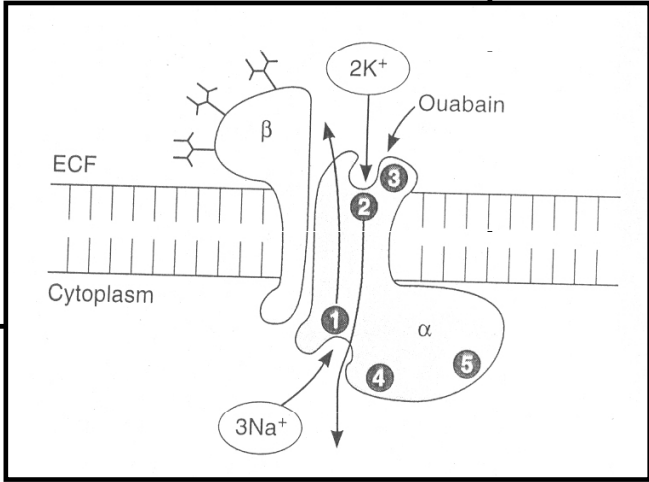
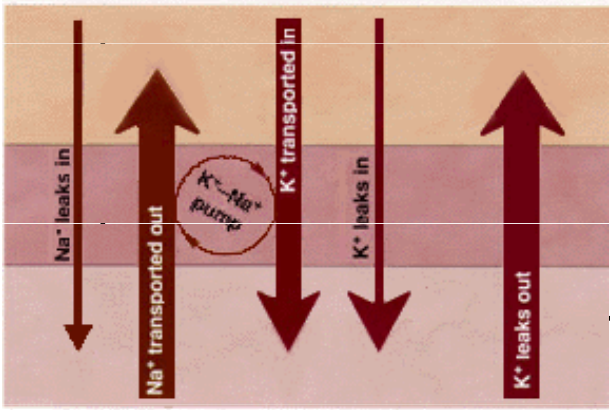
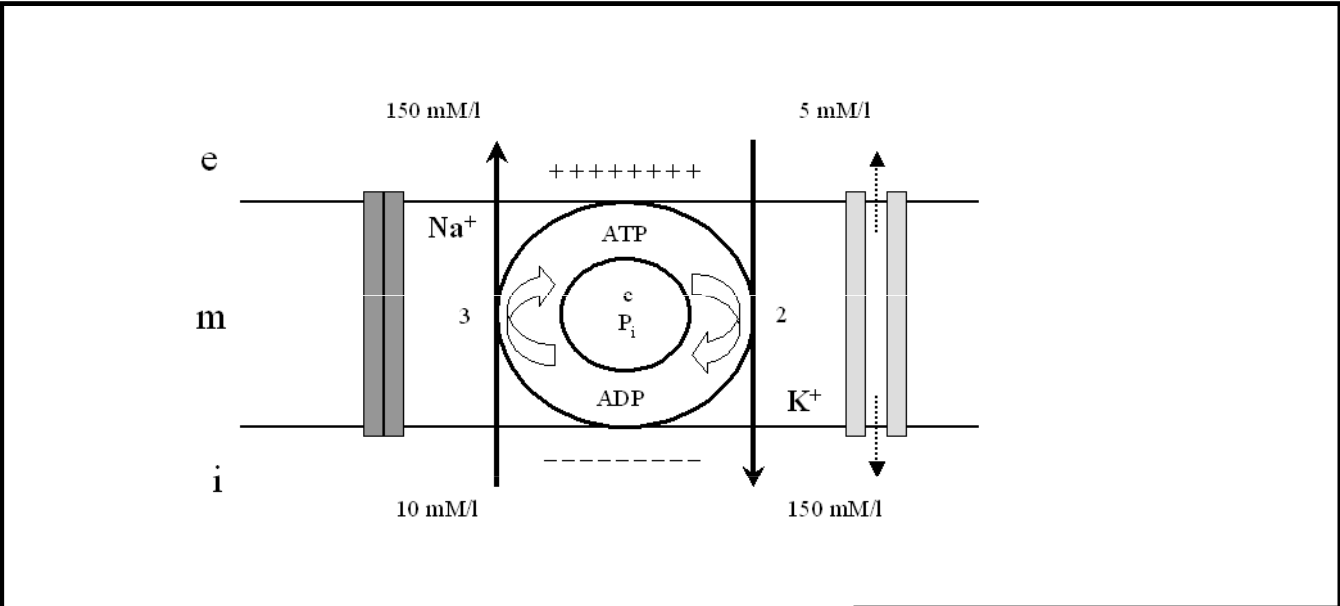
ELEKTRICKÝ PŘENOS INFORMACE.

PLAZMATICKÁ MEMBRÁNA



Nexus (gap junction) →

SODÍKO- DRASLÍKOVÝ VÝMĚNÍK



KLIDOVÝ MEMBRÁNOVÝ POTENCIÁL

Je výsledkem:

- ✓ **rozdílné propustnosti buněčné membrány pro ionty sodíku (Na^+) a draslíku (K^+)**
- ✓ **přítomnosti sodíko-draslíkové pumpy v buněčných membránách, která toto nerovnoměrného rozložení iontů intracelulární a extracelulární tekutiny podporuje**

Fenomény uplatňující se při klidovém membránovém potenciálu

- ✓ Malá propustnost (permeabilita) membrány pro Na^+
- ✓ Vysoká permeabilita membrány pro K^+
- ✓ Primárně aktivní transport: Na^+ ven z buňky a K^+ do buňky (dáno přítomností Na^+ - K^+ ATPázy, v poměru: 3 Na^+ ven / 2 K^+ dovnitř)
- ✓ **Uvnitř buňky zůstávají anionty bílkovin a fosfátů**

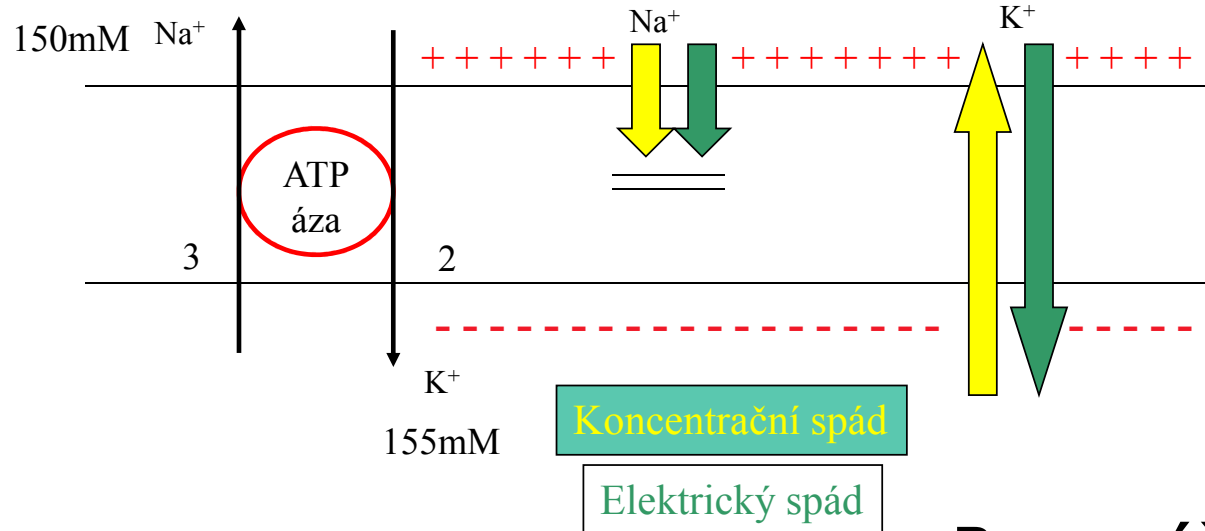
(díky tomu měříme elektrické napětí mezi vnějškem a vnitřkem buňky)

uzavíráme, že :

Buněčná membrána je v klidu

POLARIZOVÁNA

KLIDOVÉ MEMBRÁNOVÉ NAPĚTÍ



Nernstova rovnice:

$$E_x = \frac{R \cdot T}{F} \ln \frac{(C_{x_{out}})}{(C_{x_{in}})}$$

$$I_x = g_x \cdot (E - E_x)$$

Rovnovážný potenciál

$$E_{Na} = +40 \text{ mV}$$

$$E_K = -90 \text{ mV}$$

$$E_{Cl} = -70 \text{ mV}$$

$$E_{Ca} = +60 \text{ mV}$$

$$E_r = -85 \text{ mV}$$

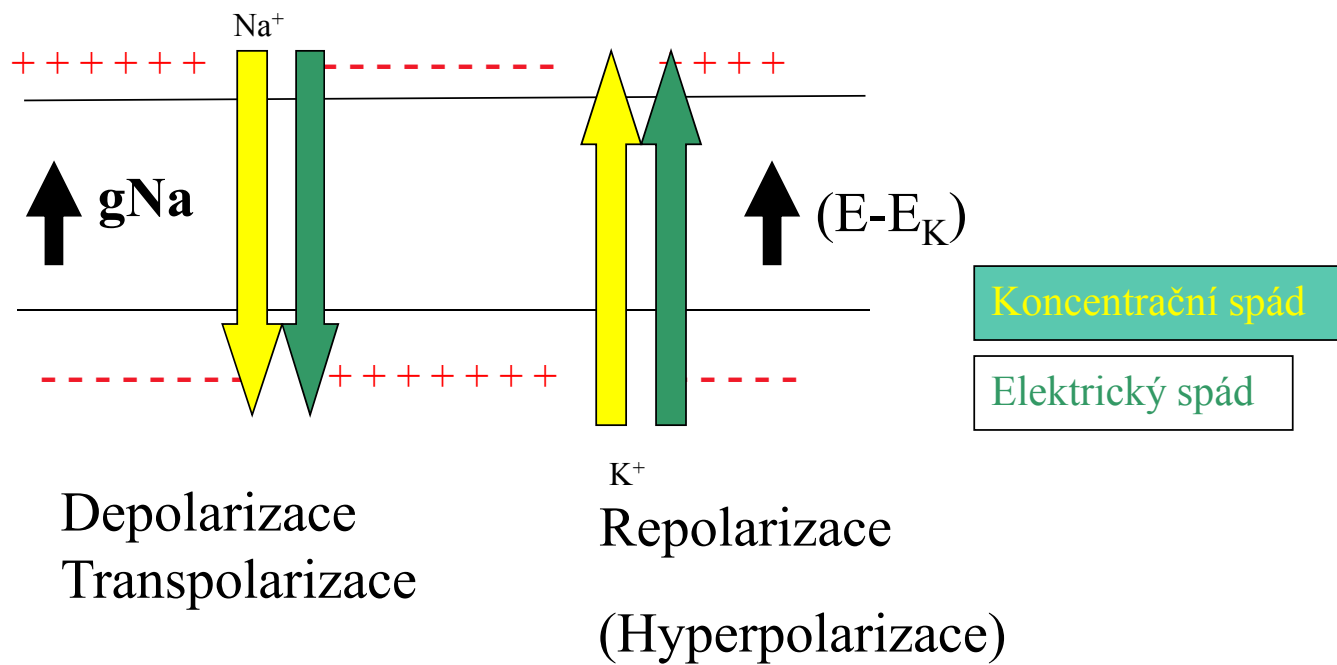
MUNI
MED

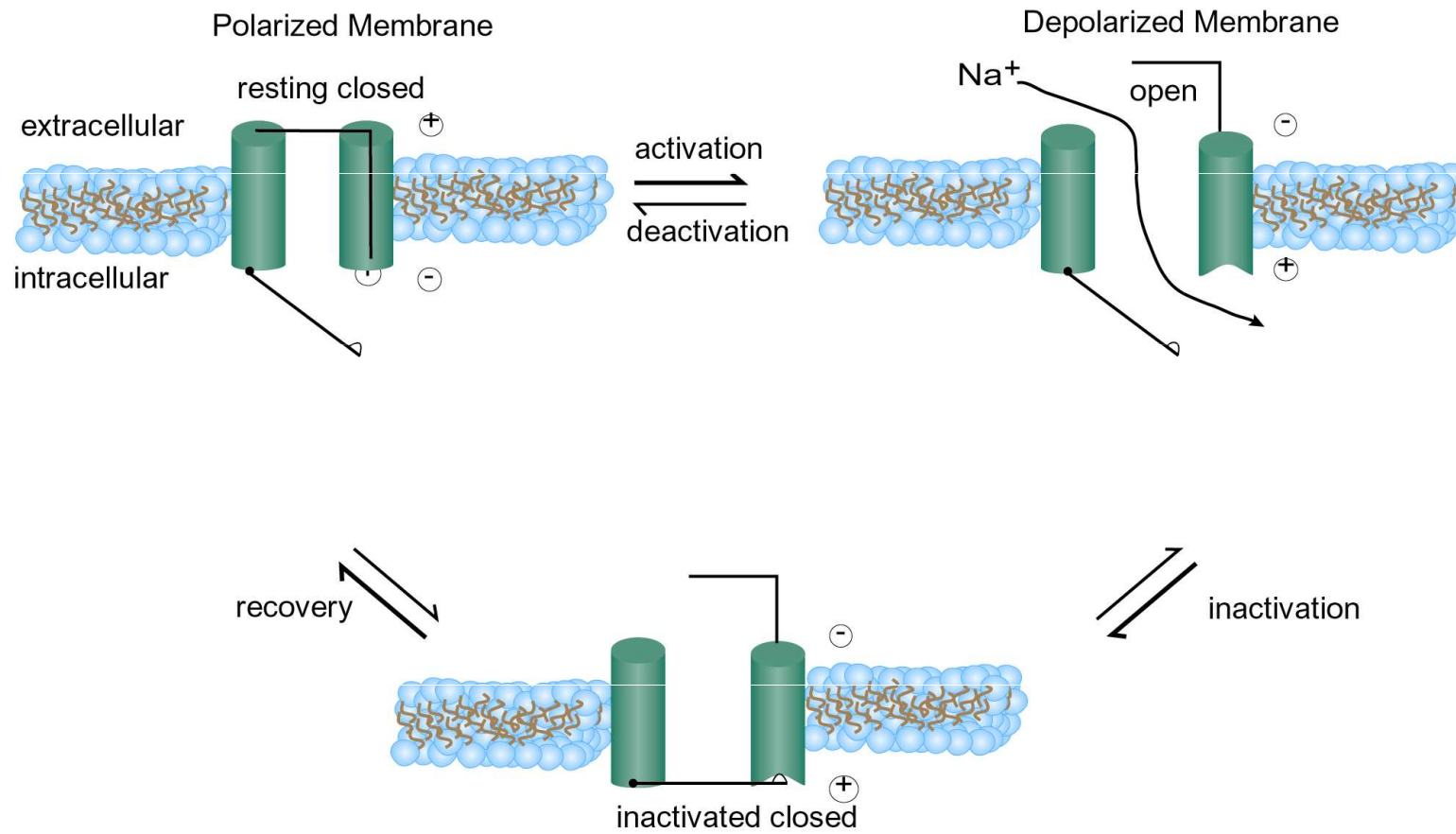
- Pro jednotlivé ionty jsme schopni vypočítat tzv. ROVNOVÁŽNÝ potenciál podle NERNSTOVY ROVNICE
- V této souvislosti se nejvíce mluví o draslíku, protože jeho rovnovážný potenciál se nejvíce blíží hodnotě klidového membránového potenciálu
($E_k = -88 \text{ mV}$)
- E_k – rovnovážný potenciál draslíku znamená, že síla pohánějící difuzi K^+ ven (chemický gradient) je právě tak velká jako síla potenciálu působícího v opačném směru (elektrický gradient)
- pro sodík: $E_{Na} = + 40 \text{ mV}$

Fyziologický význam klidového membránového napětí

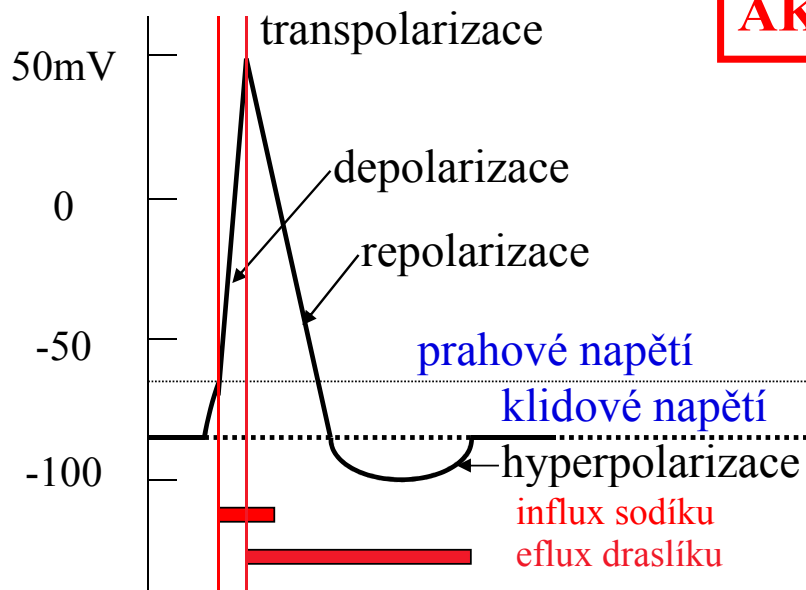
- Buňky jej užívají k regulaci svých fyziologických funkcí k nimž patří:
 - ✓ propustnost membrán svalových a nervových buněk pro ionty
 - ✓ intracelulární uvolňování vápníku pro svalovou kontrakci
 - ✓ uvolňování nervových přenašečů v nervovém systému

AKČNÍ NAPĚTÍ



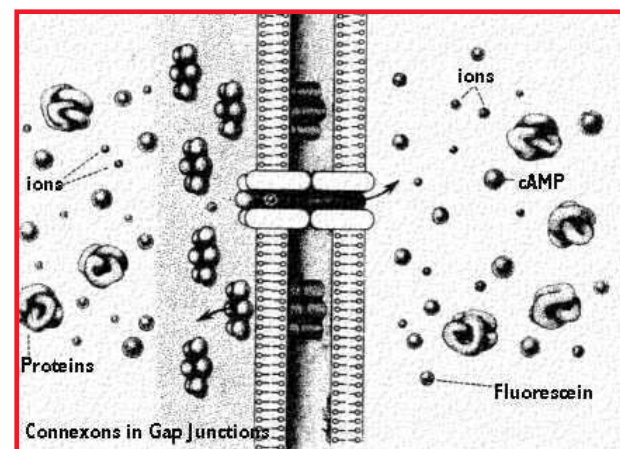
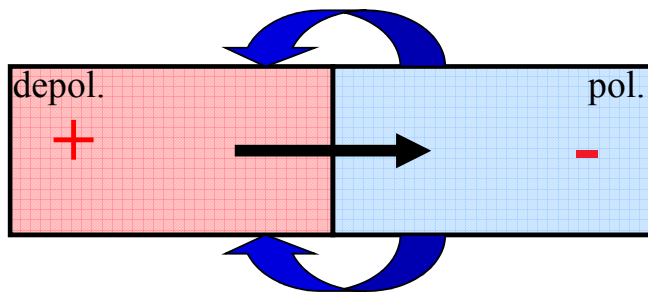


AKČNÍ NAPĚTÍ



- Jednotka vzruchové aktivity
- Reakce „Vše nebo nic“
- Šíření bez dekrementu („domino efekt“)
- **Refrakterita**

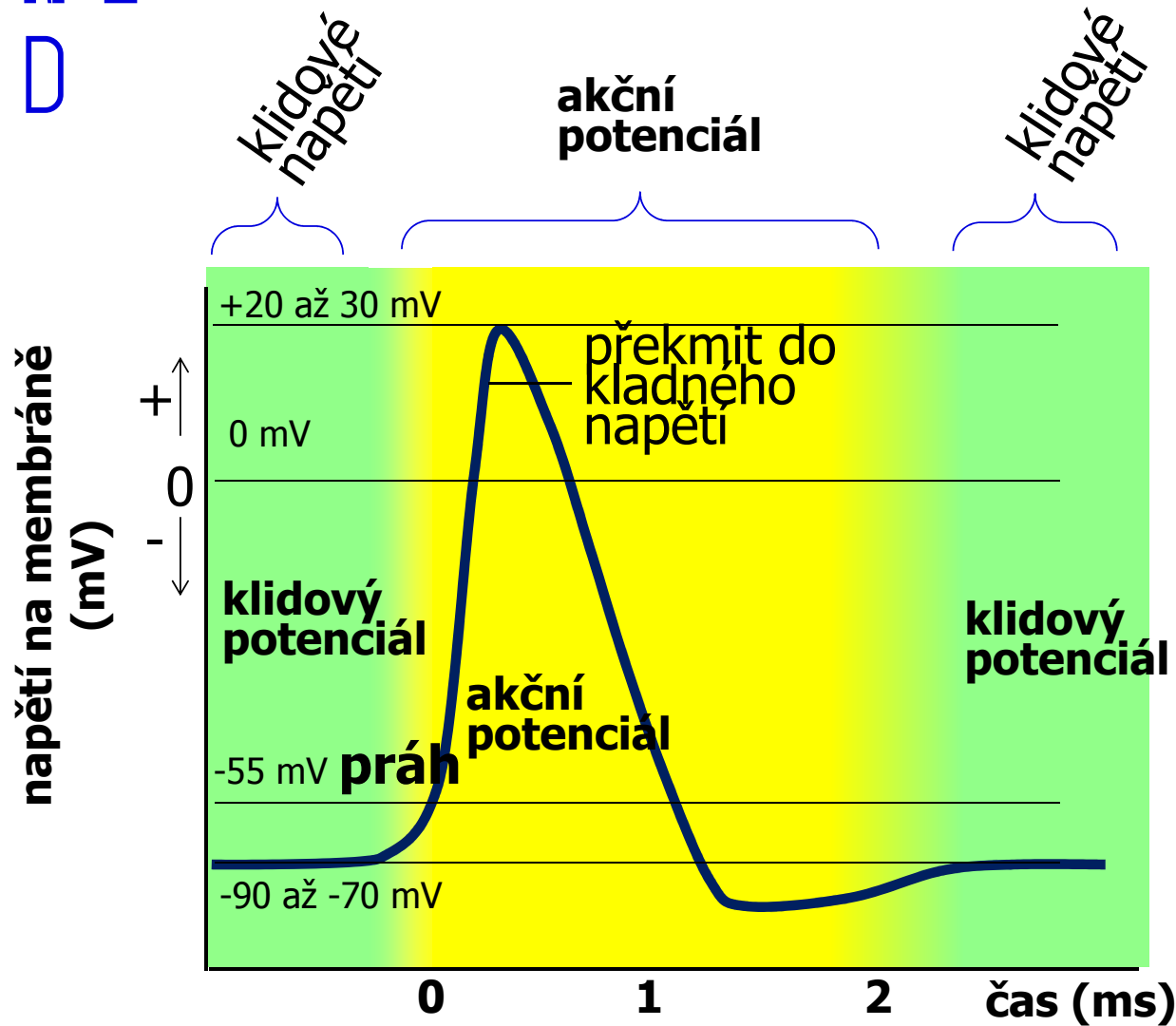
Lokální proud



Šíření s dekrementem

M U N I K l i d o v é n a p ě t í a a k č n í p o t e n c i á l

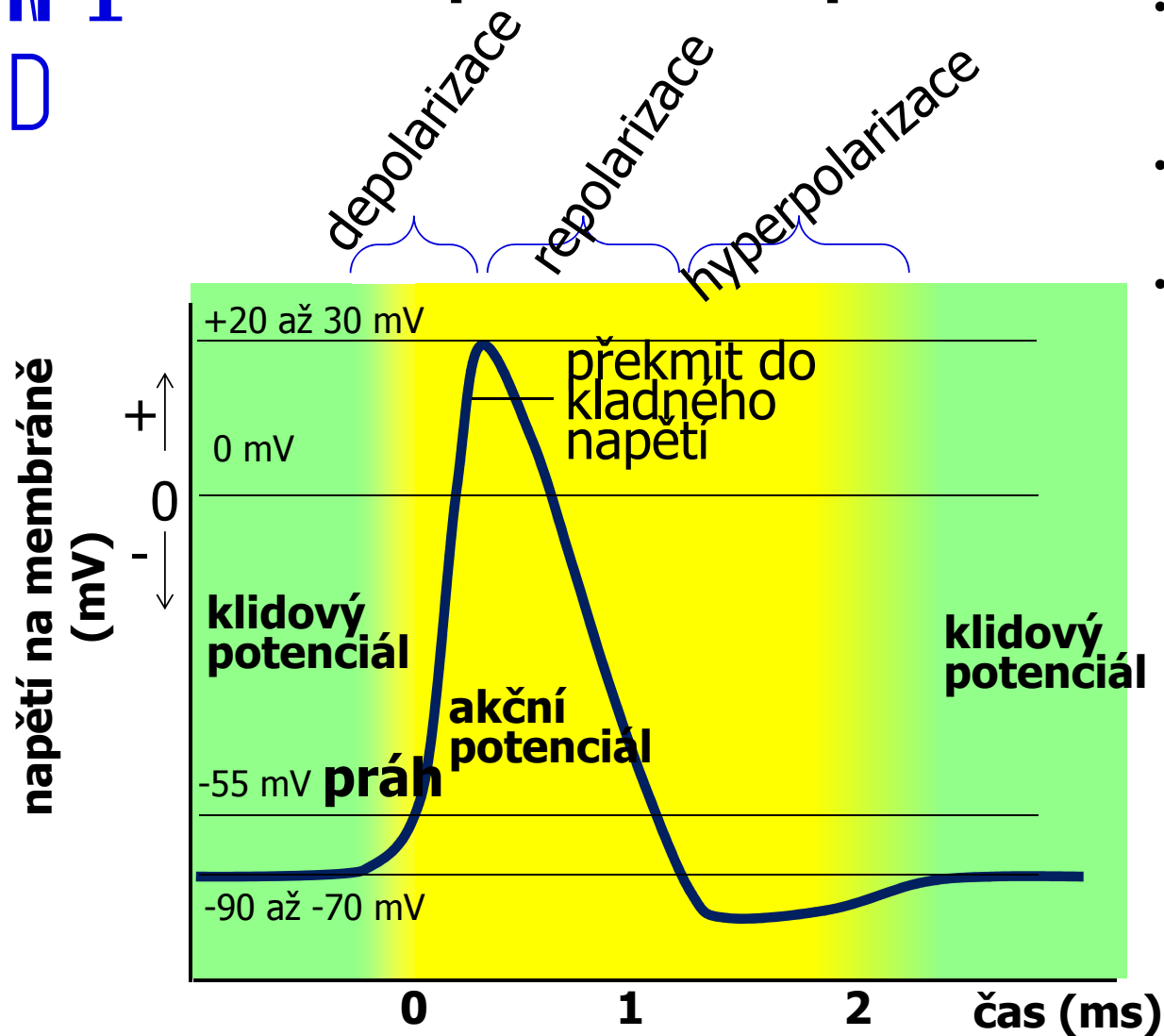
M E D



Klidové napětí:

- na membráně buňky za klidových podmínek
- uvnitř buňky je záporný náboj, na povrchu buňky je kladný náboj
- buňka je nepropustná pro Na^+
- uvnitř buňky je větší koncentrace K^+ , mimo buňku je větší koncentrace Na^+
- koncentrace K^+ uvnitř je menší než koncentrace Na^+ vně → záporný náboj uvnitř buňky

Klidové napětí a akční potenciál



Akční potenciál (AP)

- Pokud je překročena prahová hodnota napětí (-55 mV), vzniká na membráně akční potenciál
- **Fáze depolarizace**
 - otevírají se kanály pro Na⁺
 - Na⁺ vstupuje do buňky
- Zákon vše nebo nic – nepřekročí-li se práh, žádný AP, překročí-li se práh – vzniká AP
- **Fáze repolarizace**
 - kanály pro Na⁺ jsou znovu zavřeny (velmi rychle se inaktivují)
 - K⁺ vystupuje z buňky
- Na⁺ je pumpován ven, K⁺ je pumpován dovnitř
- Napětí se dostává zpět ke klidovým hodnotám

AKČNÍ POTENCIÁL (AP)

- **Podrážděním vzrušivých buněk** (svalových nebo nervových) se klidové membránové napětí může změnit v **AKČNÍ napětí**
- AP vzniká podle **zákona: „vše nebo nic“**
 - k jeho vzniku je potřeba dostatečně silného podnětu (tzv. **nadprahový podnět**)
 - jeho další **šíření** probíhá **bez ztráty** jeho velikosti

Fyziologický význam akčního potenciálu

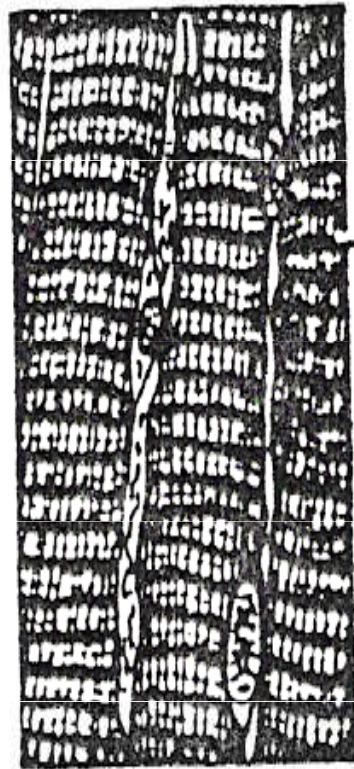
- změnou klidového membránového potenciálu v akční potenciál se:
 - ✓ kódují a přenášejí informace v živých systémech (nervová soustava)
 - ✓ spouští se svalová kontrakce (svalstvo)

Stavba a funkce	hladký sval	srdeční sval (příčně pruhovaný)	kosterní sval (příčně pruhovaný)
motorická ploténka	žádná	žádná	ano
vlákna	fuziformní, krátká (max. 0,2 mm)	větvená	cylická, dlouhá (max. 15 cm)
mitochondrie	nečetné	četné	nečetné (v závislosti na typu svalu)
buněčné jádro/vláknko	1	1	četná
sarkomera	žádná	ano, délka max. 2,6 μm	ano, délka max. 3,65 μm
elektrické spřažení	částečně (jednotkový typ)	ano (funkční syncytium)	ne
sarkoplazmatické retikulum	málo vyvinuté	přiměřeně vyvinuté	silně vyvinuté
Ca ²⁺ „spínač“	kalmmodulin/kaldesmon	troponin	troponin
pacemaker	zčásti spontánně rytmicky činný (1 s ⁻¹ –1h ⁻¹)	ano (sinoatriální uzel asi 1 s ⁻¹)	ne (nutný nervový podnět)
odpověď na podnět	změna tonu nebo frekvence rytmu	„vše nebo nic“	odstupňovaná
tetanizovatelný	ano	ne	ano
pracovní rozsah	křivka délka/síla je proměnlivá	na vzestupu křivky síla/délka (viz tab. 2.15 E)	v maximu křivky síla/délka (viz tab. 2.15 E)

odpověď na podnět	hladký sval	srdeční sval	kosterní sval
potenciál			
napětí svalu			



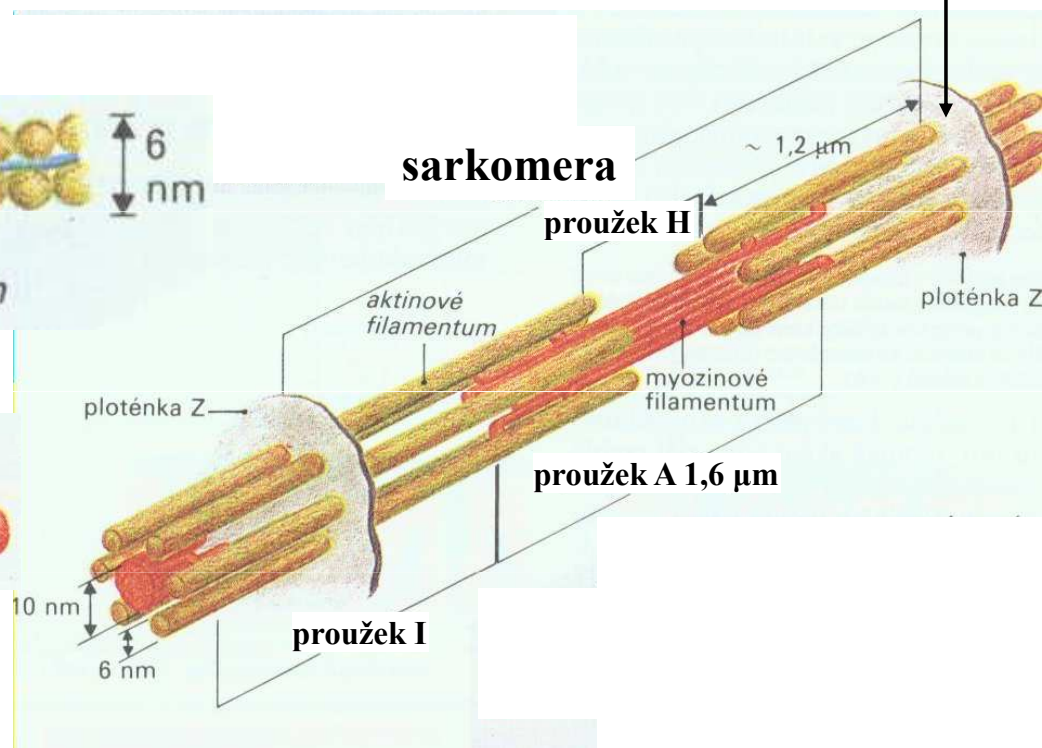
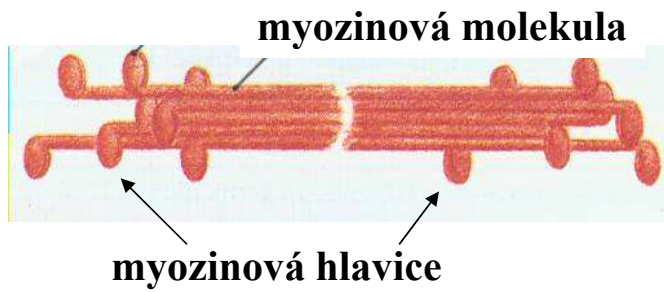
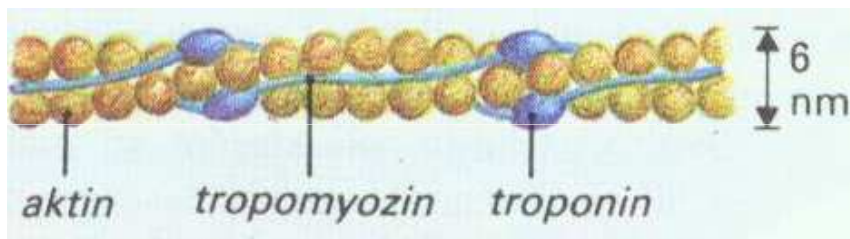
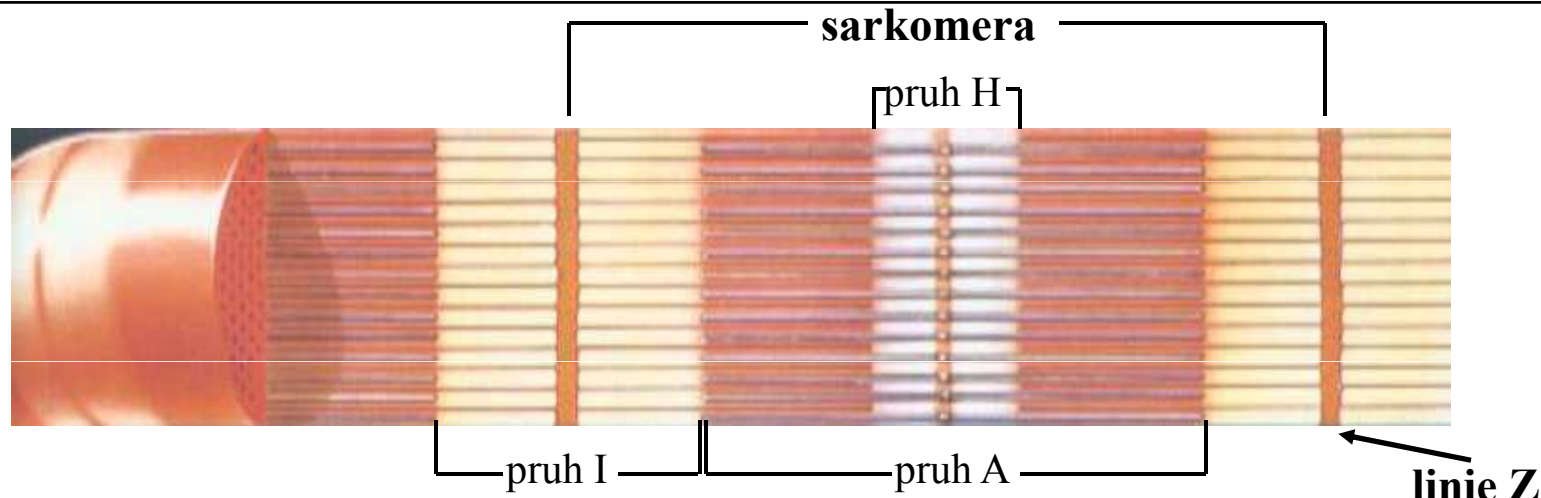
A



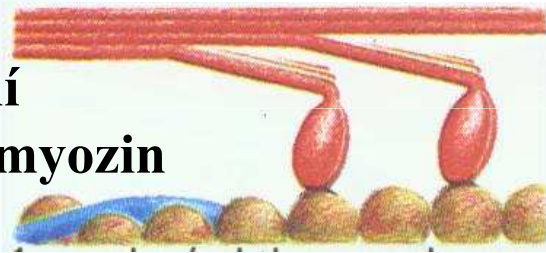
B



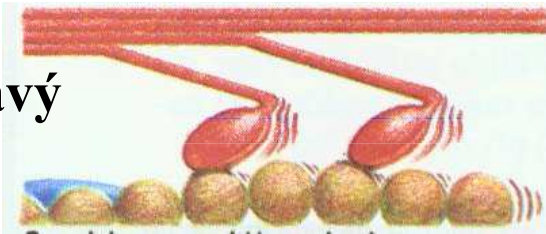
C



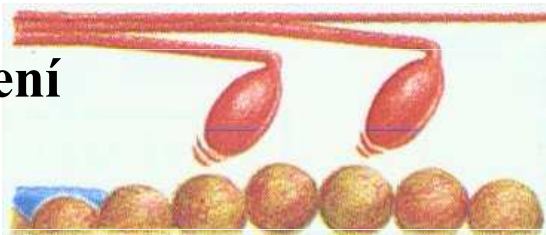
**spojení
aktin-myozin**



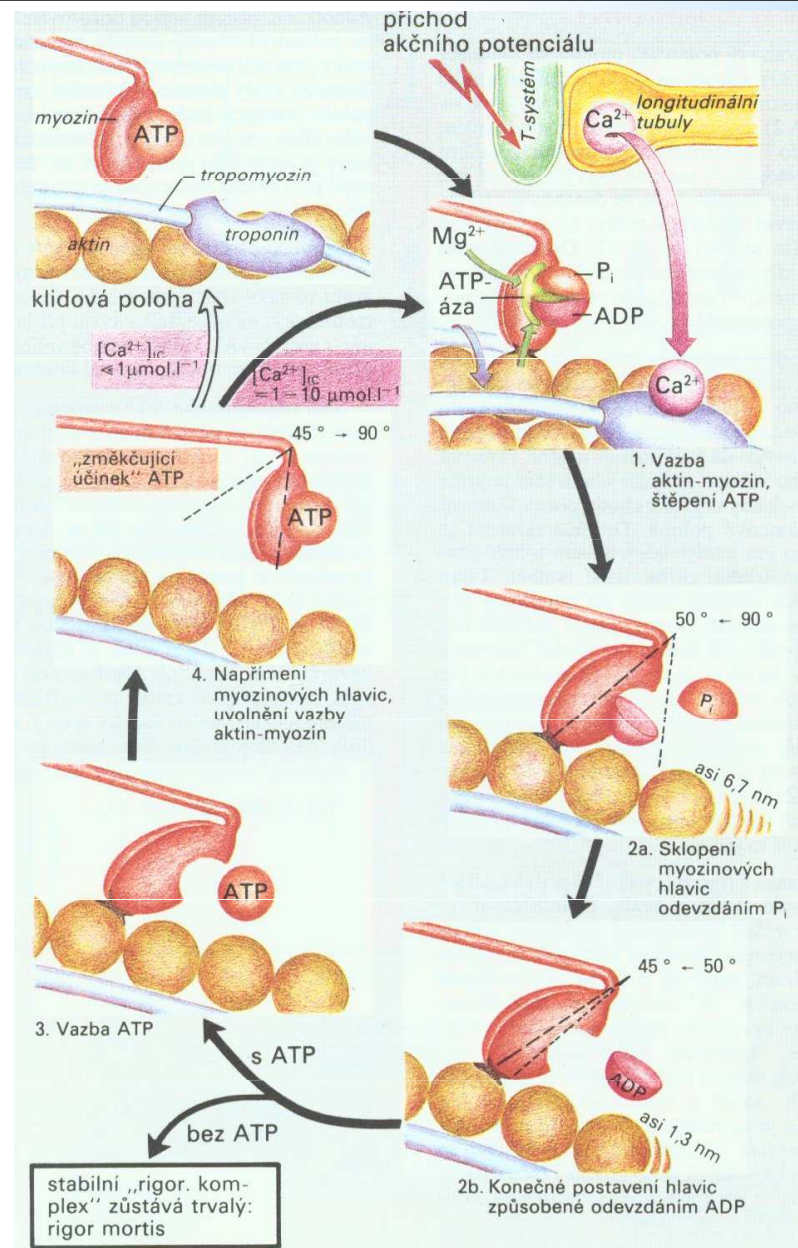
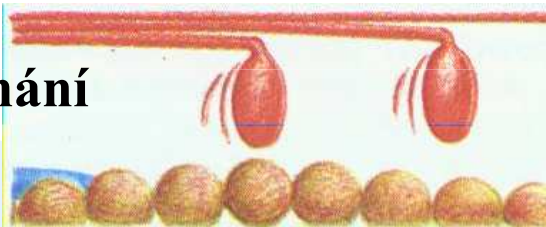
**klouzavý
pohyb**



**odpojení
hlavic**



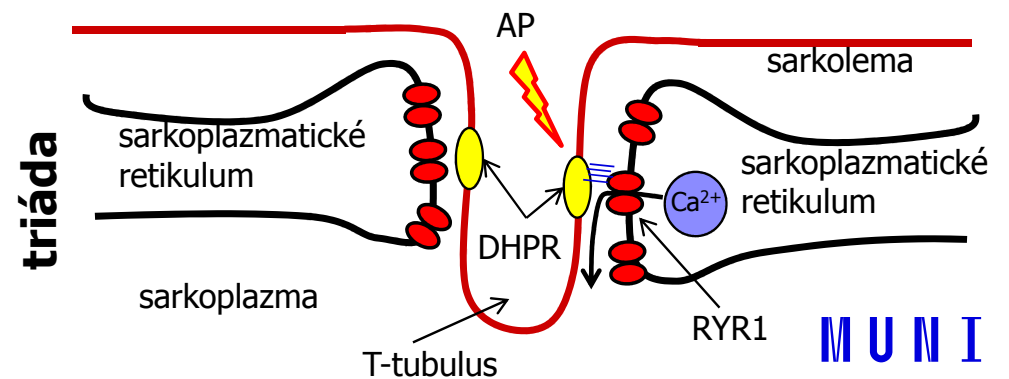
**narovnání
hlavic**



Vztah excitace – kontrakce u kosterního svalu

Excitace

- Akční potenciál (AP) se šíří axonem z alfa-motoneuronu k nervo-svalové ploténce.
- Na membráně axonálního zakončení se z vezikul exocytózou uvolní acetylcholin do synaptické štěrbině.
- Acetylcholin se naváže na N-cholinergní receptory v postsynaptické (sarkoplazmatické) membráně.
- Cholinergní receptory jsou spojené s Na^+ kanálem, který se při navázání acetylcholinu otevírá.
- Dochází ke vtoku Na^+ do sarkoplazmy a k lokální depolarizaci sarkoplazmatické membrány → vzniká ploténkový potenciál.
- Pokud nedojde k překročení prahové hodnoty depolarizace pro vznik AP na membráně svalového vlákna, ploténkový potenciál zanikne.
- Sumací více příchozích AP z motoneuronu dojde k sumaci dílčích ploténkových potenciálů, je překročen práh pro AP a otevírají se napěťově vrátkované kanály pro Na^+ .
- Vzniká AP, který se šíří po svalovém vlákně.

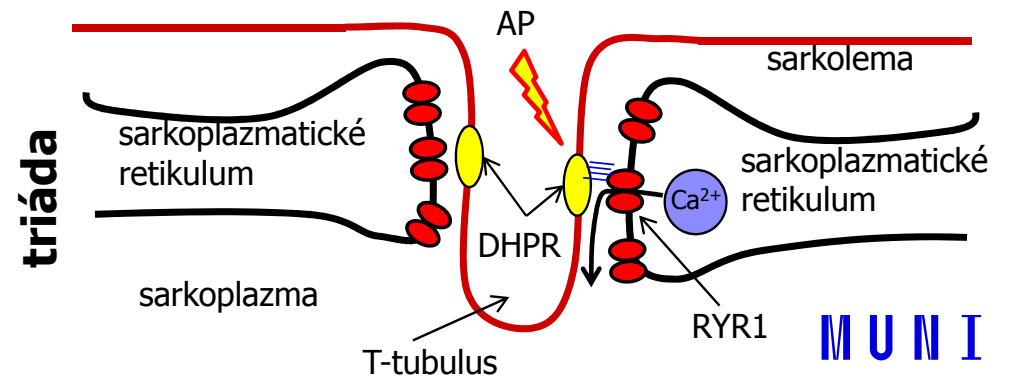


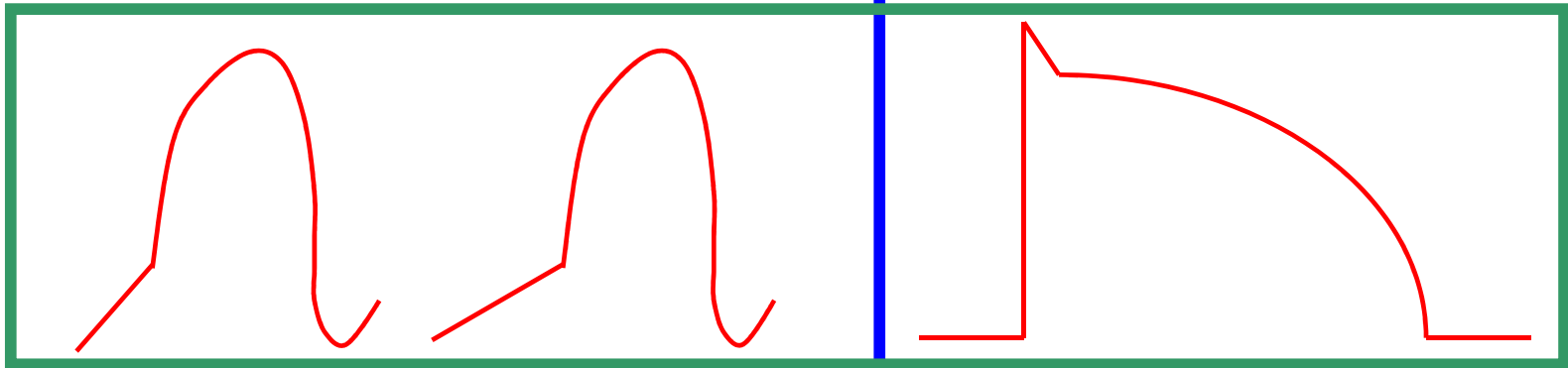
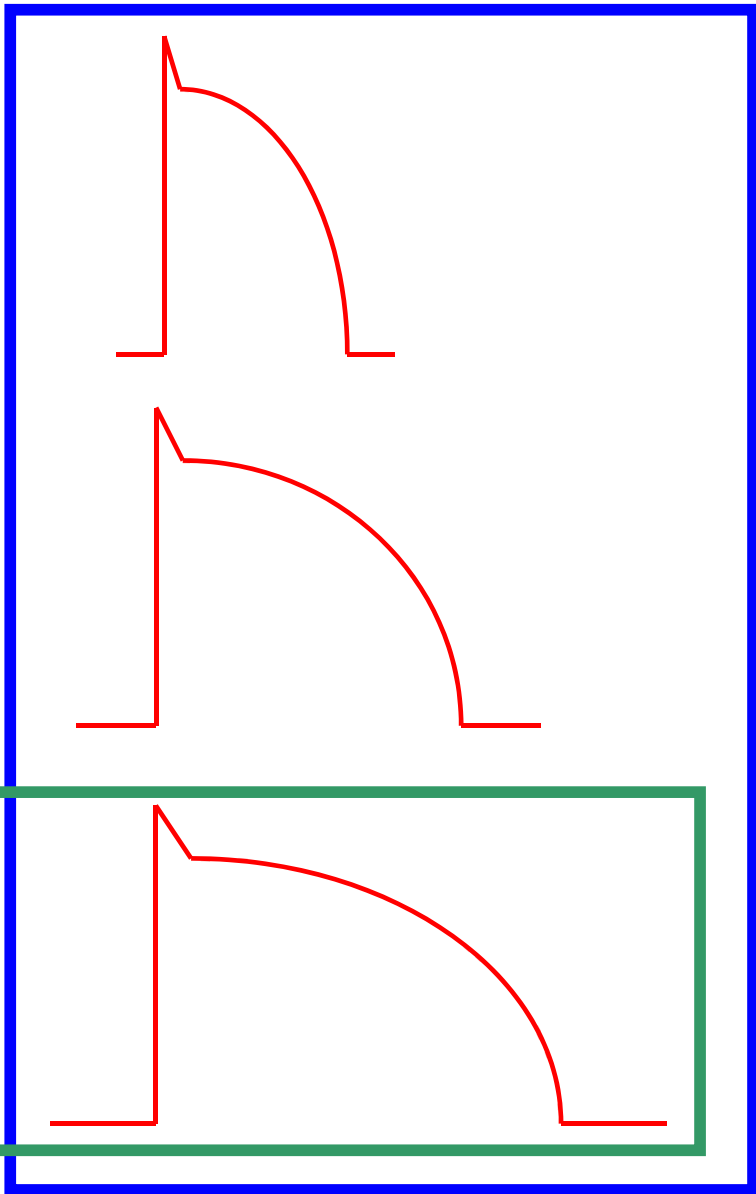
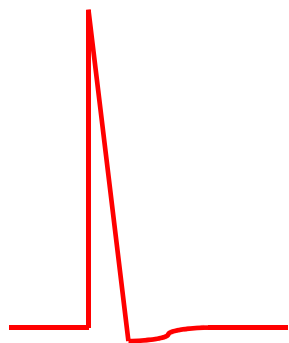
Vztah excitace – kontrakce u kosterního svalu

Kontrakce

- Akční potenciál (AP) se šíří po svalovém vláknu a dostává se do transverzálního tubulu (T-tubulus)
- V sarkolemě v T-tubulu jsou dihydropyridinové receptory (DHPR), které změnou své konformace
- Interakcí DHPR s ryanodinovými receptory (RYR1) na membráně sarkoplazmatického retikula dochází k otevření vápníkových kanálů
- Vstup Ca^{2+} do sarkoplazmy
- Navázání Ca^{2+} na troponin C - na aktinu se odkryjí vazebná místa pro hlavice myozinu
- Navázání myozinových hlavic na vazebná místa na aktinu (aktin má k myozinu velkou afinitu), ohyb myozinového krčku za spotřeby ATP a posun myozinového vlákna po aktinu
- Pro uvolnění myozinové hlavice od aktinu je třeba ATP
- Dokud je přítomen Ca^{2+} a ATP v cytoplazmě, cyklus posunu myozinových vláken po aktinových pokračuje
- Kontrakce je ukončena, pokud klesne koncentrace Ca^{2+} v cytoplazmě (Ca^{2+} je přečerpán z cytoplazmy Ca-ATPázou do sarkoplazmatického retikula)

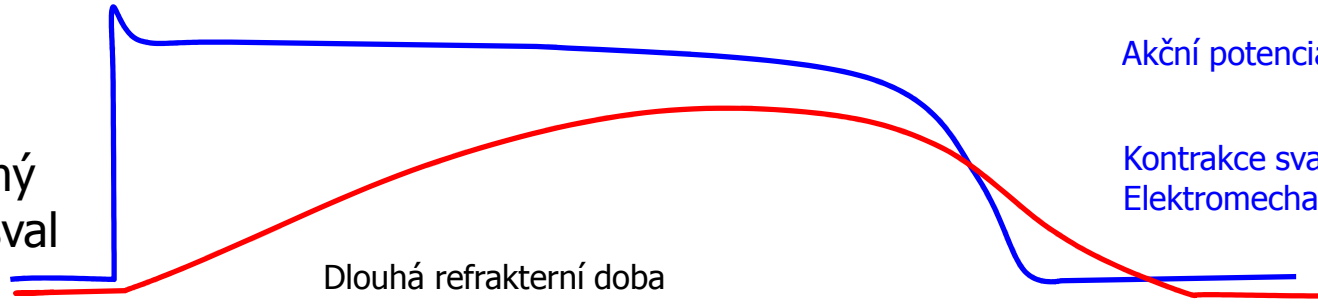
Rigor mortis (posmrtná ztuhlost) – kvůli nedostatku ATP nedochází k odčerpání vápníku z cytoplazmy pomocí Ca-ATPázy
→ vznik pevné vazby aktinu a myozinu (ATP je potřeba také pro vyvázání hlavice myozinu z aktinu)





Kosterní, srdeční a hladký sval – časové zarovnání AP a kontrakce

Příčně
pruhovaný
srdeční sval



Akční potenciál (AP): cca 250 ms

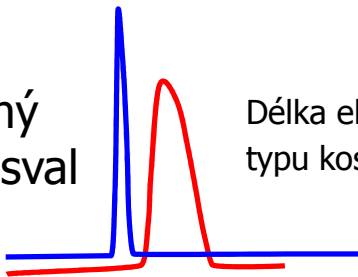
Kontrakce svalu: cca 250 ms

Elektromechanická latence (EML): do 10 ms

Dlouhá refrakterní doba

Délka AP a kontrakce závisí na srdeční frekvenci

Příčně
pruhovaný
kosterní sval



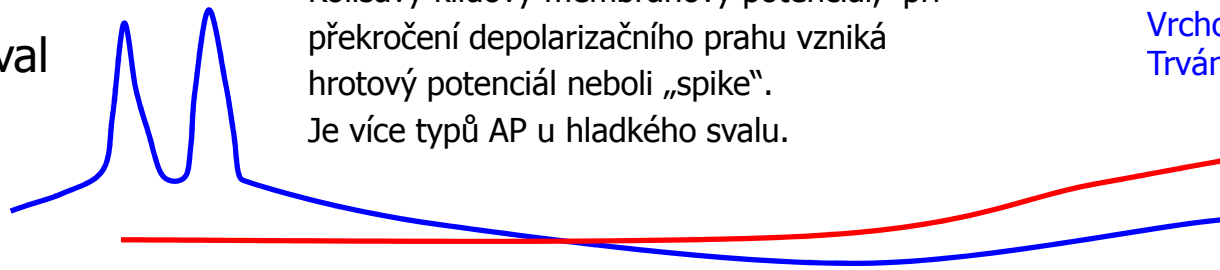
Délka elektromechanické latence a délka kontrakce závisí na
typu kosterního svalu (typ S nebo F)

AP: 5 ms

EML: do 10 ms

Trvání kontrakce: průměrně cca 20 ms
(8 - 100 ms dle typu vláken)

Hladký sval



Kolísavý klidový membránový potenciál, při
překročení depolarizačního prahu vzniká
hrotový potenciál neboli „spike“.
Je více typů AP u hladkého svalu.

AP (hrotový potenciál): cca 50 ms

EML: cca 200 ms

Vrchol kontrakce cca 500 ms od AP

Trvání kontrakce cca 1000 ms

Čas od počátku AP
(ms)

0

100

200

300

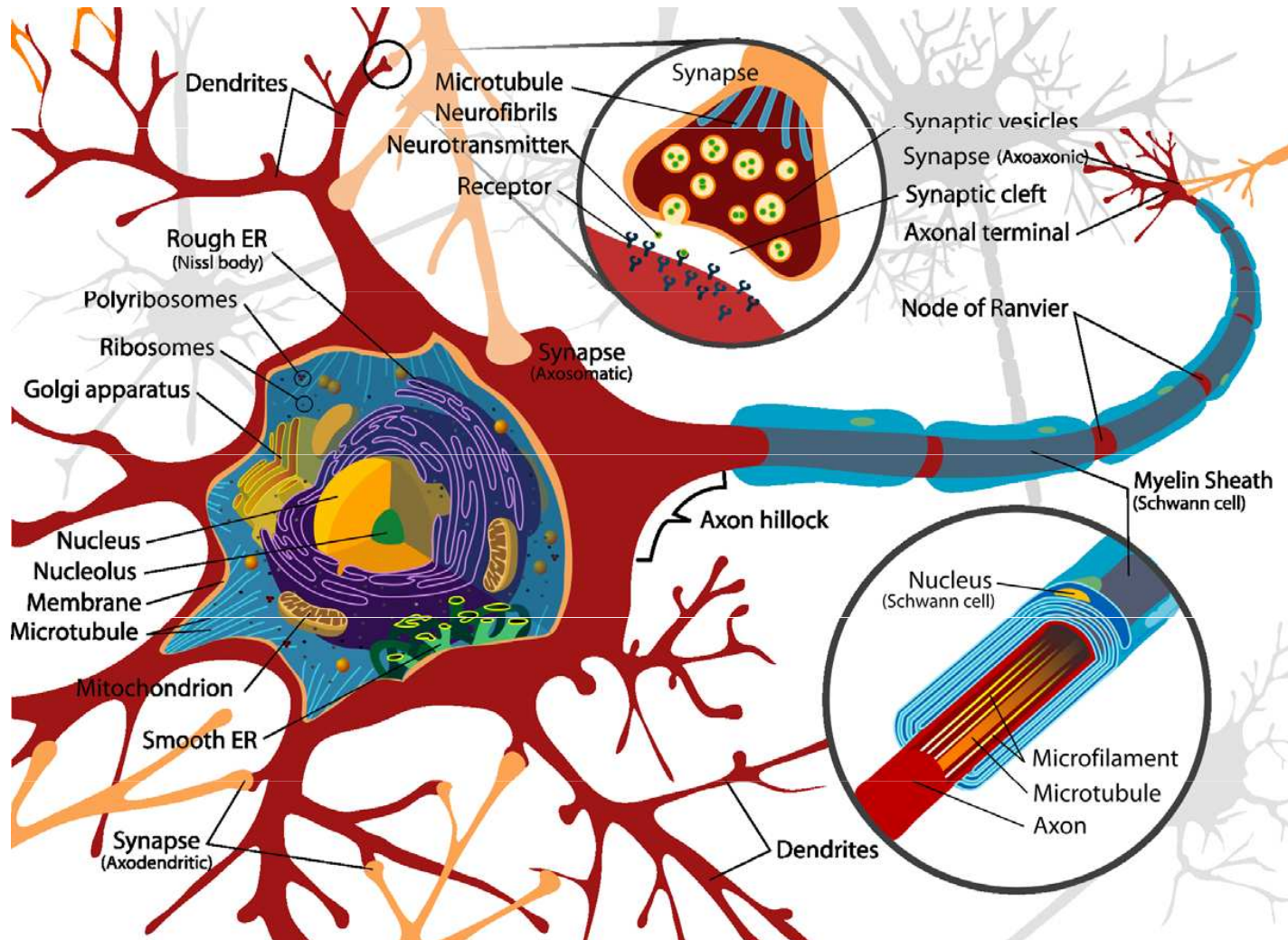
400

MUNI
MED

**MUNI
MED**

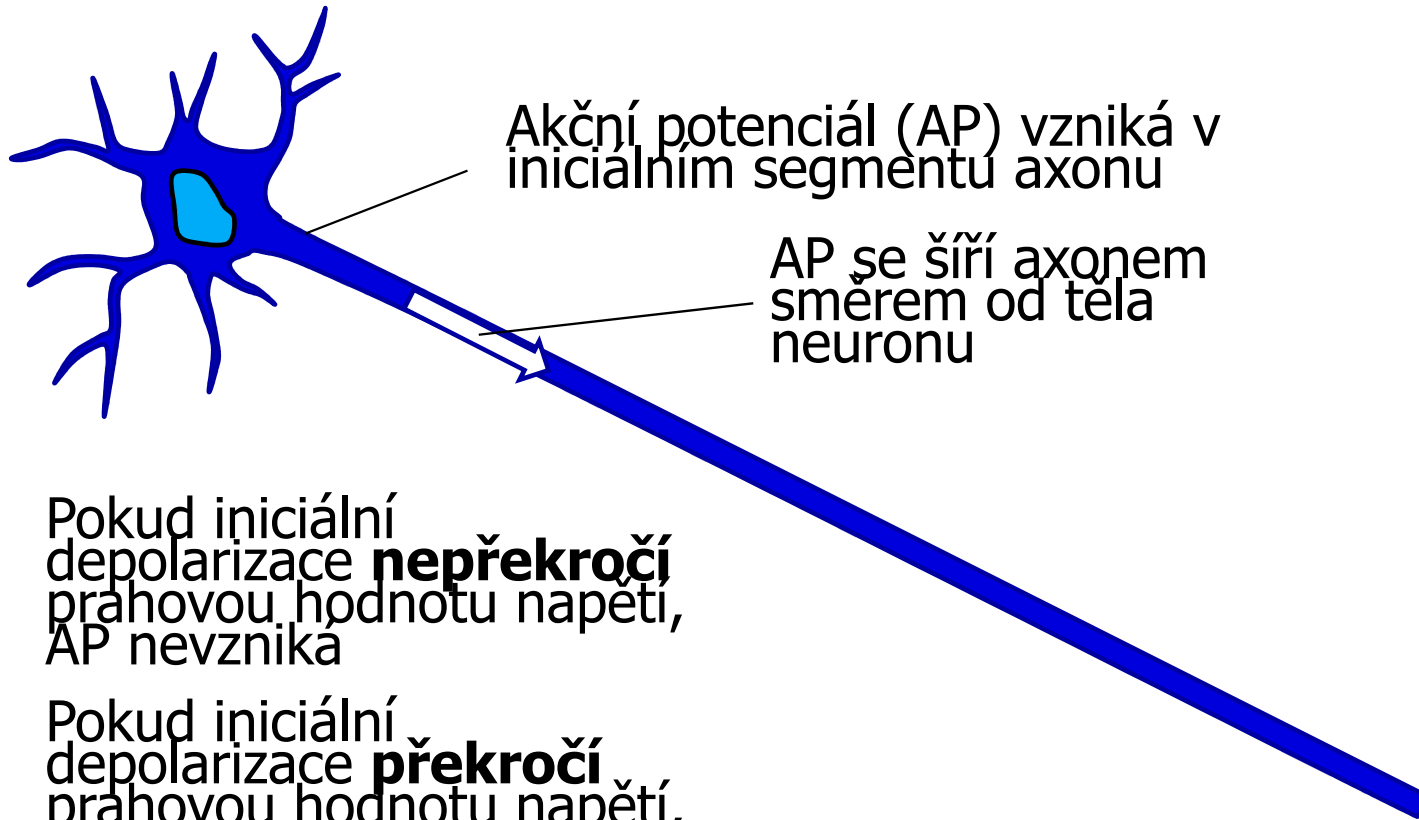
Neuron jako excitabilní buňka

Neuron



M U N
M E D

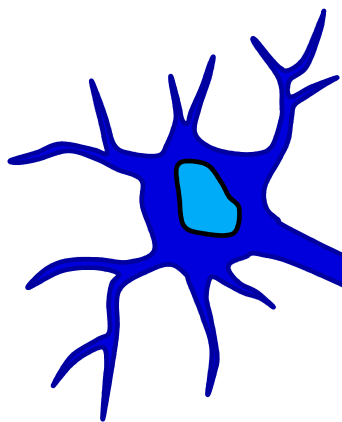
Šíření akčního potenciálu (nemyelinizované vlákno)



Pokud iniciální depolarizace **nepřekročí** práhovou hodnotu napětí, AP nevzniká

Pokud iniciální depolarizace **překročí** práhovou hodnotu napětí, AP vzniká a šíří se dál axonem

Šíření akčního potenciálu (nemyelinizované vlákno) - detail



Akční potenciál (AP) šířící se axonem

Vznik lokálních proudů

- kladné náboje na povrchu membrány před a za AP se přesouvají do oblasti negativity vytvořené AP a naopak, na vnitřní straně se kladné náboje přesouvají z oblasti AP do sousedních oblastí s negativním potenciálem. Místní proudy způsobují elektrotonickou depolarizaci sousedních oblastí, při které se mění permeabilita membrány – pokud dojde k nadprahové změně, vznikne propagující se AP, který se šíří jen dopředu, protože oblast membrány, kde se právě nacházel, je v refrakterním stavu.

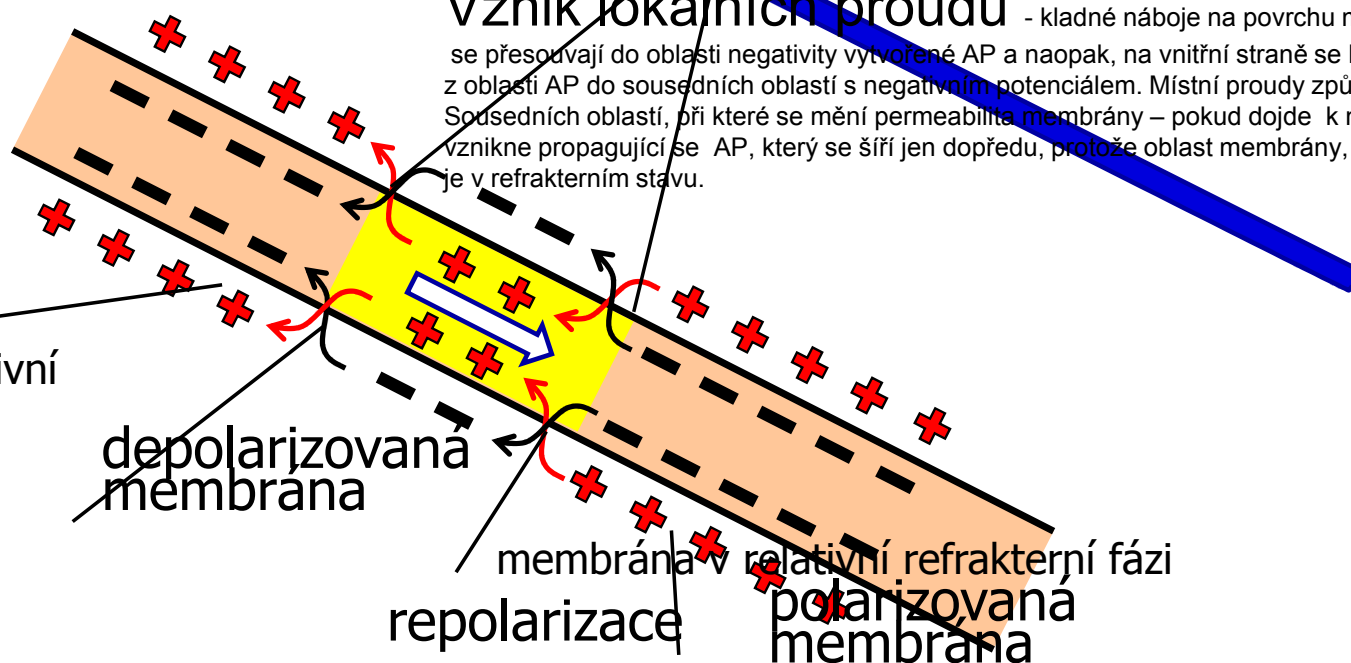
polarizovaná membrána

membrána v relativní refrakterní fázi

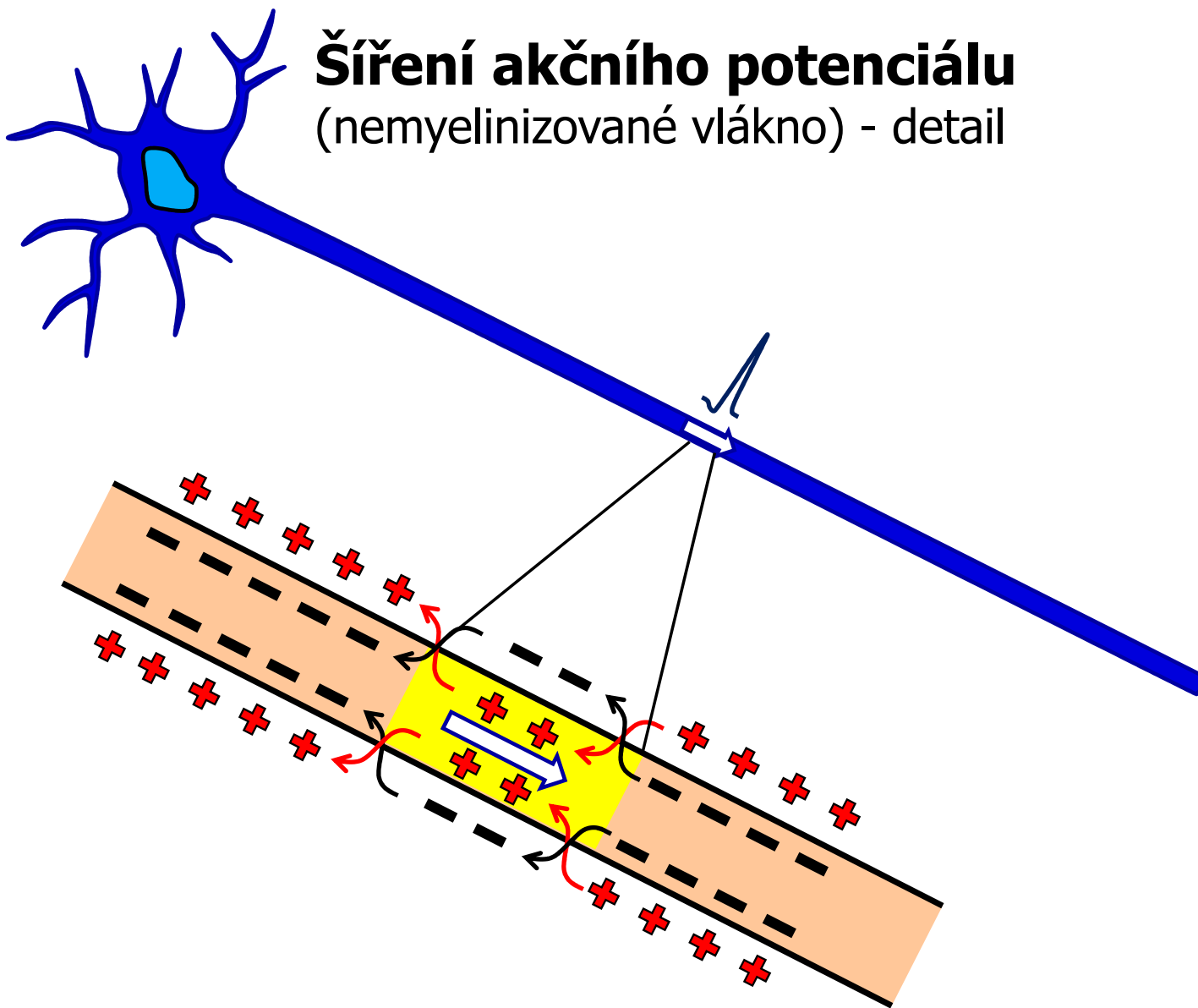
depolarizovaná membrána

membrána v relativní refrakterní fázi
repolarizace

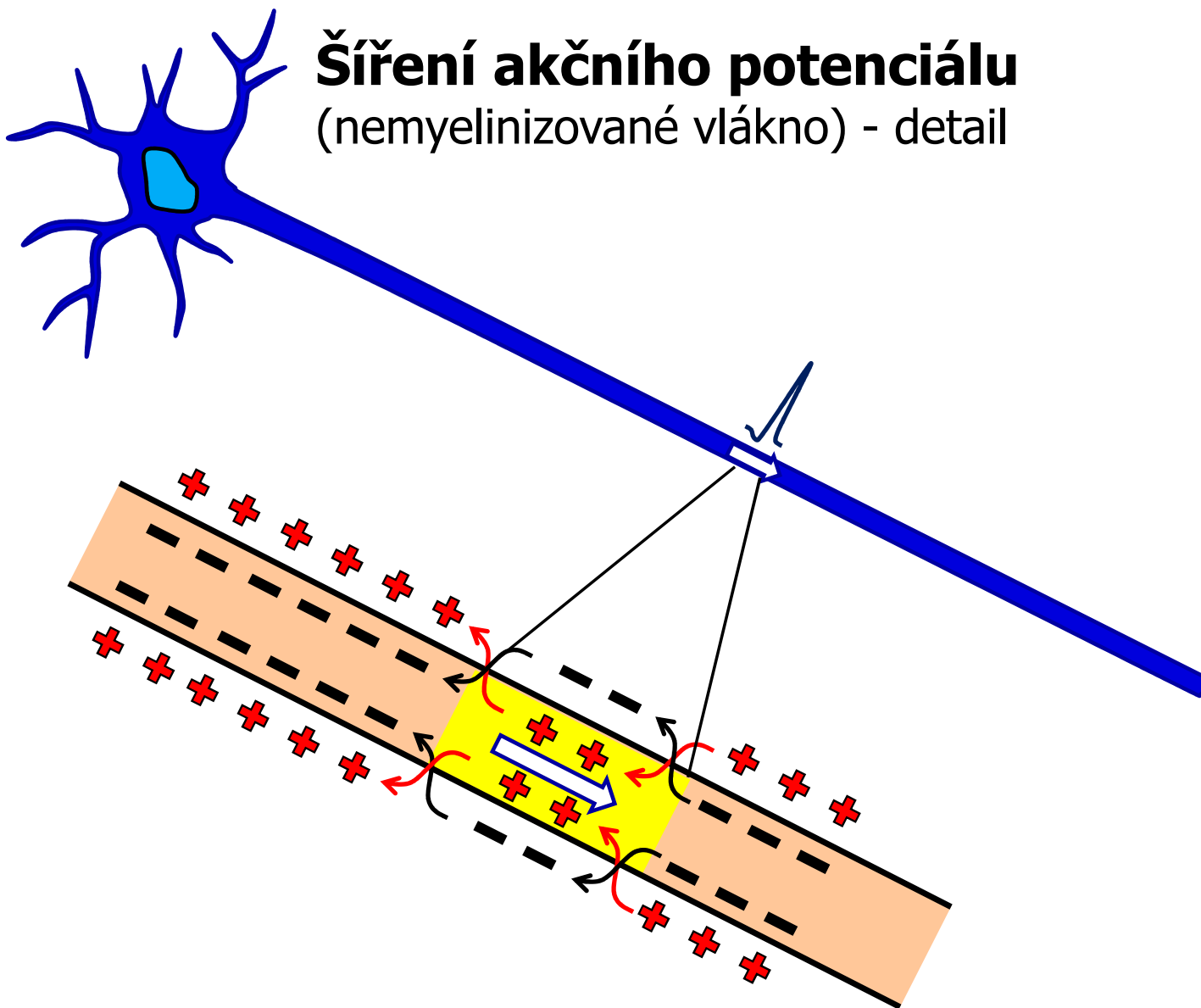
polarizovaná membrána



Šíření akčního potenciálu (nemyelinizované vlákno) - detail



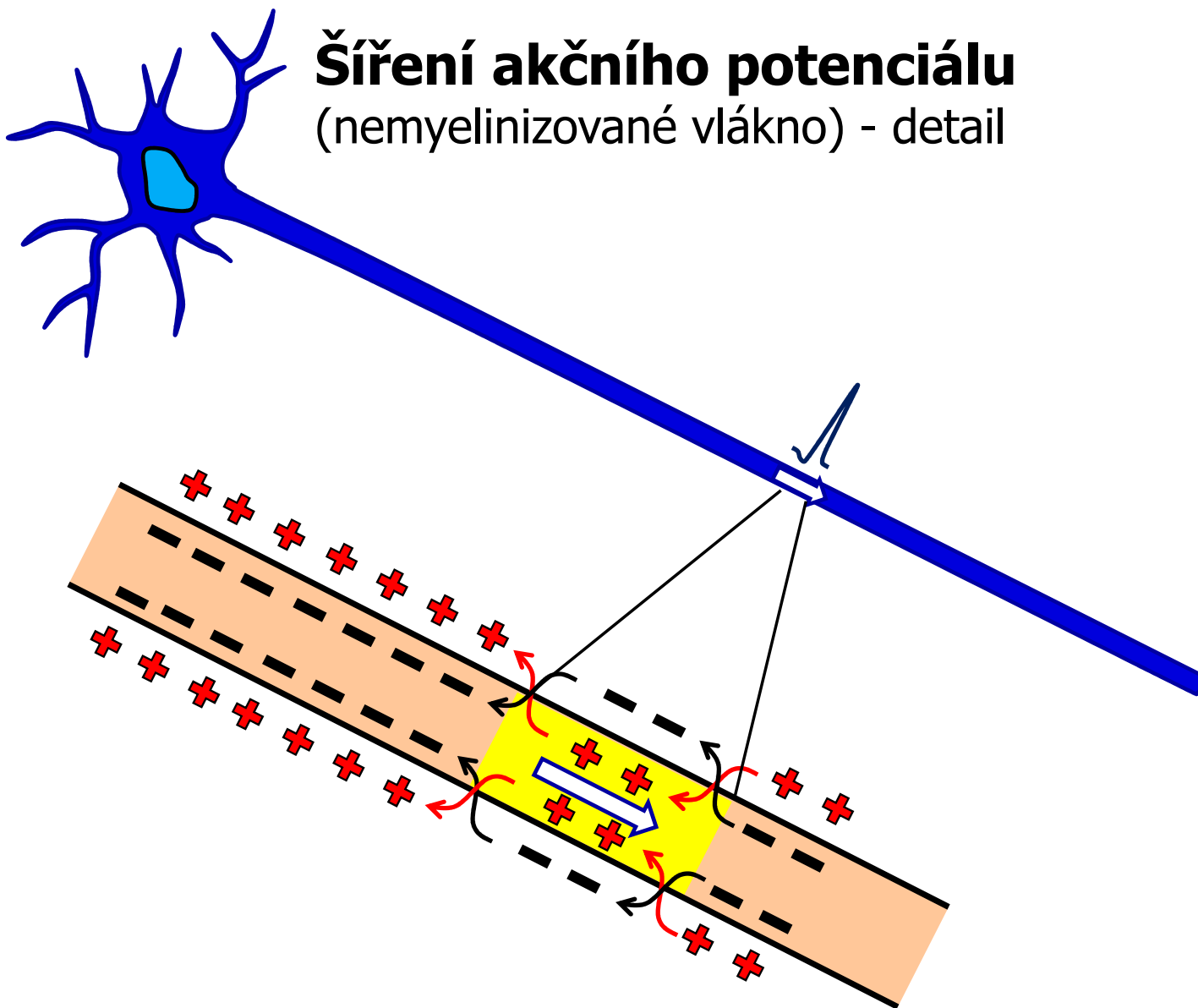
MUNI
MED



Šíření akčního potenciálu

(nemyelinizované vlákno) - detail

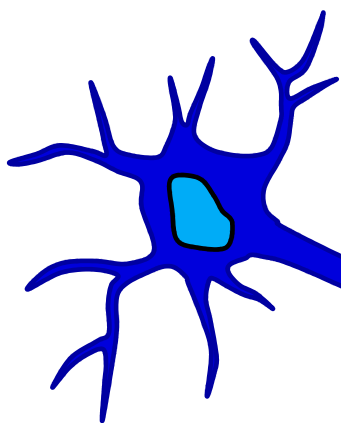
MUNI
MED



Šíření akčního potenciálu

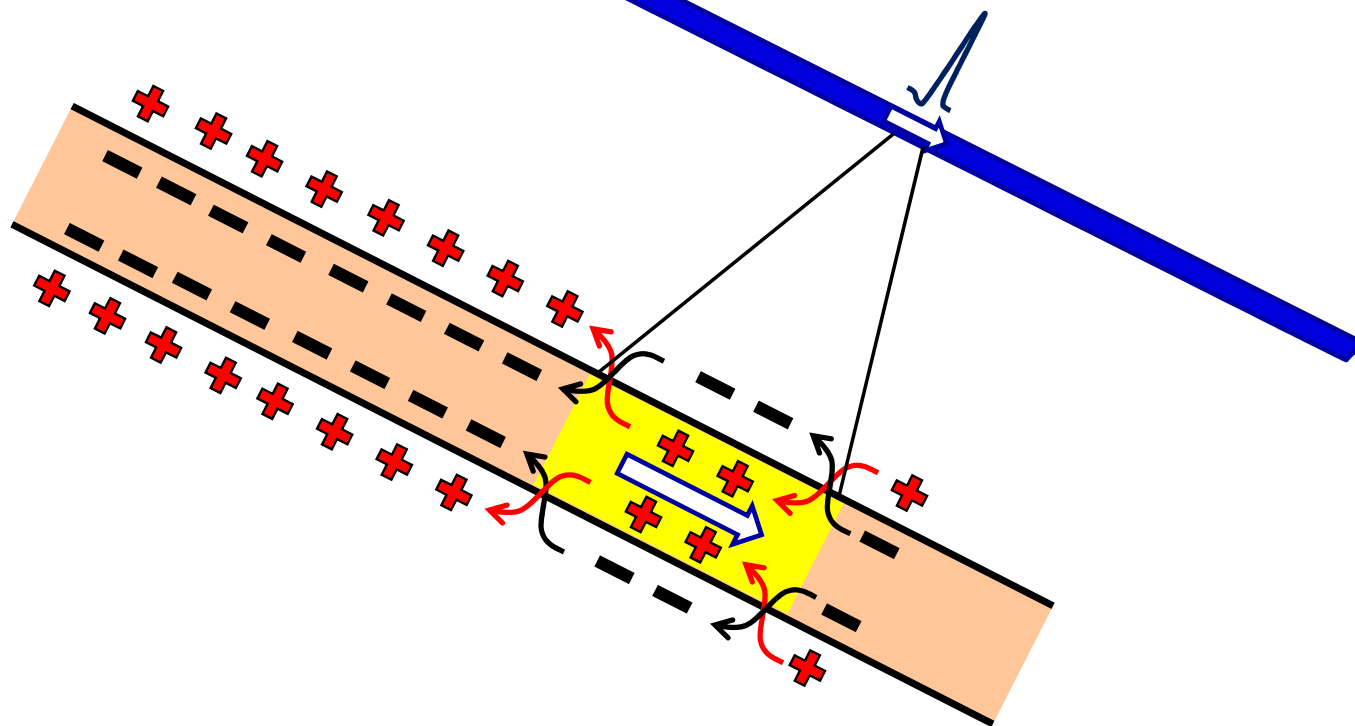
(nemyelinizované vlákno) - detail

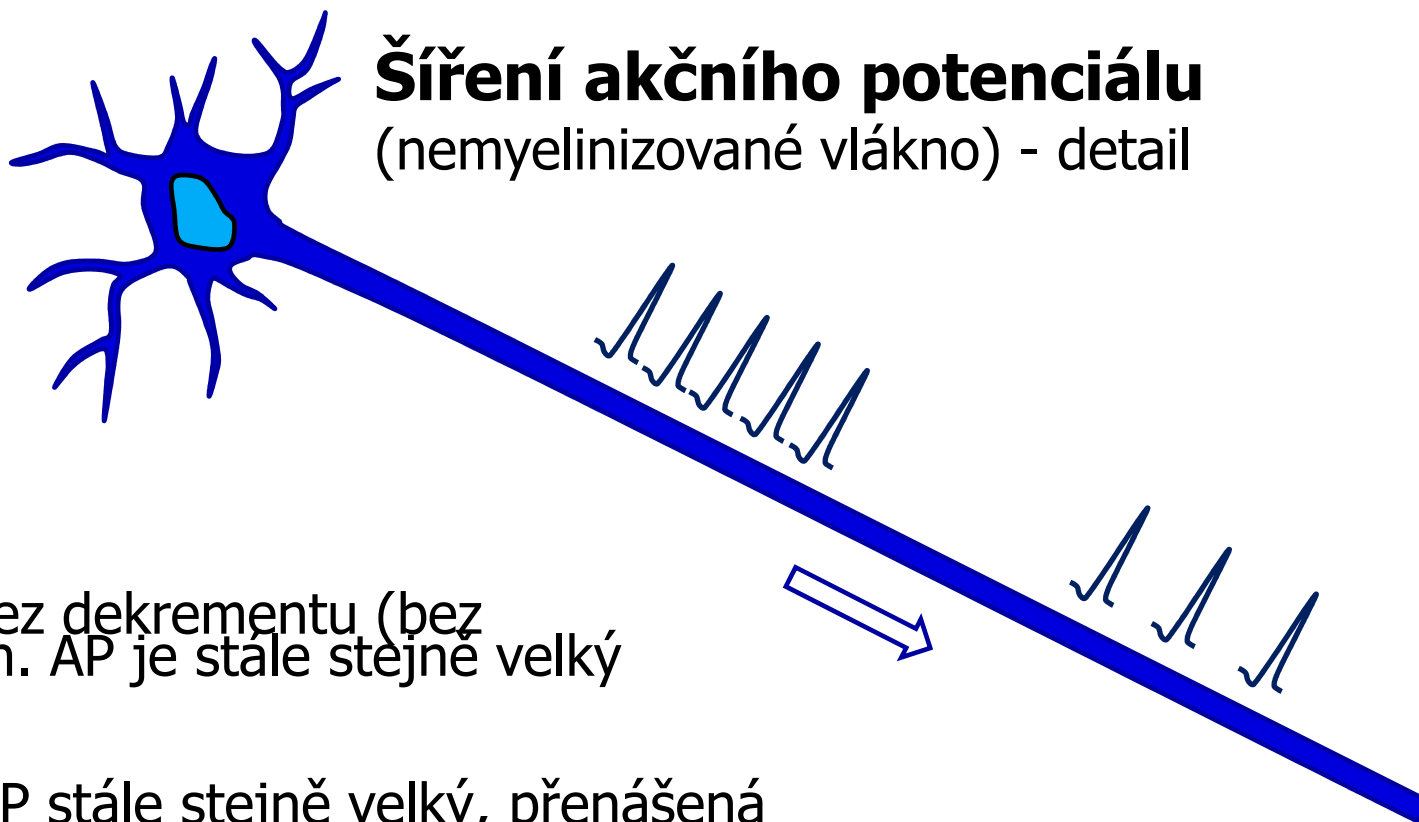
M U N I
M E D



Šíření akčního potenciálu

(nemyelinizované vlákno) - detail



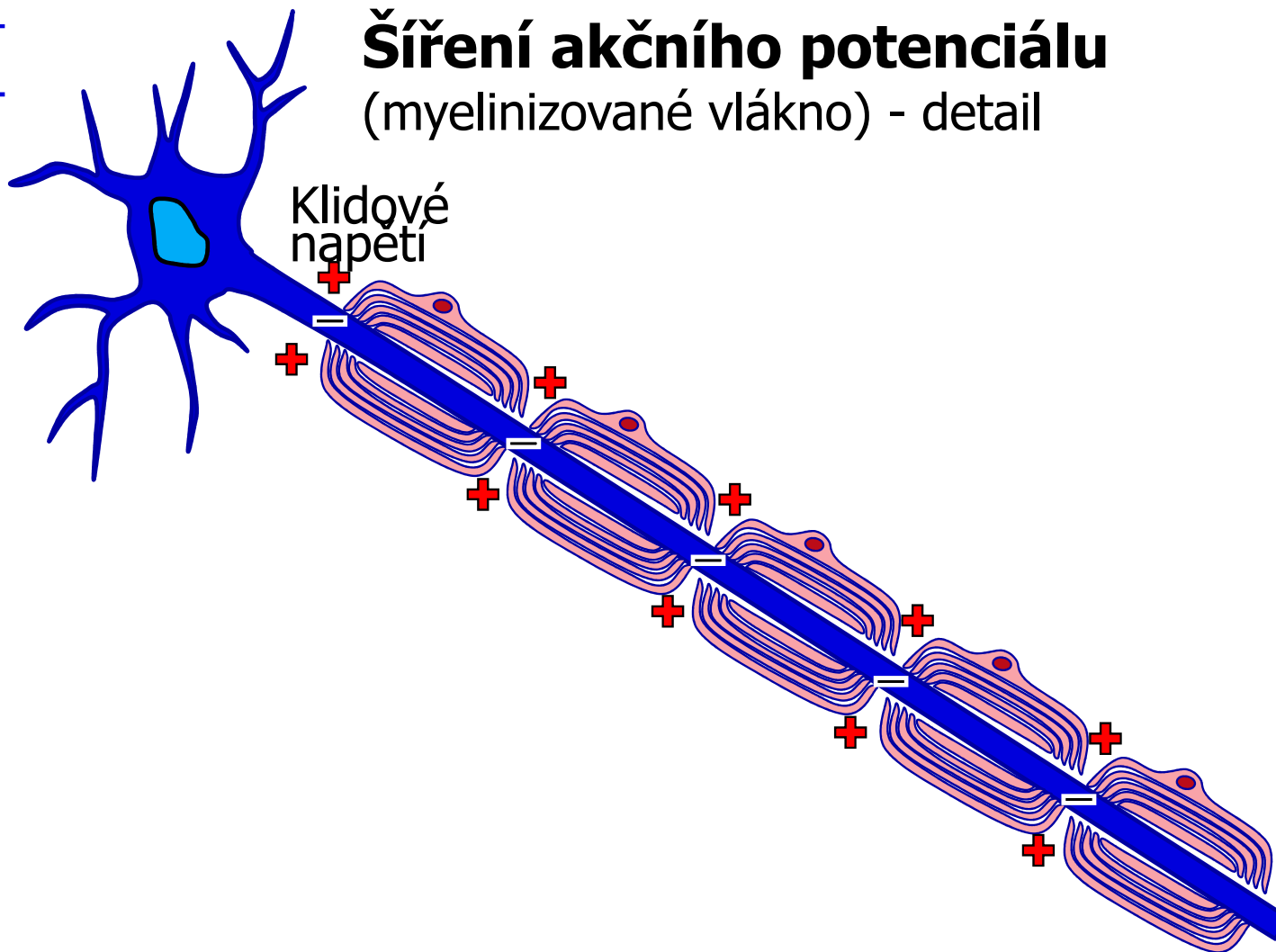


Šíření akčního potenciálu (nemyelinizované vlákno) - detail

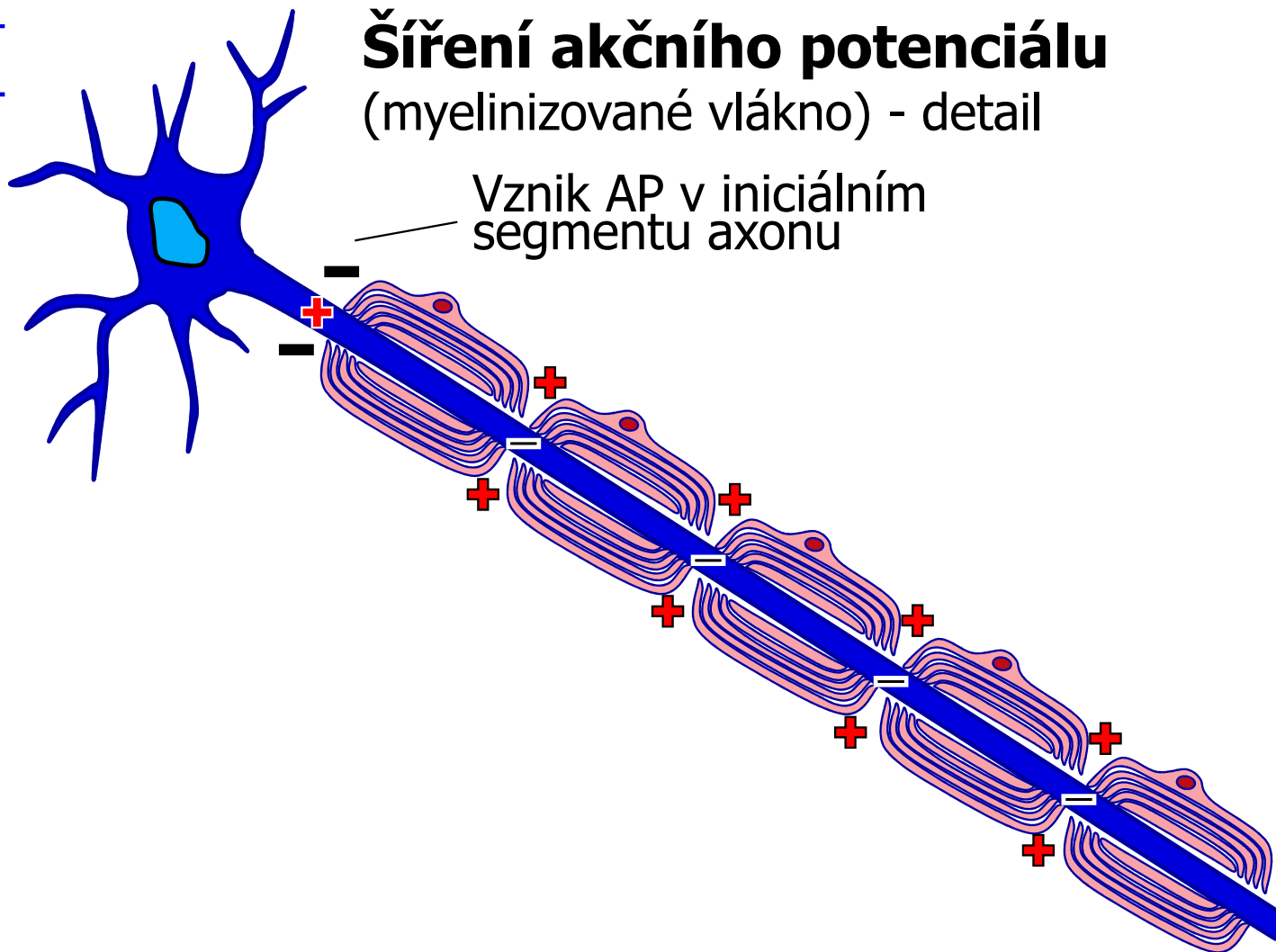
AP se šíří bez dekrementu (bez úbytku), tzn. AP je stále stejně velký

Protože je AP stále stejně velký, přenášená informace se kóduje do frekvence AP

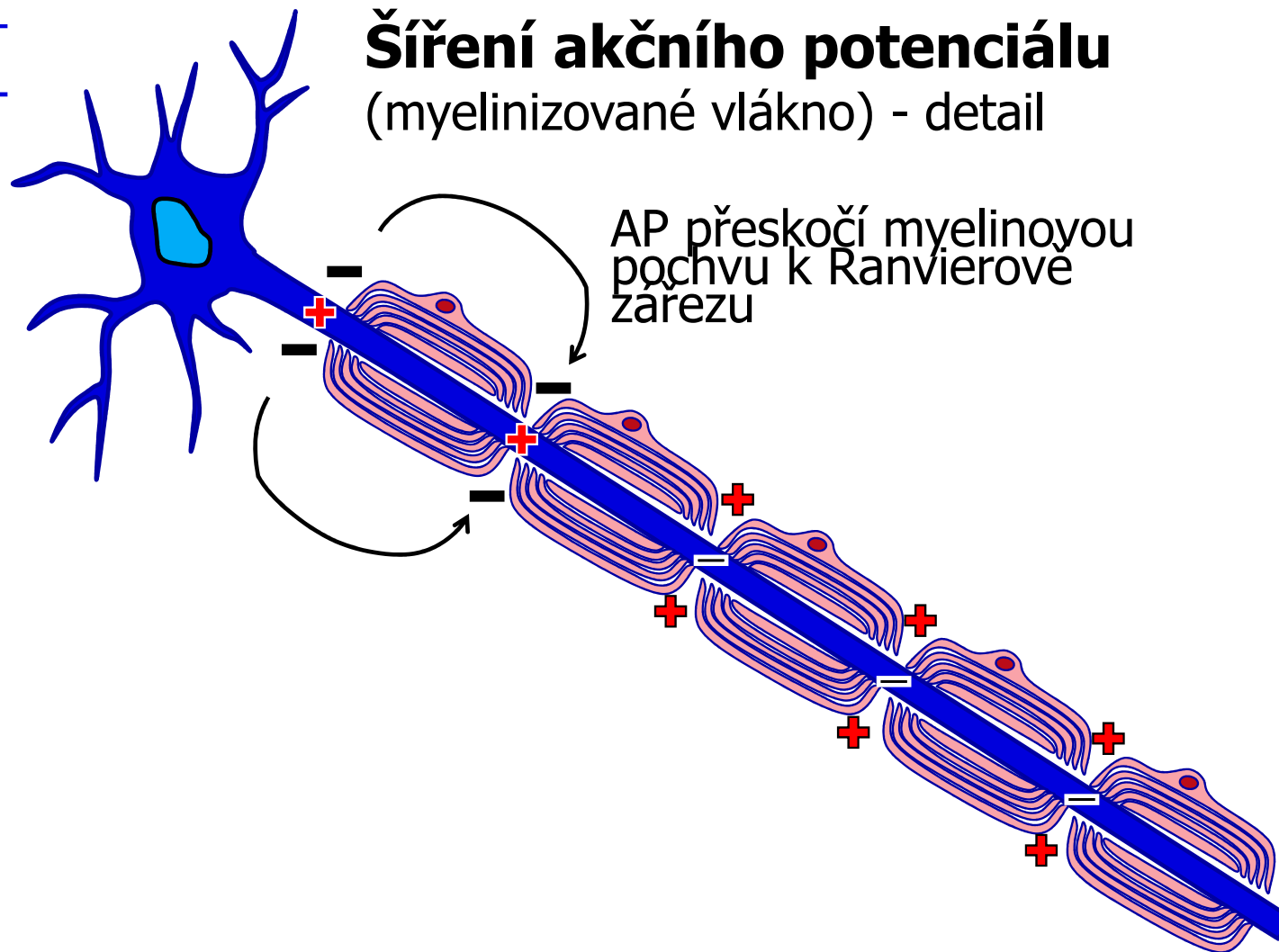
Šíření akčního potenciálu (myelinizované vlákno) - detail



Šíření akčního potenciálu (myelinizované vlákno) - detail

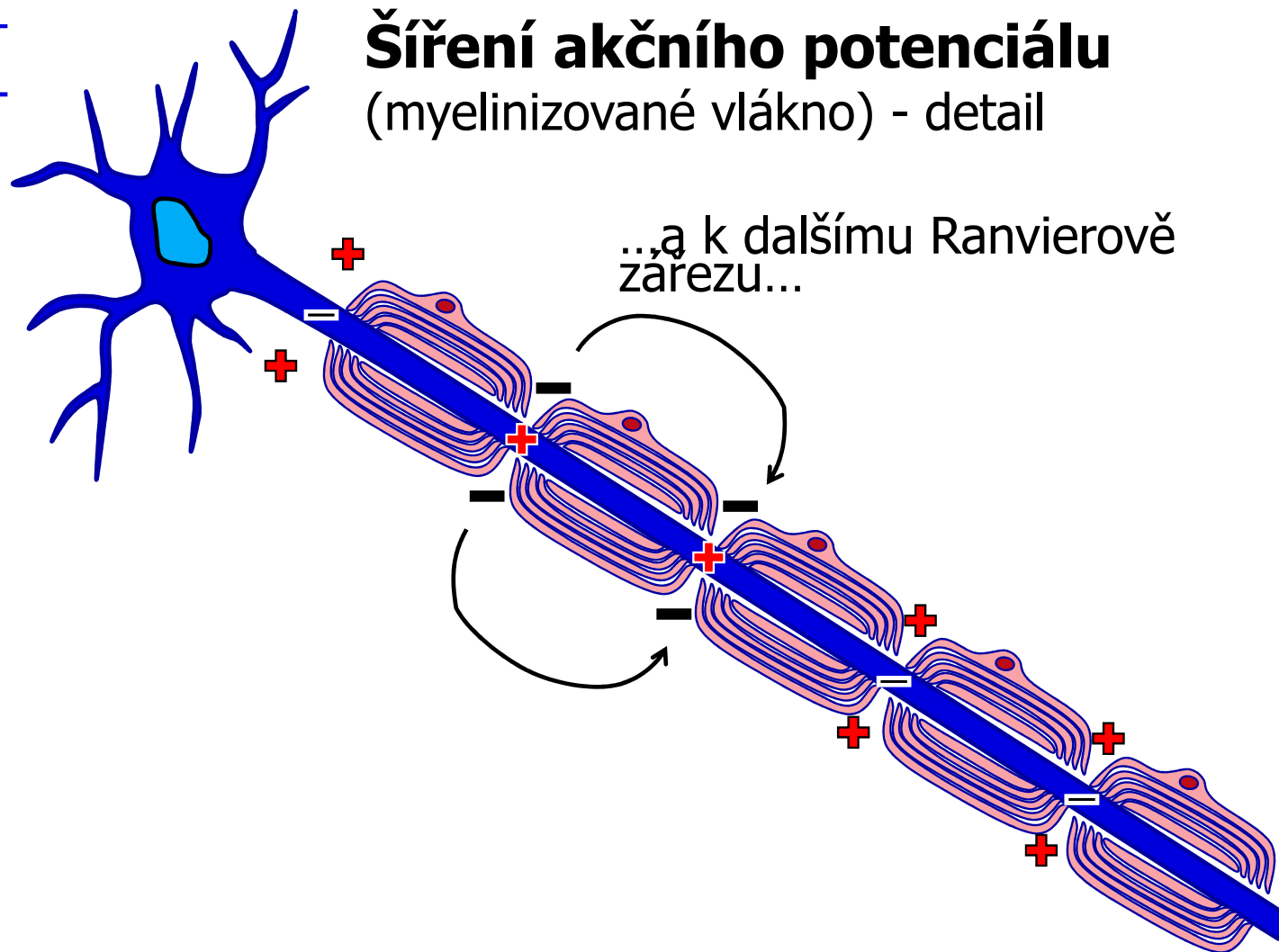


Šíření akčního potenciálu (myelinizované vlákno) - detail

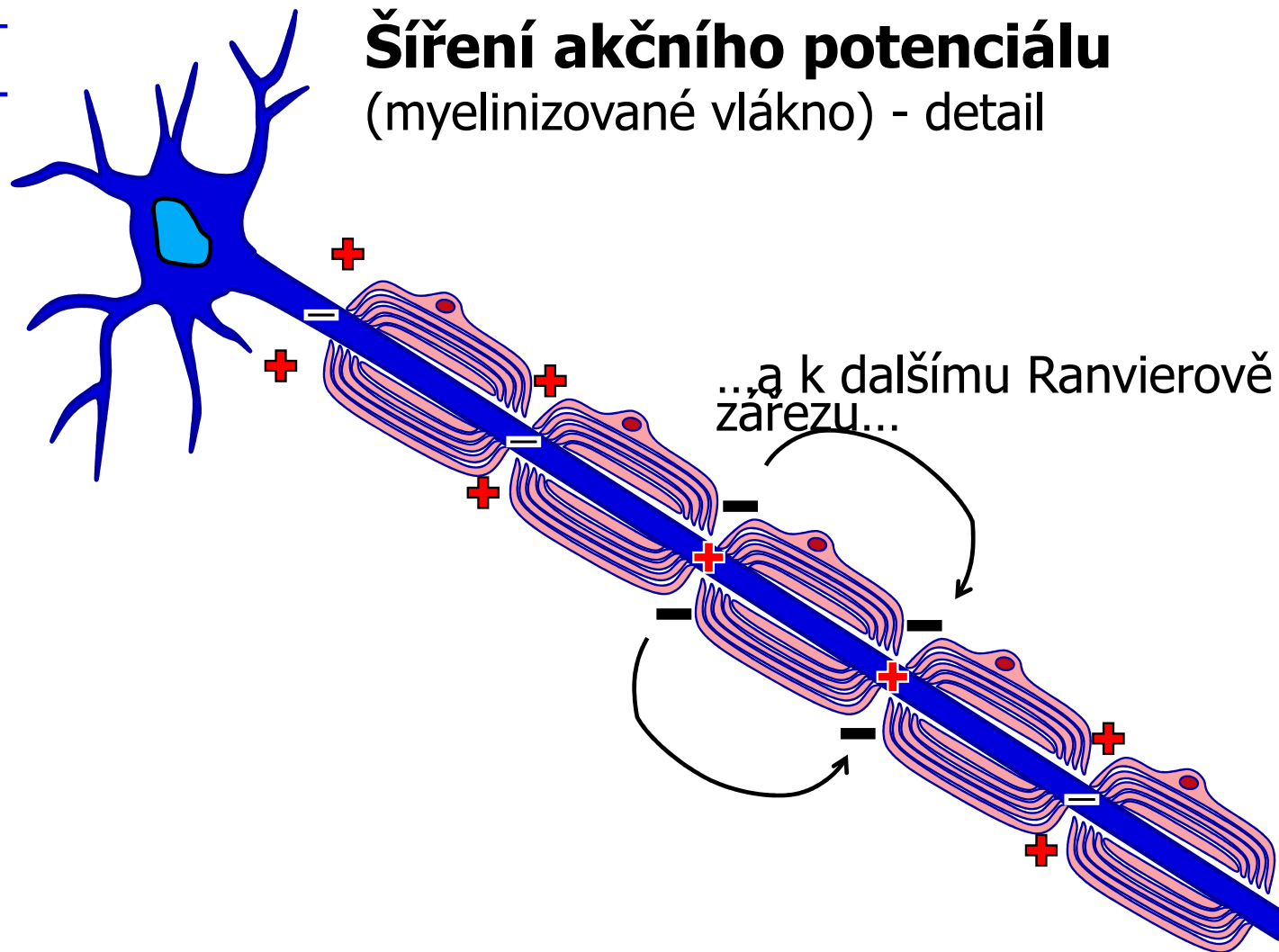


AP přeskóčí myelinovou
pochvu k Ranvierově
zářezu

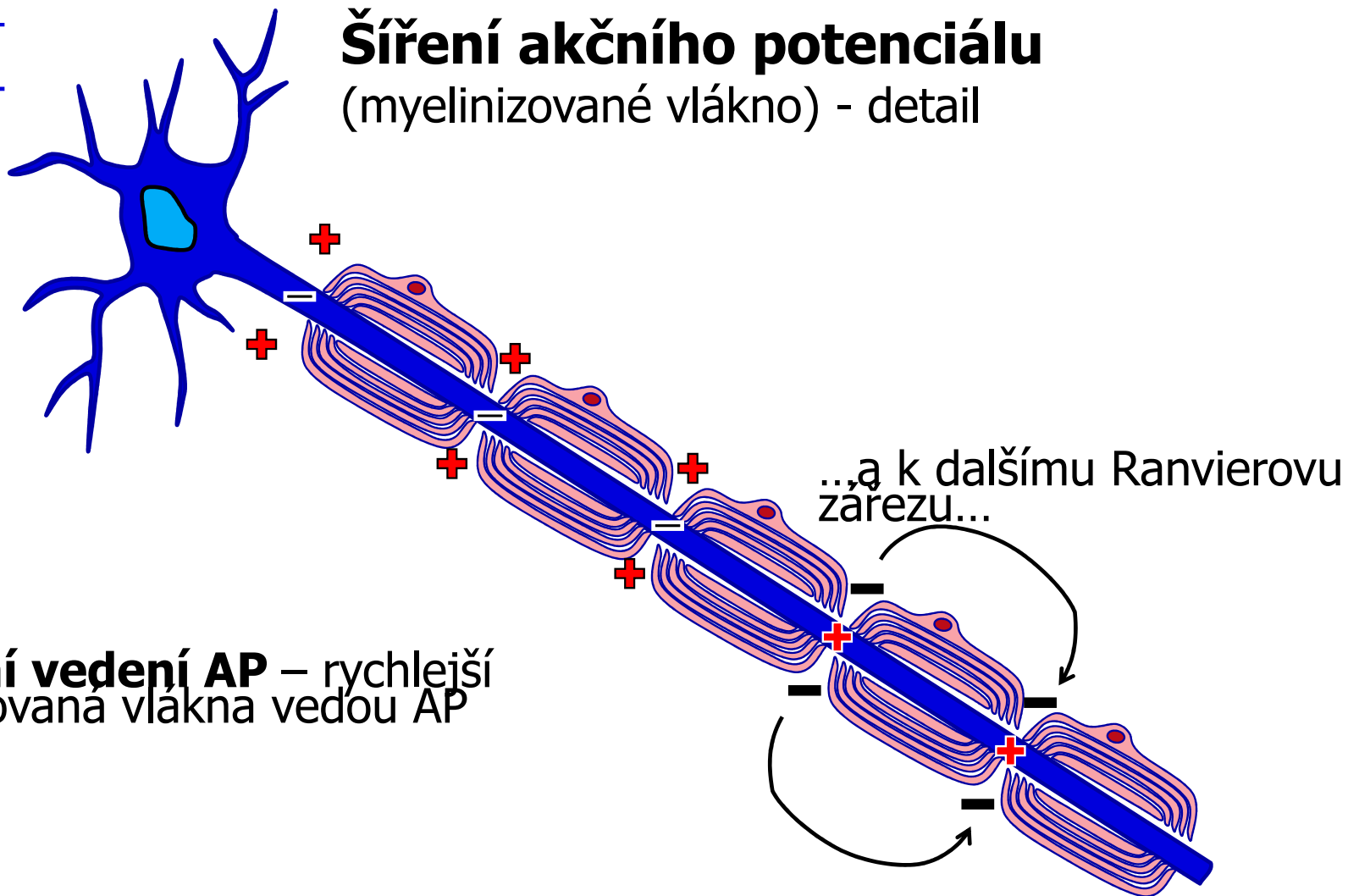
Šíření akčního potenciálu (myelinizované vlákno) - detail



Šíření akčního potenciálu (myelinizované vlákno) - detail



Šíření akčního potenciálu (myelinizované vlákno) - detail



Saltatorní vedení AP – rychlejší
(nemyelinizovaná vlákna vedou AP pomaleji)

Místní odpověď membránového napětí

- Evolučně starší typ odpovědi buněčné membrány na podnět (vyskytuje se v nervové soustavě nižších živočichů), nicméně i u člověka máme tento typ odpovědi

- Základní vlastnosti:

velikost odpovědi závisí na intenzitě podnětu

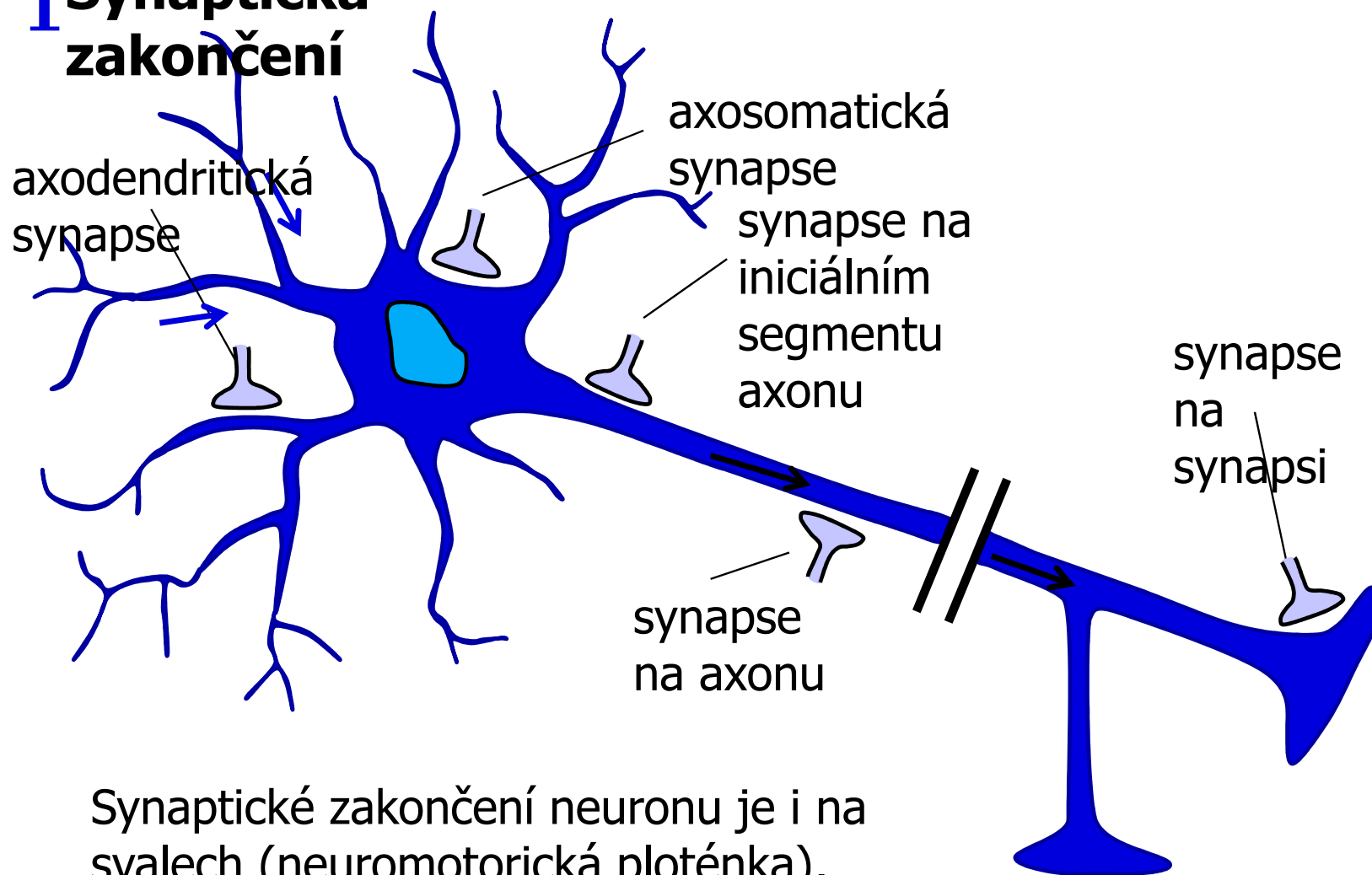
odpověď se šíří s úbytkem (dekrementem)

nemá refrakterní fázi (dá se sčítat=sumovat)

Např.: najdeme u smyslových (receptorových buněk) – „receptorový potenciál“,

jako postsynaptický potenciál (excitační – inhibiční), jako ploténkový potenciál u nervosvalového spojení

Synaptická zakončení



Synaptické zakončení neuronu je i na svalech (neuromotorická ploténka), nebo na žlázách

Postsynaptický potenciál (PSP)

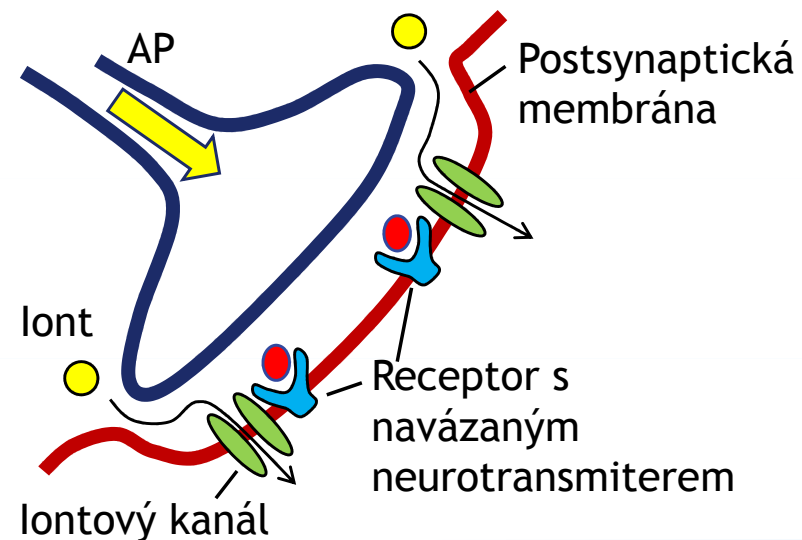
Neurotransmitery navázané na určité typy receptorů postsynaptické membrány způsobí k otevření iontových kanálů a přesun iontů z/do buňky

→ změna potenciálů na postsynaptické membráně

→ vzniká **postsynaptický potenciál**

Postsynaptický potenciál

- je slabý (mnohokrát slabší než AP)
- šíří se od synapse s dekrementem (úbytkem) - zmenšuje se, když se vzdaluje od synapse (postupně zaniká)

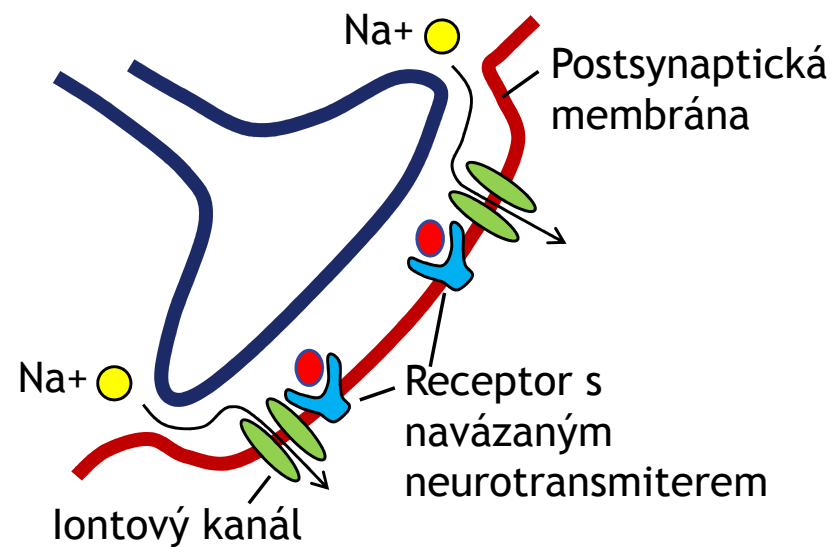
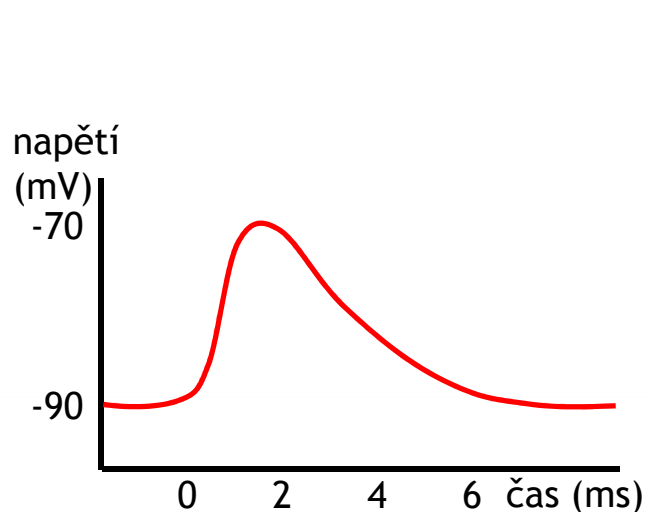


Jeden typ neurotransmiteru se váže na jeden typ receptoru a otvírá jeden typ iontových kanálů

Excitační postsynaptický potenciál (EPSP)

Postsynaptický potenciál vyvolávající depolarizaci buňky (ale mnohem slabší než je AP)

Vstup kationtů do buňky (např. Ca^{2+} nebo Na^{+})

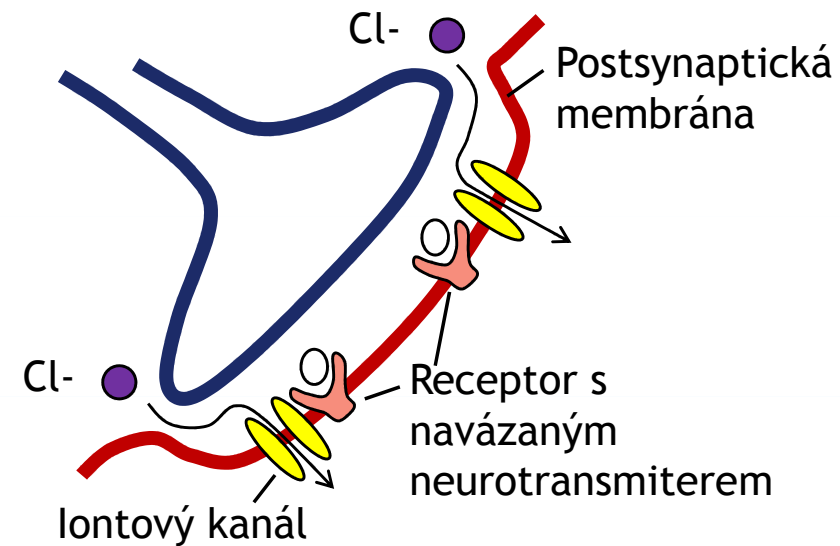
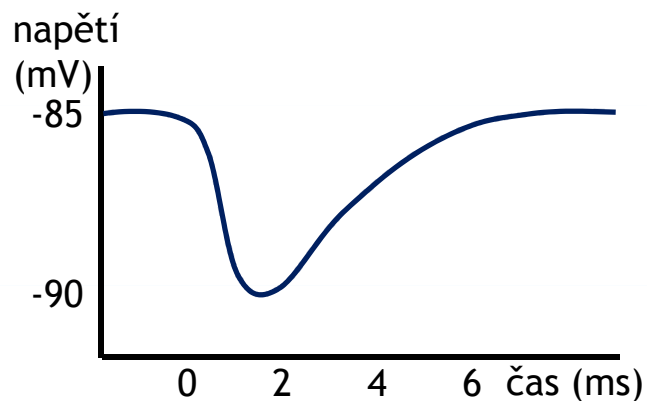


Jeden typ neurotransmiteru se váže na jeden typ receptoru a otvírá jeden typ iontových kanálů

Např. acetylcholin navázaný na nikotinový receptor způsobí otevření kanálu pro Na^{+} a vstup Na^{+} do buňky

Inhibiční postsynaptický potenciál (IPSP)

Postsynaptický potenciál vyvolávající hyperpolarizaci buňky
Vstup aniontů do buňky (např. Cl^-) nebo výstup kationtů z buňky (K^+)

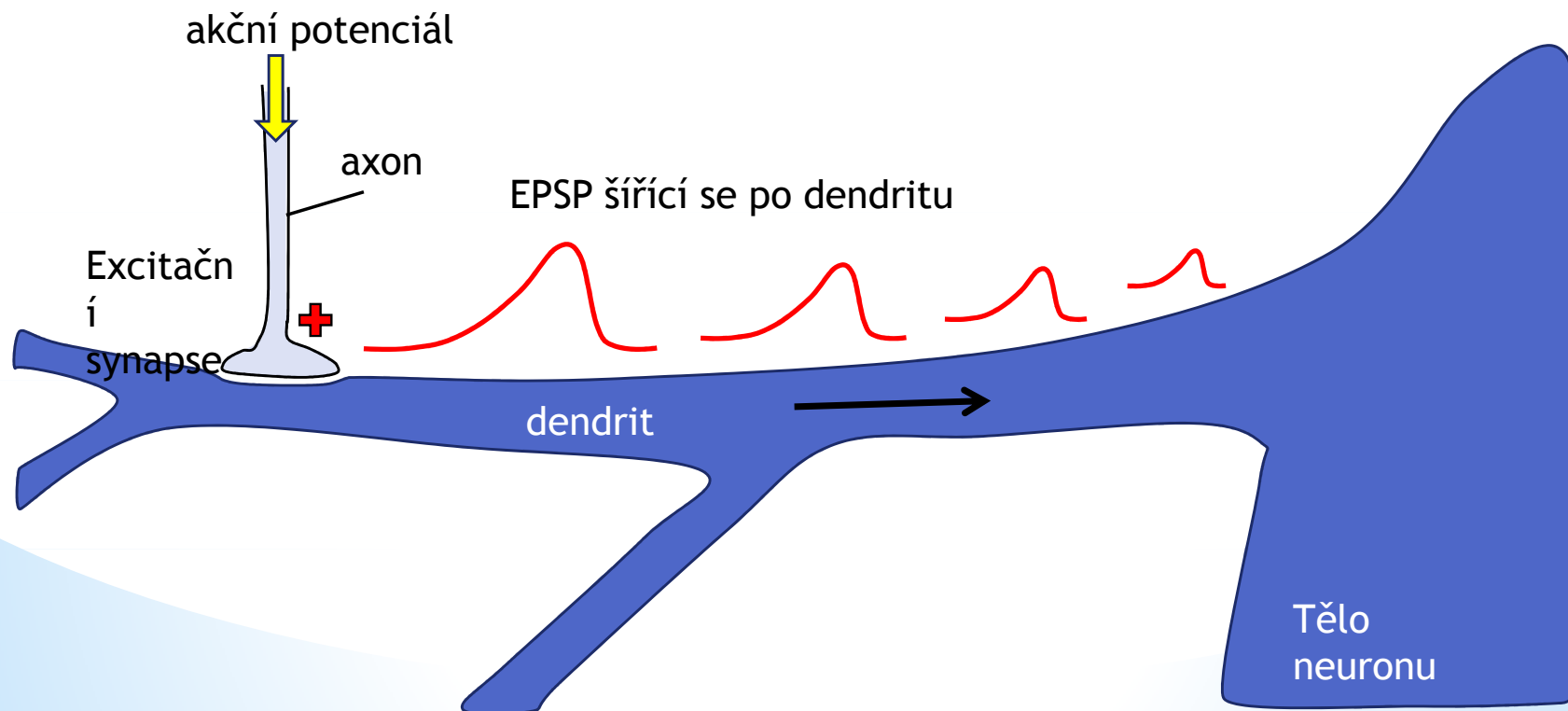


Jeden typ neurotransmiteru se váže na jeden typ receptoru a otvírá jeden typ iontových kanálů
Např. GABA navázaná na GABA_A způsobí otevření kanálu pro Cl^- a vstup Cl^- do buňky

Šíření excitačního postsynaptického potenciálu

Postsynaptický potenciál

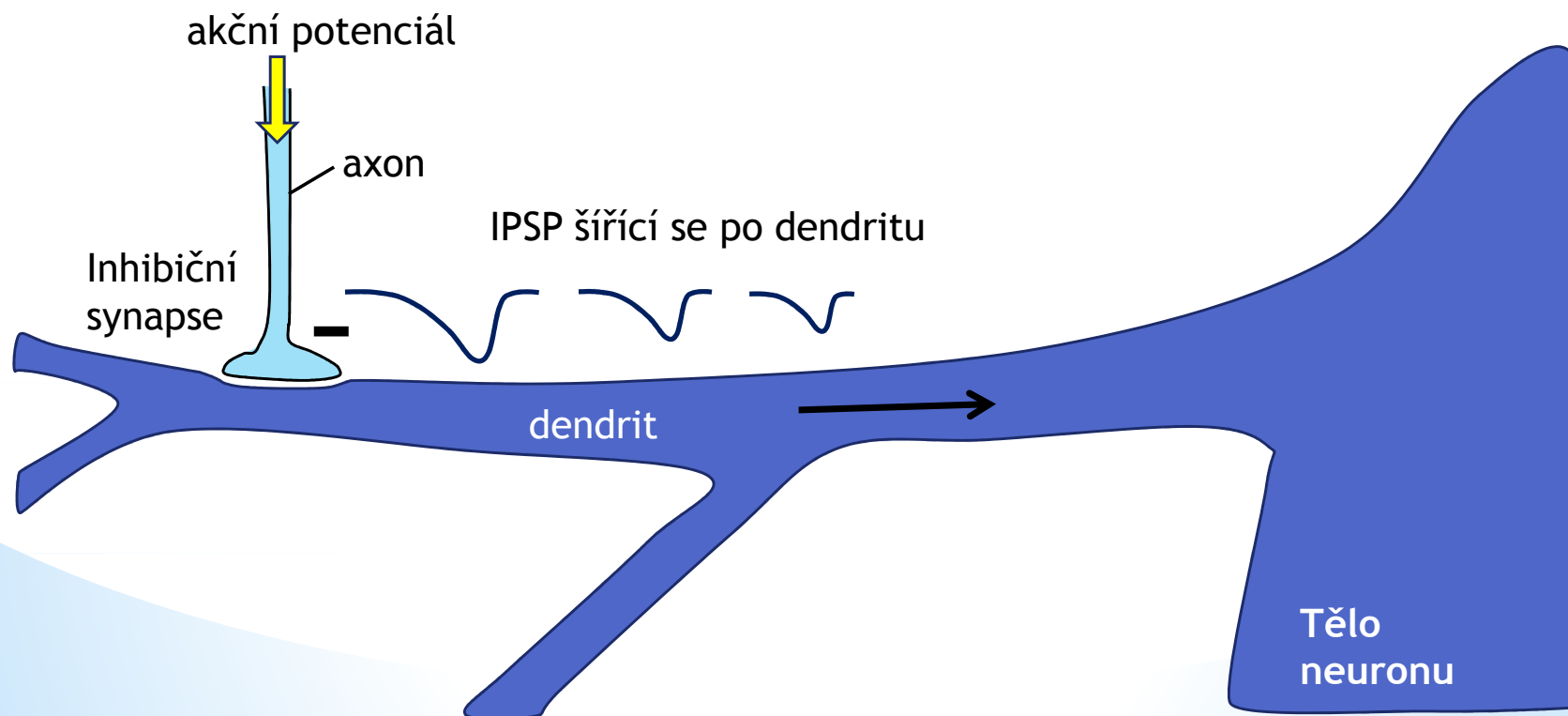
- je slabý (mnohokrát slabší než AP)
- šíří se od synapse s dekrementem (úbytkem) - zmenšuje se, když se vzdaluje od synapse (postupně zaniká)



Šíření inhibičního postsynaptického potenciálu

Postsynaptický potenciál

- je slabý
- šíří se od synapse s dekrementem (úbytkem) - zmenšuje se, když se vzdaluje od synapse (postupně zaniká)



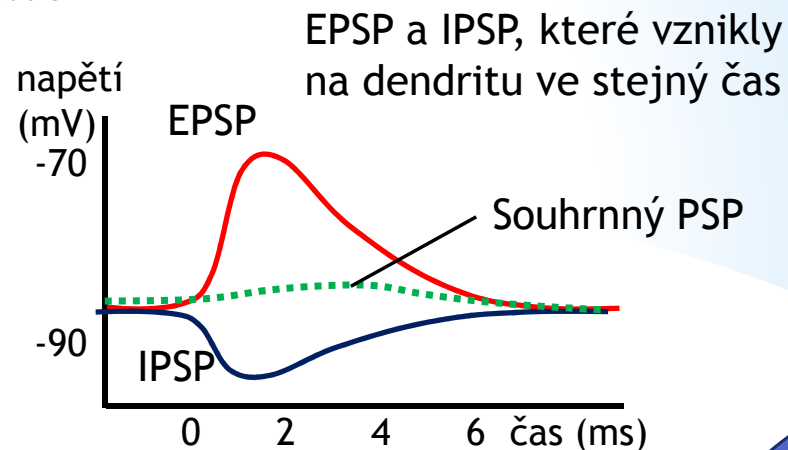
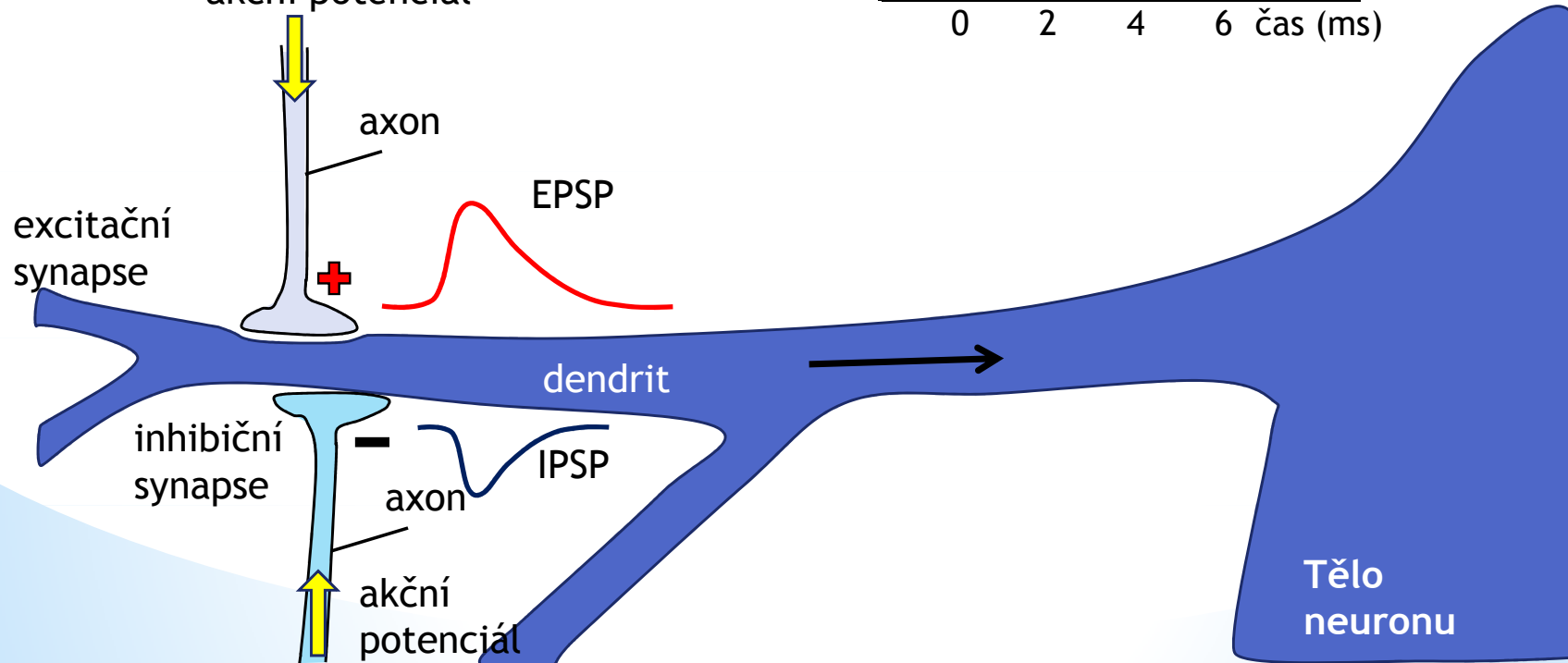
Sčítání postsynaptických potenciálů

Na těle neuronu mohou být zároveň
excitační i inhibiční synapse

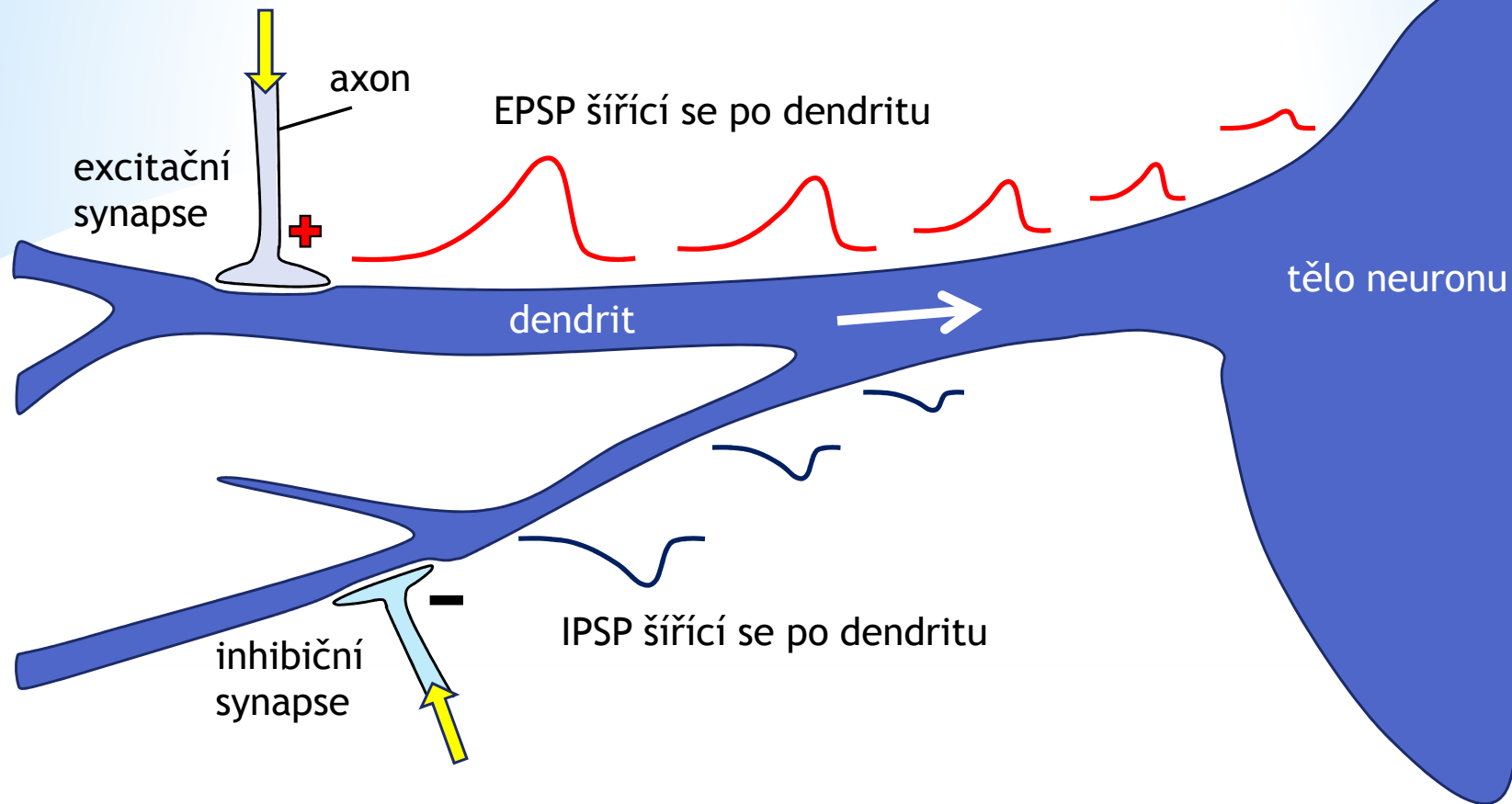
EPSP a IPSP se sčítají - souhrnné PSP

- Převaha IPSP - hyperpolarizace membrány
- Převaha EPSP - depolarizace membrány

akční potenciál



příchozí akční potenciál



excitační synapse

axon

EPSP šířící se po dendritu

dendrit

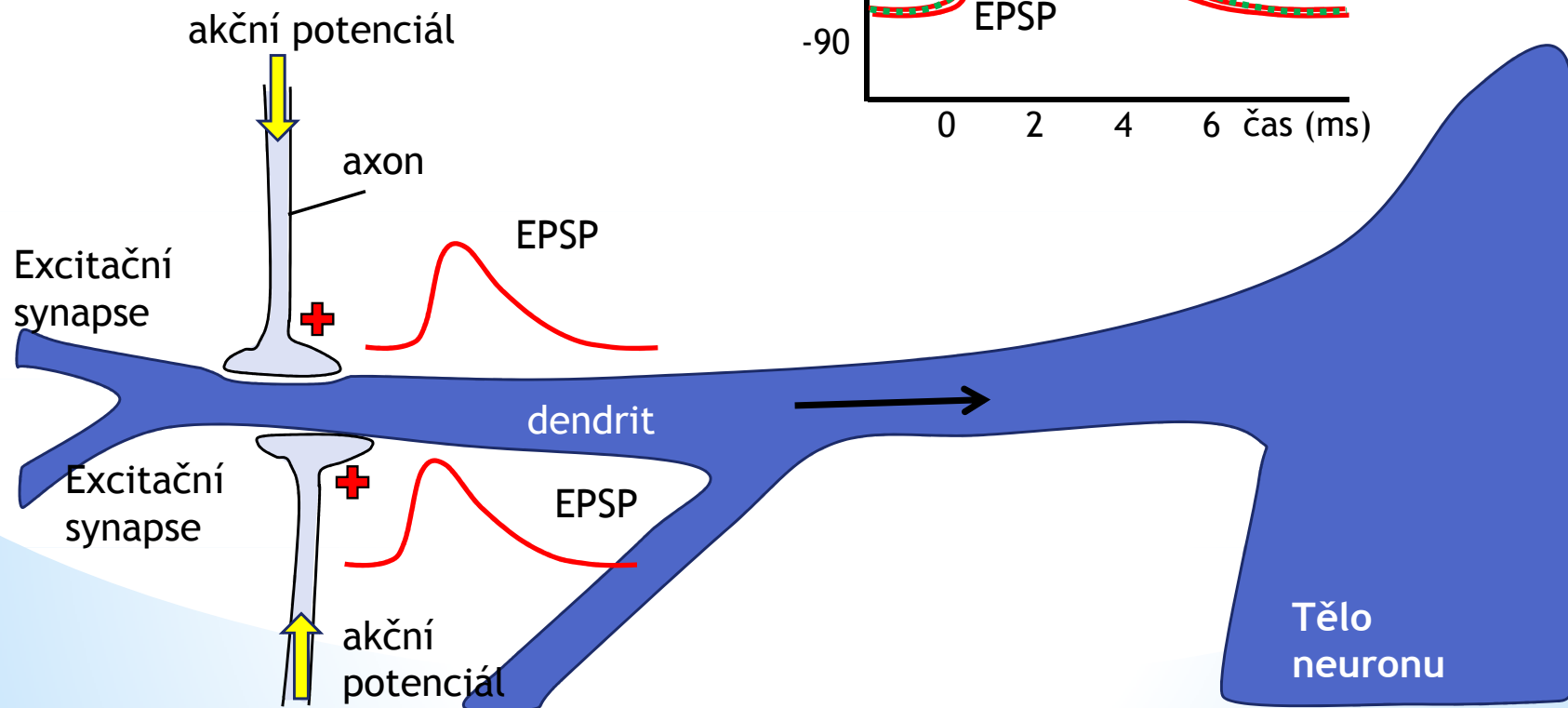
tělo neuronu

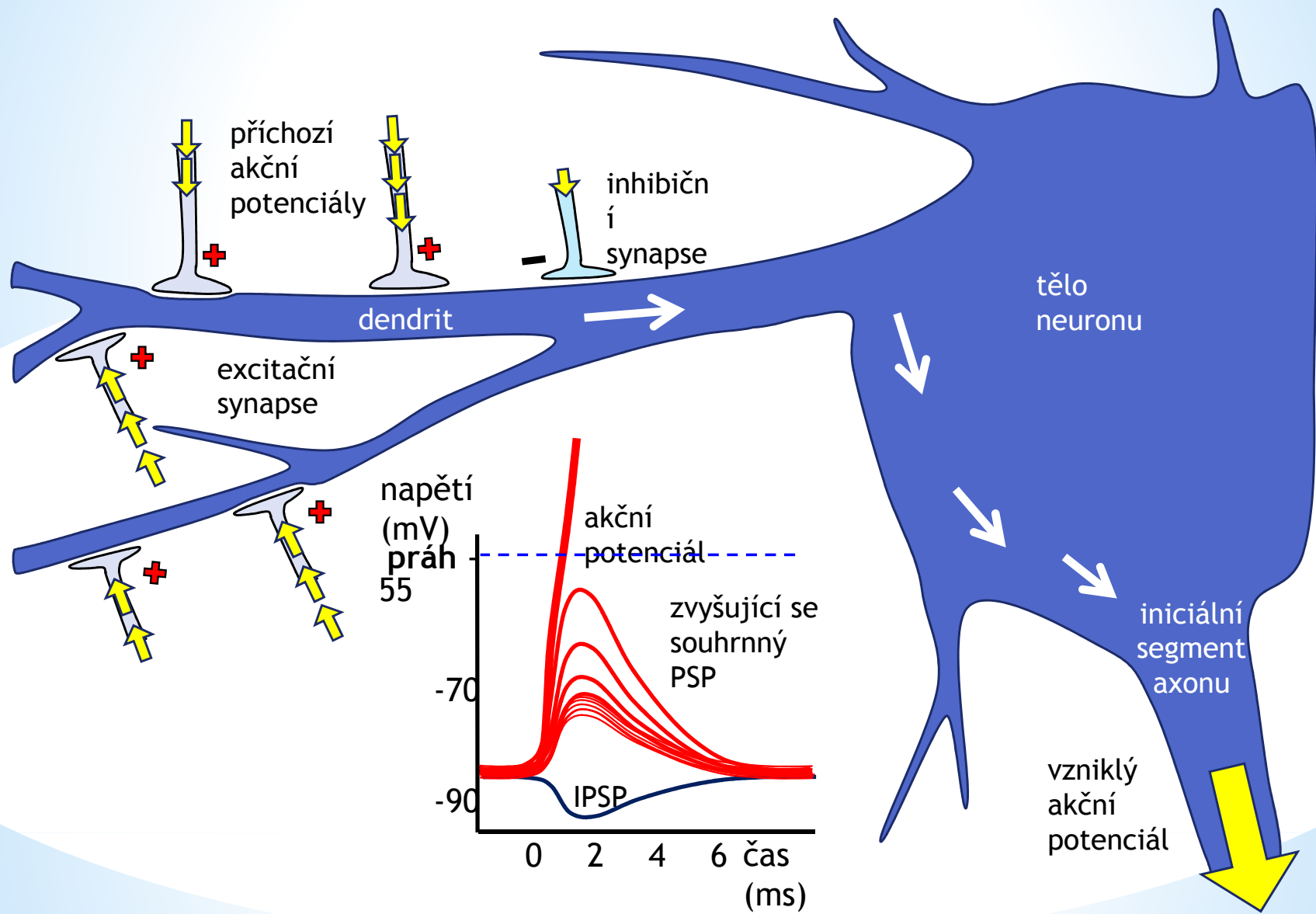
inhibiční synapse

IPSP šířící se po dendritu

Sčítání postsynaptických potenciálů

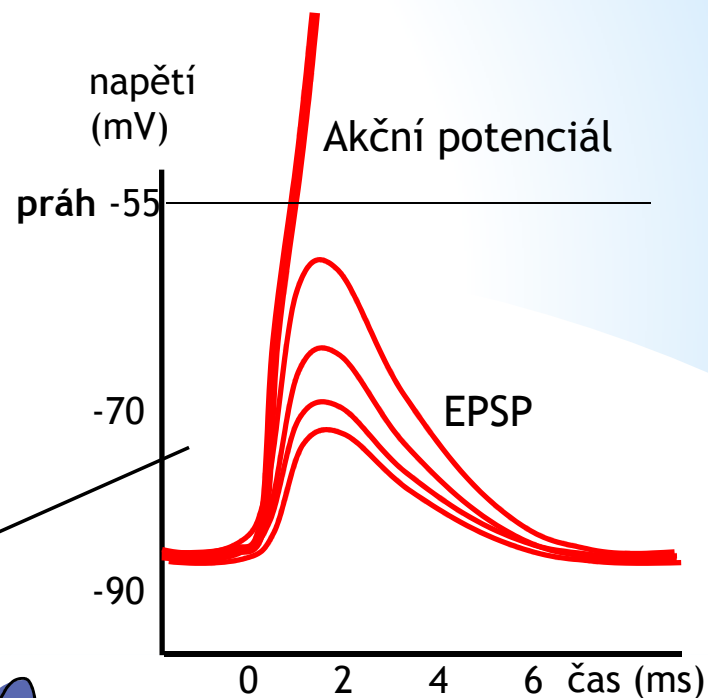
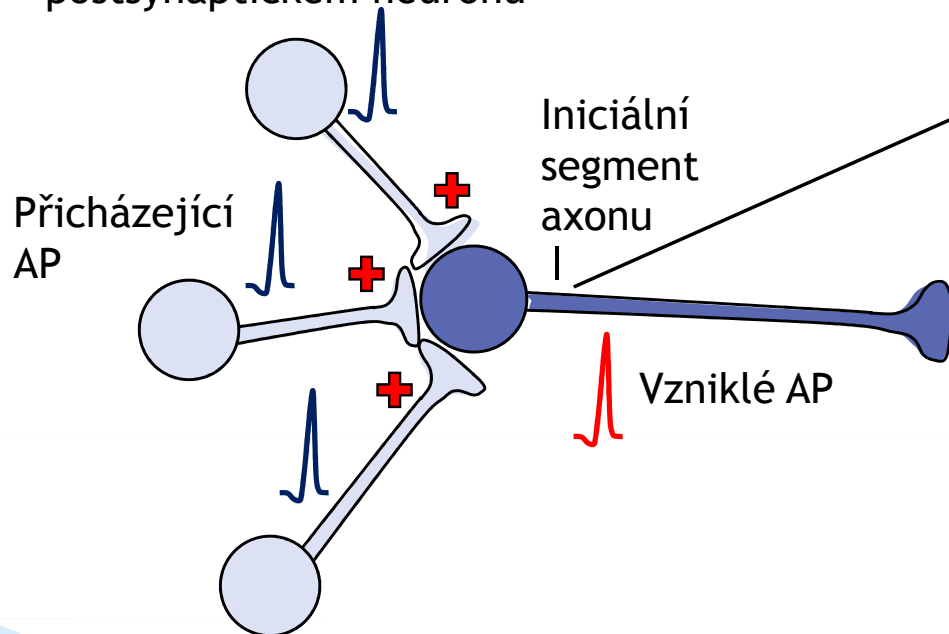
Na těle neuronu mohou být zároveň excitační i inhibiční synapse
EPSP a IPSP se sčítají





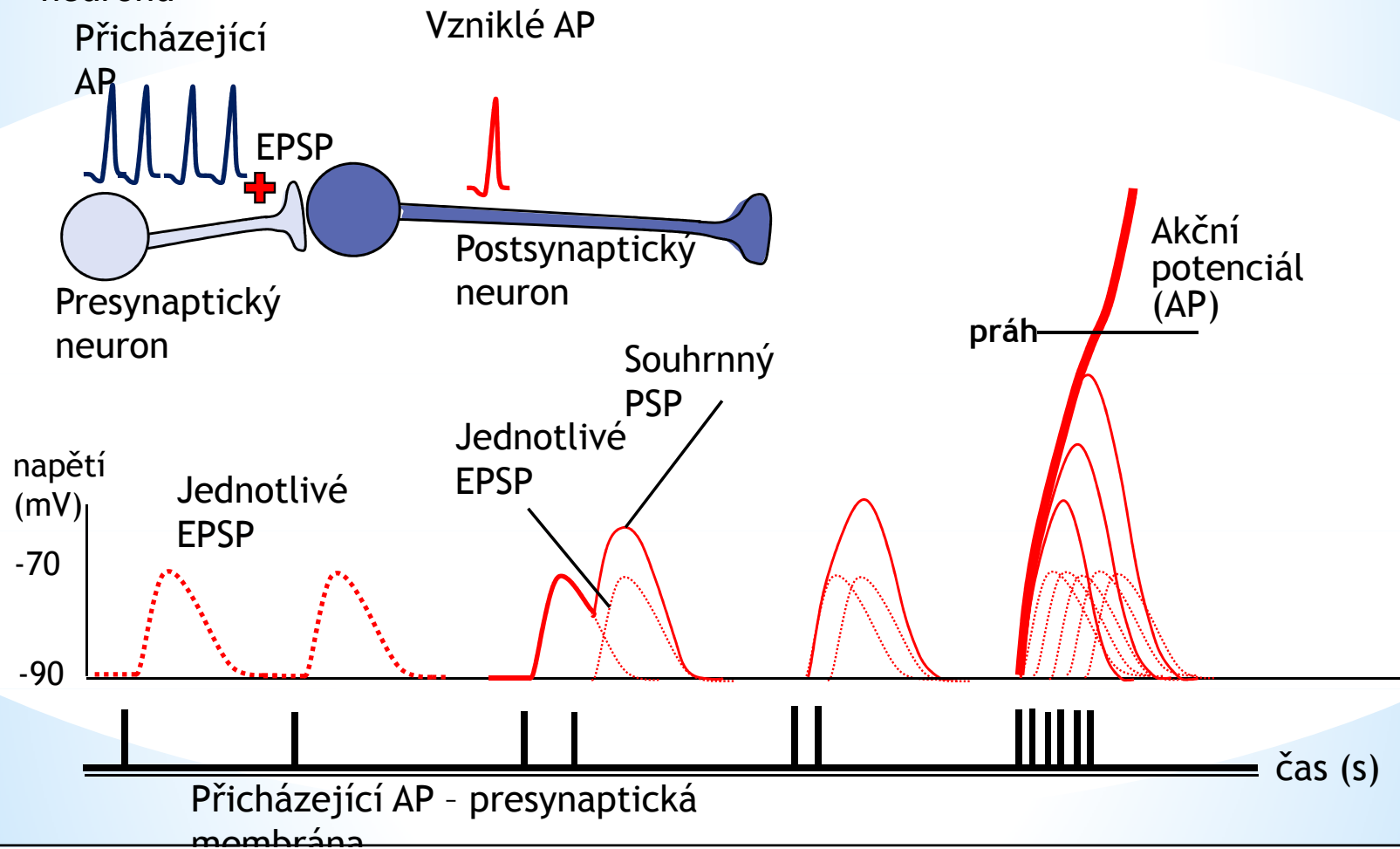
Prostorová sumace

Čím více je na neuronu excitačních synapsí, na které ve stejný čas přišel AP, tím více vzniklo EPSP a tím snadněji je dosaženo prahu pro vznik AP na postsynaptickém neuronu



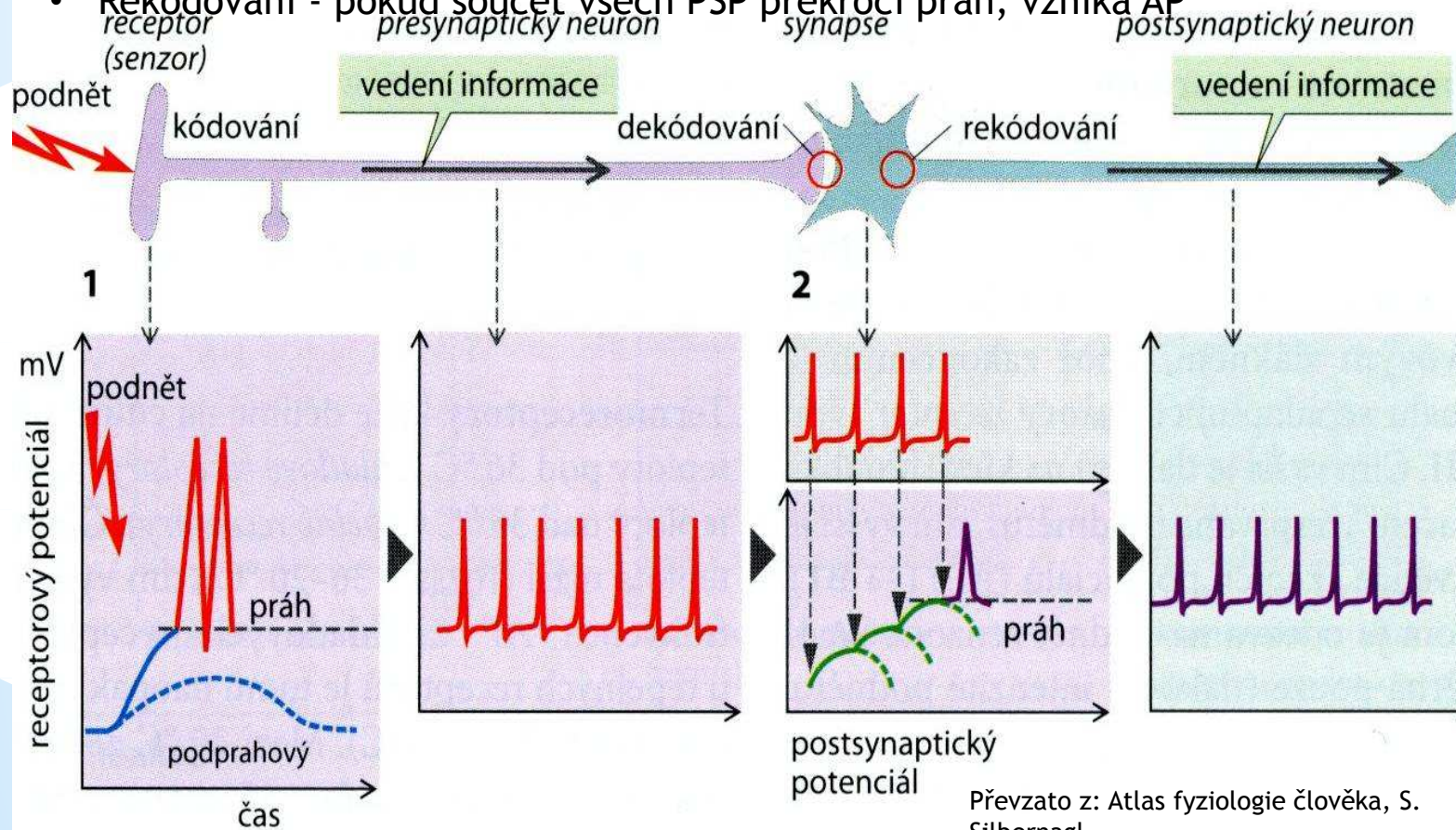
Časová sumace

Čím vyšší je frekvence AP přicházejících na synapsi, tím větší je souhrnný PSP a tím dříve je dosaženo prahové hodnoty pro vznik AP na postsynaptickém neuronu



Kódování informace

- Kódování - intenzita podnětu zaznamenaná receptorem je překódována do frekvence AP
- Dekódování - na synapsi je frekvence AP převedena do PSP
- Rekódování - pokud součet všech PSP překročí práh, vzniká AP



Převzato z: Atlas fyziologie člověka, S. Silbernagl

Podnět a intenzita

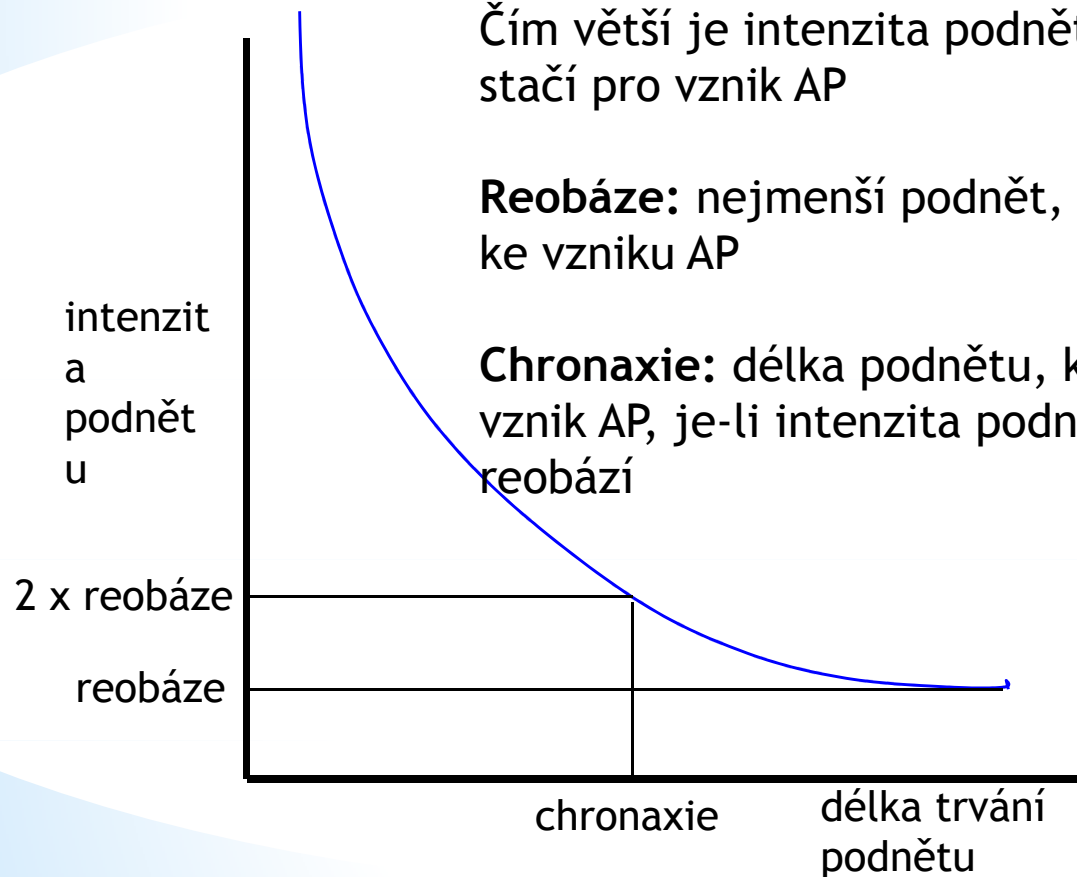
Podnět (sluchový, zrakový, hmatový,...) je kódován receptorem do frekvence AP

Čím déle trvá podnět, tím menší intenzita podnětu stačí pro vznik AP

Čím větší je intenzita podnětu, tím kratší podnět stačí pro vznik AP

Reobáze: nejmenší podnět, při kterém ještě dojde ke vzniku AP

Chronaxie: délka podnětu, která je nezbytná pro vznik AP, je-li intenzita podnětu o velikosti dvou reobází



Synapse

– Podle lokalizace

- Axo-dendritická
- Axo-somatická
- Axo-axonální
- Dendro-axonální
- Dendro-somatická
- Dendro-dendritická

- Nervosvalová ploténka

– Podle struktury

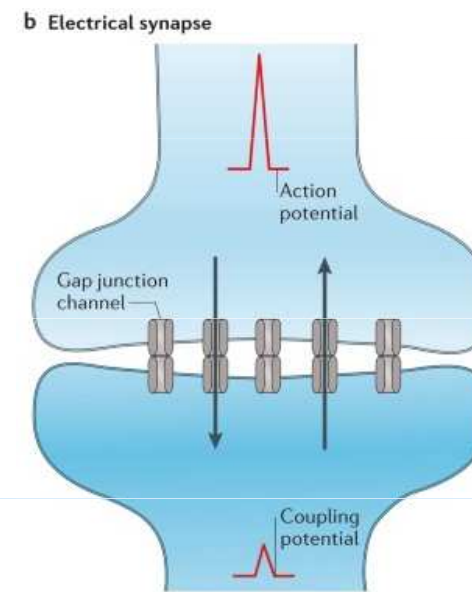
- Elektrická
- Chemická

– Podle funkce

- Excitační
- Inhibiční
- Modulační

* Elektrická synapse

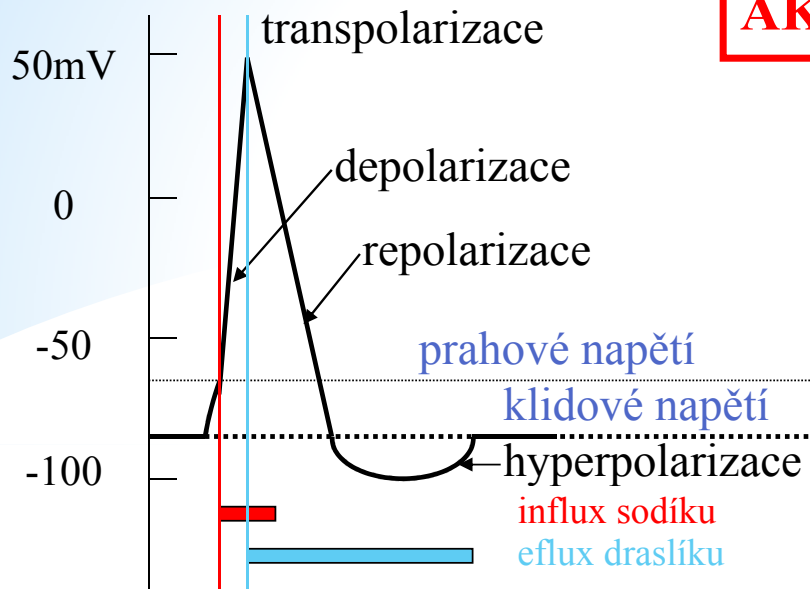
- Evolučně starší
- U člověka minoritní
- Difuzně rozšířena v CNS
- Gap junctions
- Může být obousměrná
- Rychlá



https://media.springernature.com/lw685/springer-static/image/art%3A10.1038%2Fnrn3708/MediaObjects/41583_2014_Article_BFnrn3708_Fig1_HTML.jpg

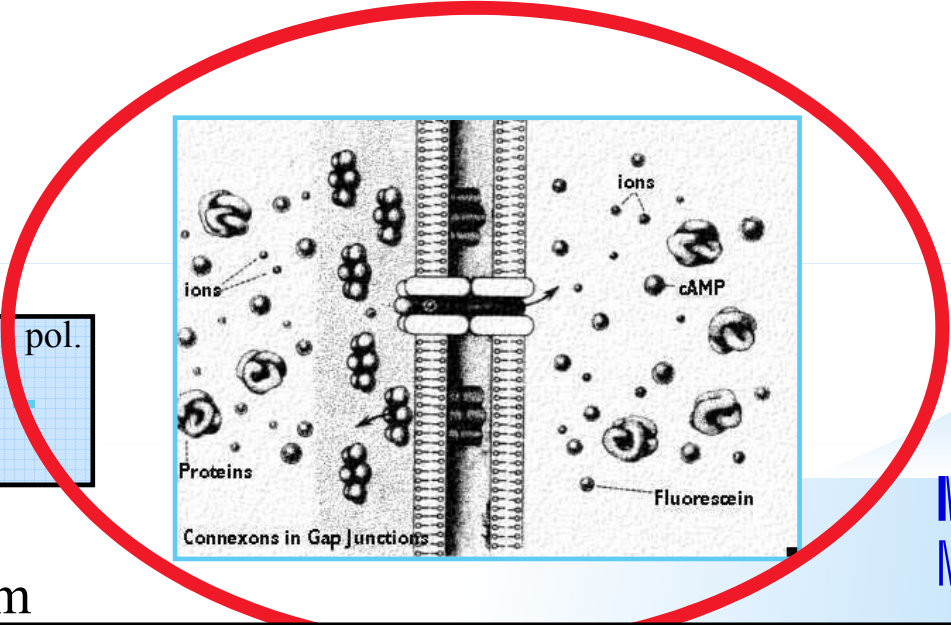
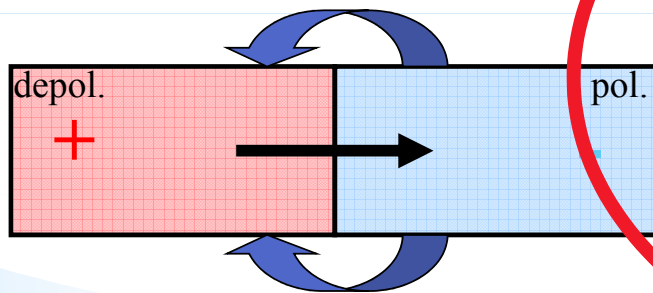
Nature Reviews | Neuroscience

AKČNÍ NAPĚTÍ



- Jednotka vzruchové aktivity
- Reakce „Vše nebo nic“
- Šíření bez dekrementu („domino efekt“)
- **Refrakternita**

Lokální proud



- **KLIDOVÉ MEMBRÁNOVÉ NAPĚTÍ JE PODMÍNKOU DRÁŽDIVOSTI (EXCITABILITY)**
- **ZÁVISÍ NA VYSOKÉ KLIDOVÉ VODIVOSTI PRO DRASLÍK**

AKČNÍ NAPĚTÍ JE PROPAGOVANÝ ELEKTRICKÝ SIGNÁL GENEROVANÝ RYCHLÝM PROUDEM SODÍKU DO BUŇKY

- **AKČNÍ NAPĚTÍ PŘEDSTAVUJE JEDNOTKU INFORMACE**
- **KÓDOVÁNÍ INFORMACÍ JE V TOMTO SYSTÉMU ZAJIŠTĚNO ZMĚNOU FREKVENCE AKČNÍCH NAPĚTÍ**