

Přednášky z lékařské biofyziky

Masarykova univerzita v Brně

**Pokožový
membránový
potenciál**

Tato přednáška byla zpracována na základě podkladů laskavě poskytnutých doc. RNDr. Katarínou Kozlíkovou z Ústavu lékařské fyziky a biofyziky LF UK v Bratislavě

**Akční
potenciál**

**Klidový a akční
membránový potenciál**

Dráždivost

- charakteristika živých buněk na každém stupni organizace živé hmoty
- důležitá podmínka adaptace živého organismu na prostředí
- U vyšších organismů:

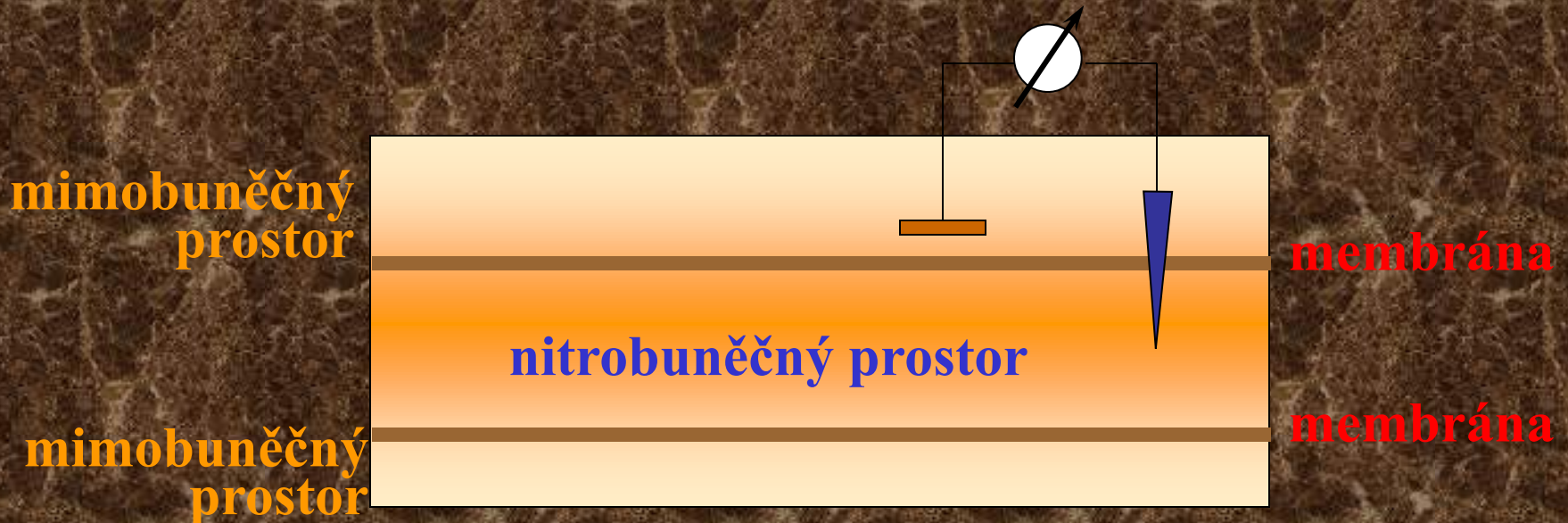
Především pozoruhodná vlastnost určitých specializovaných buněk (skupin buněk - svalových, nervových)

Klidové membránové napětí (1)

potenciálový rozdíl mezi
mikroelektrodou v buňce (*negativní
potenciál*) a povrchovou elektrodou mimo
buňku (*nulový potenciál*)

= membránové napětí

Používají se nepolarizovatelné elektrody



Klidové membránové napětí (2)

Jeho hodnoty závisí na:

- typu buňky
- Druhu živočicha, z něhož buňka pochází
- pro identické buňky – na skladbě a koncentraci iontových složek roztoků obklopujících buňky

• Hodnota KMN při normálním iontové skladbě IC a EC tekutiny:
(-100 mV; -50 mV)

tloušťka membrány ~ 10 nm

intenzita elektrického pole v membráně ~ 10^7 V/m

intenzita elektrického pole na povrchu Země ~ 10^2 V/m

Interpretace KMN (1)

Modely (1):



elektrodifuzní:

- popisují procesy fenomenologicky na základě termodynamiky
- spojují vznik napětí s difuzí iontů přes membránu -
Nernstův a Donnanův model, model transportu iontů

Interpretace KMN (2)

Modely (2):

 fyzikální na bázi chování
pevných látek nebo tekutých
krystalů:

- popisují procesy jako pohyb iontů přes membránu a jeho blokování
- uvažují charakteristické vlastnosti strukturních prvků membrány (lipidy, proteiny) - molekulová interpretace

Interpretace KMN (3)

Modely (3):



na bázi ekvivalentních elektrických obvodů:

- popisují chování buněk v klidu a při jejich excitaci
- využívají elektrické vlastnosti buněk v souladu s elektrodifuzními a pevnolátkovými modely

Některé základní pojmy související s elektrickým polem

➤ Elektrická síla:

➤ síla působící mezi nabitými částicemi

➤ Práce:

➤ síla násobená dráhou, po které působí

➤ Energie:

➤ schopnost konat práci

➤ Potenciálový rozdíl (napětí):

➤ Rozdíl energií potřebných pro přenesení jednotkového náboje z daných míst pole do nekonečna

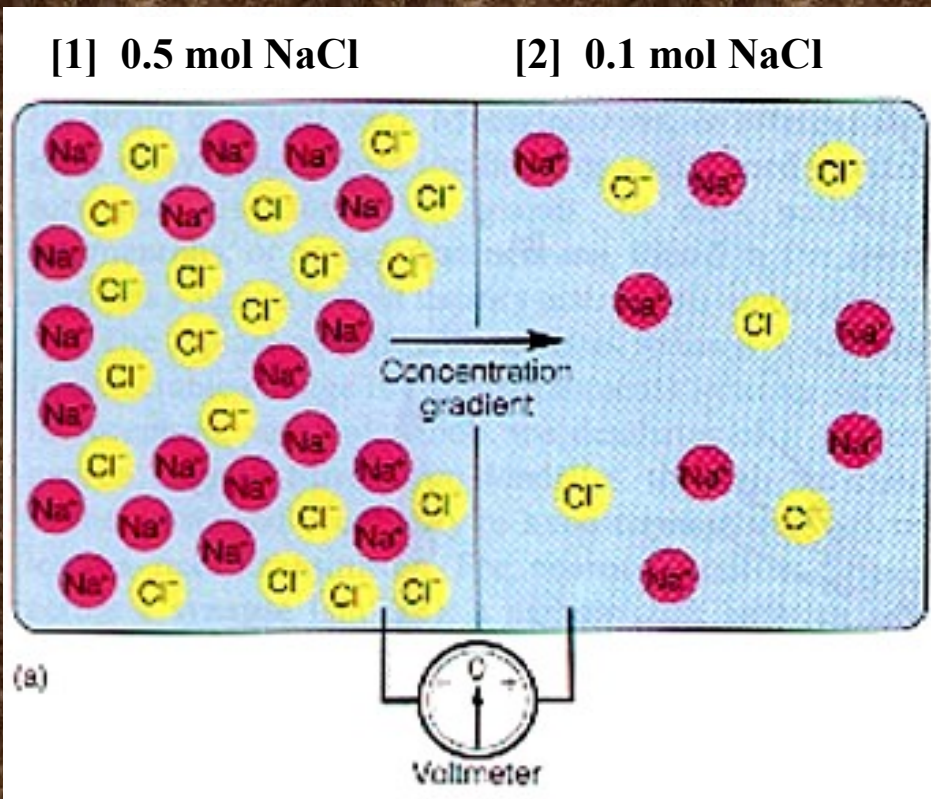
➤ Proud:

➤ pohyb elektricky nabitých částic

Difuzní napětí (1)

vzniká při difuzi nabitých částic

DN v neživých systémech - roztoky jsou oddělené membránou permeabilní pro Na^+ a Cl^-

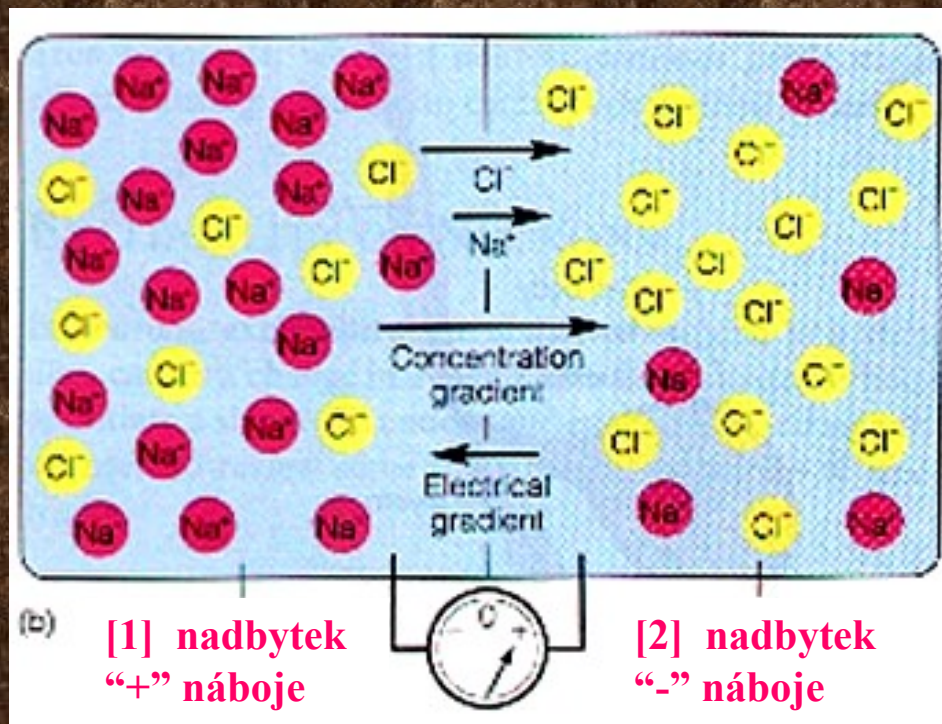


elektricky neutrální kompartmenty, ale je přítomen koncentrační gradient
⇒ difuze iontů z [1] do [2]

Difuzní napětí (2)

hydratační obal (molekuly vody připojené k iontům) Na^+ (více) a Cl^- (méně)

⇒ rychlejší difuze Cl^- po koncentračním spádu



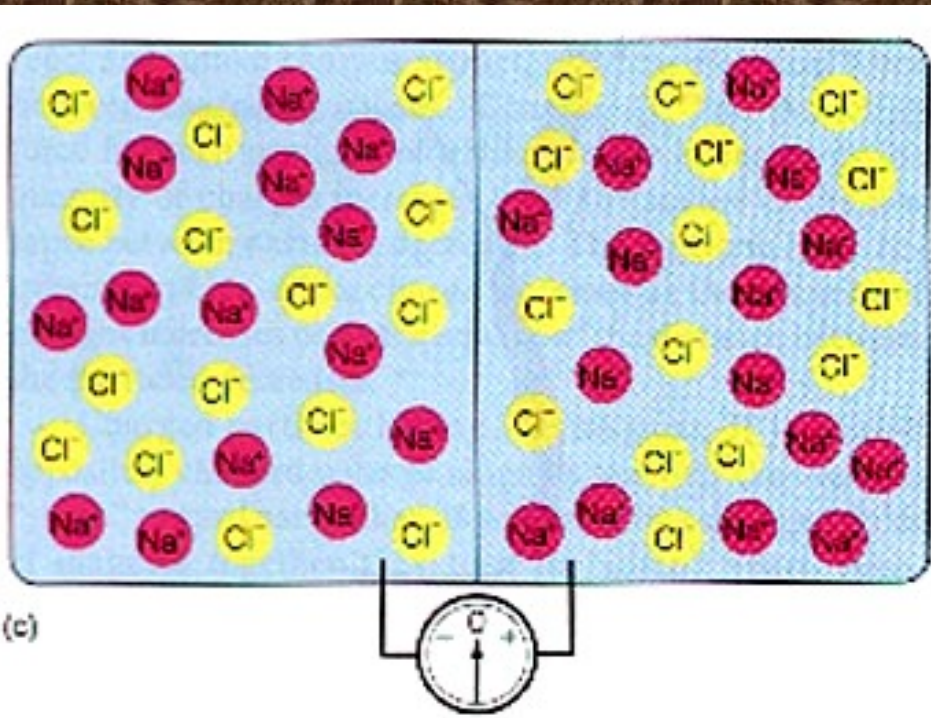
⇒ vznikne dočasné napětí mezi oběma kompartmenty

⇒ **difuzní napětí**

elektrické pole odpuzuje Cl^- z [2]

Difuzní napětí (3)

elektrický gradient působí proti koncentračnímu gradientu, dokud není dosaženo rovnováhy (nulového výsledného toku iontů)



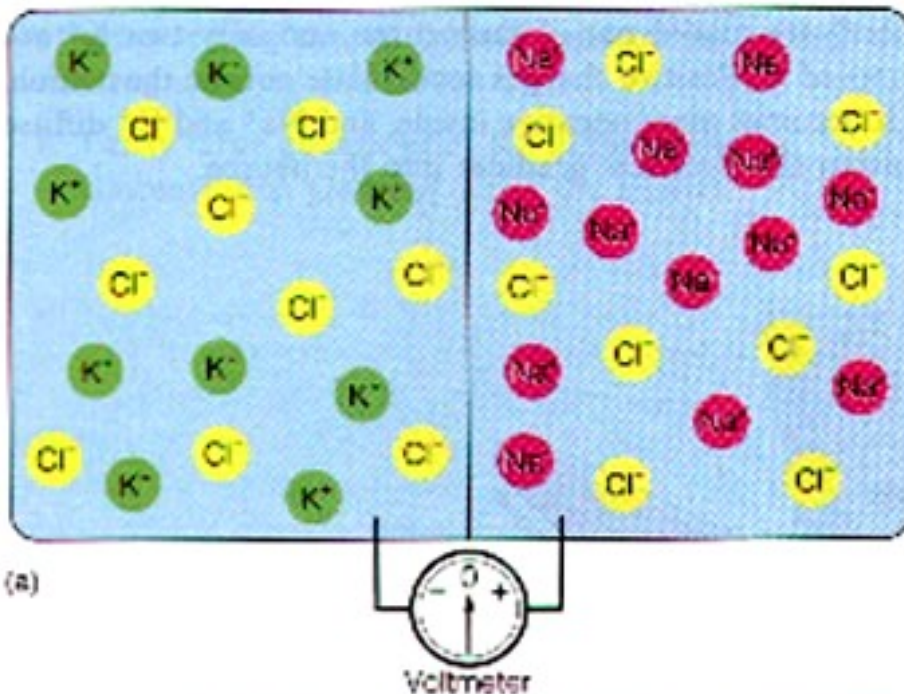
membrána permeabilní pro oba ionty
⇒ **rovnováhy** je dosaženo, když jsou koncentrace iontů stejné $[1] = [2]$
⇒ **nulové napětí**

Difuzní napětí (4)

DN v živých systémech - roztoky oddělené selektivně permeabilní membránou

[1] 0.1 mol KCl

[2] 0.1 mol NaCl

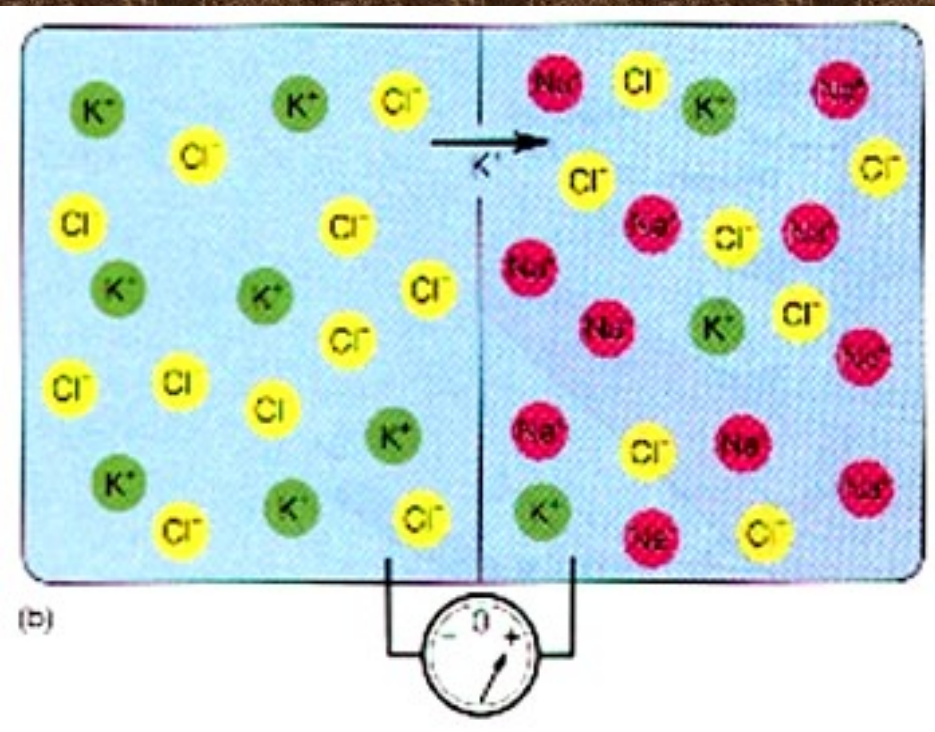


V takovém systému nastává rovnováha, když tam není žádný výsledný tok jednotlivých iontů

Difuzní napětí (5)

membrána permeabilní pro K^+
nepermeabilní pro Na^+ a Cl^-

⇒ difuze K^+ po jeho koncentračním spádu, dokud nevznikne stejně velký, avšak opačně orientovaný elektrický gradient
⇒ vznikne rovnovážné napětí - výsledný difuzní tok je nulový



Membránová rovnováha

V živých systémech molekuly (produkty metabolismu) nedifundují ve spojitém prostředí - překážky

Membrány:

- Vymezují buňku a její součásti
- jsou permeabilní pro různé látky v různé míře
- aktivně se podílejí na procesech
- mají velký vliv na transportní procesy

Jednoduchý případ membránové rovnováhy (1)

Týž elektrolyt na obou stranách membrány, ale v různých koncentracích ($c^I > c^{II}$), membrána je permeabilní jen pro kationty

membrána

Elektrolyt I

Elektrolyt II

Kationty c_c^I

Anionty c_A^{II}

Anionty c_A^I

Kationty c_c^{II}

Výsledek:

elektrická dvouvrstva

vytvoří se na membráně

vrstva 1:

anionty zastaveny na straně I

vrstva 2:

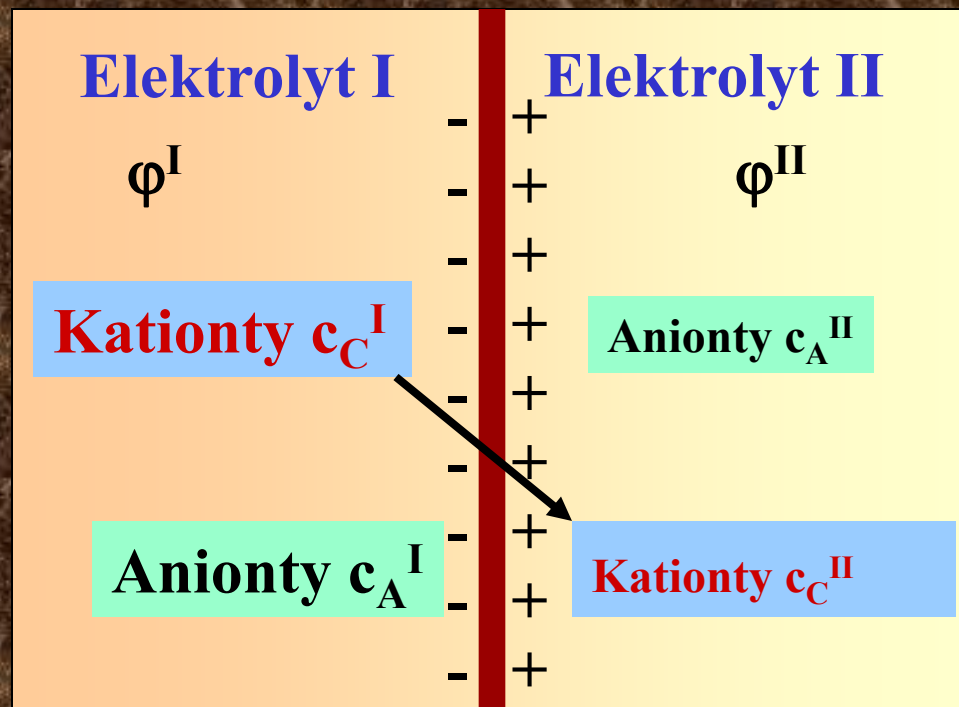
kationty přitahovány k aniontům (II)

Jednoduchý případ membránové rovnováhy (2)

Koncentrační rozdíl "pohání" kationty,
elektrické pole dvojvrstvy je "tlačí zpět"

membrána

V rovnováze: vznikne
potenciálový rozdíl U :



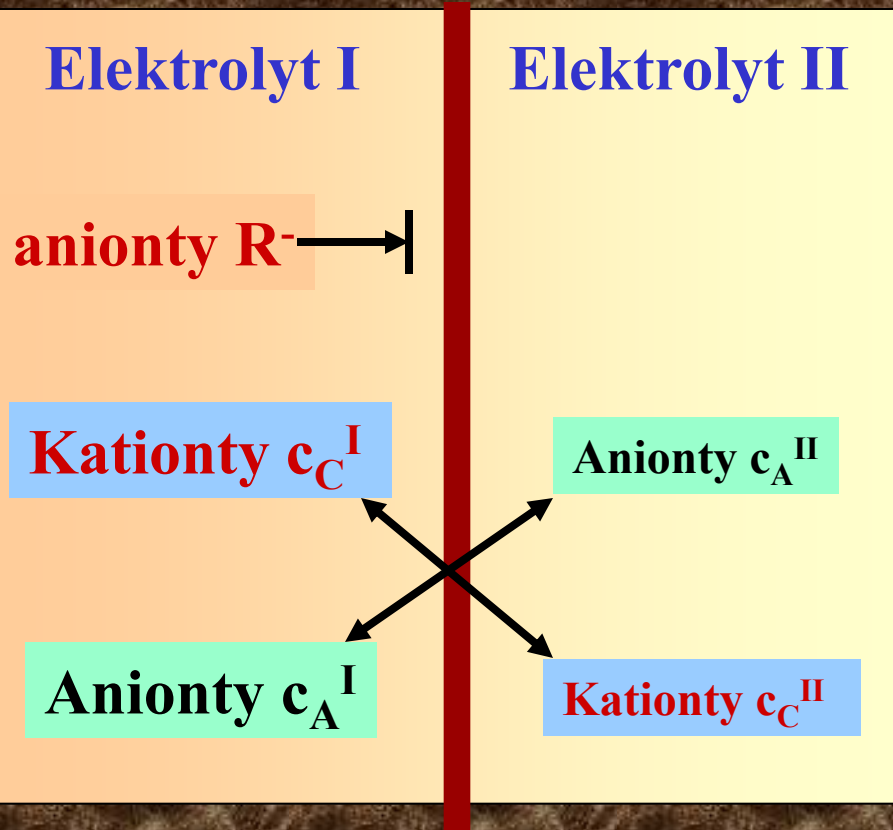
$$U = \varphi^I - \varphi^{II} = -\frac{RT}{z_C \times F} \ln \frac{c_C^I}{c_C^{II}}$$

(Nernstova rovnice)

Donnanova rovnováha (1)

Stejný elektrolyt na obou stranách, různé koncentrace ($c^I > c^{II}$), membrána permeabilní pro malé jednomocné ionty C^+ a A^- , nepermeabilní pro R^-

membrána



difuzibilní ionty: C^+ , A^-
volně difundují

nedifuzibilní ionty: R^-

přítomnost R^- :
nevznikne rovnoměrné
rozdělení C^+ ani A^-
 \Rightarrow speciální případ
rovnováhy -

Donnanova rovnováha

Donnanova rovnováha (2)

Rovnovážné koncentrace:

$$c_C^I \times c_A^I = c_C^{II} \times c_A^{II}$$

membrána

Elektrolyt I

Elektrolyt II

anionty R^- →

Kationty

c_C^I

Anionty c_A^{II}

Anionty c_A^I

Kationty c_C^{II}

Donnanův poměr:

$$\frac{c_C^I}{c_C^{II}} = \frac{c_A^{II}}{c_A^I} = r$$

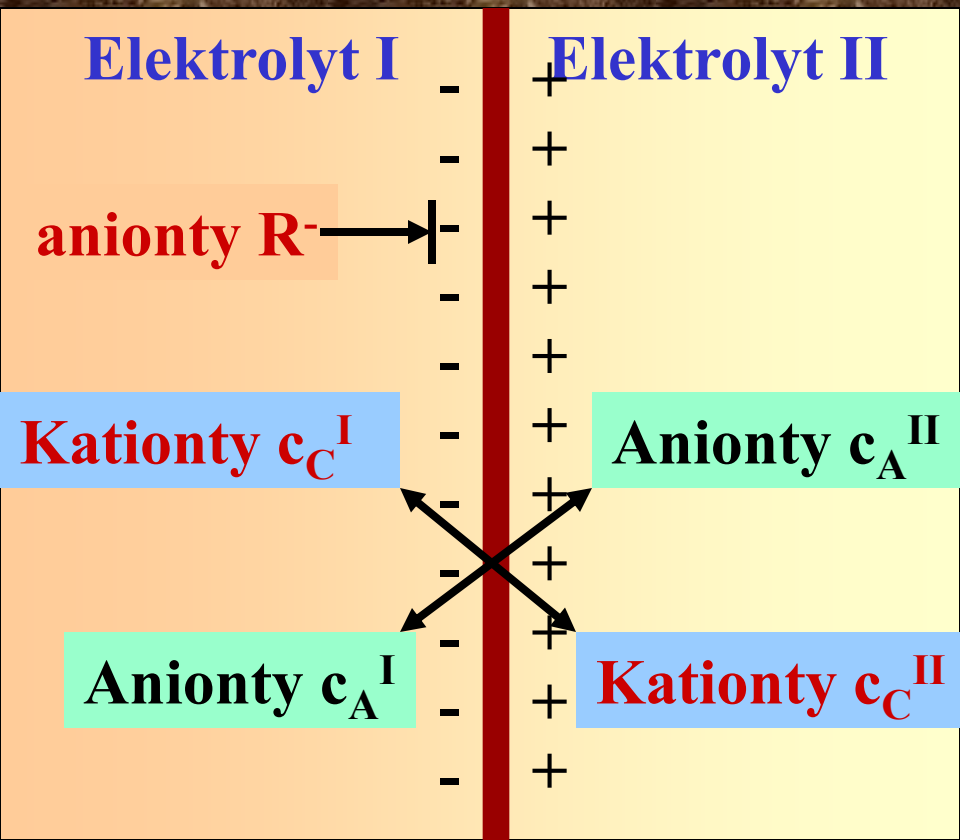
Donnanova rovnováha (3)

Donnanův poměr:

$$\frac{c_C^I}{c_C^{II}} = \frac{c_A^{II}}{c_A^I} = r$$

$$r = z_i \sqrt{\frac{c_i^I}{c_i^{II}}}$$

membrána



Donnanovo napětí:

$$U = \phi^{II} - \phi^I =$$

$$= -\frac{R \times T}{F} \ln \frac{c_C^I}{c_C^{II}} =$$

$$= -\frac{R \times T}{F} \ln \frac{c_A^{II}}{c_A^I} =$$

$$= -\frac{R \times T}{F} \ln r$$

Donnanův model v živé buňce (1)

**buněčná
membrána**

intra

extra

**fosfátové
anionty**

**proteinové
anionty**

K⁺

Cl⁻

Na⁺

Cl⁻

K⁺

difuzibilní: K⁺, Cl⁻
nedifuzibilní: Na⁺, anionty

též bílkoviny a nukleové
kyseliny

Koncentrace:

$[K^+]_{in} > [K^+]_{ex}$

$[Cl^-]_{in} < [Cl^-]_{ex}$

Donnanův model v živé buňce (3)

Donnanovo napětí (klidové napětí) [mV]:

Objekt:	Výpočet:		Měření:
	K ⁺ :	Cl ⁻ :	
axon sépie	- 91	- 103	- 62
sval žáby	- 56	- 59	- 92
sval potkana	- 95	- 86	- 92

- Donnanův model se liší od reality:
- buňka a okolní prostředí se považují za termodynamicky uzavřené systémy
- Nedifuzibilní ionty se považují za úplně nedifuzibilní, membrána není překážkou pro difuzibilní ionty
- zanedbává se vliv iontových pump z hlediska koncentrace iontů
- interakce mezi membránou a ionty se nebere do úvahy

Model transportu iontů (1)

Elektrodifuzní model s menším počtem zjednodušení.

Předpokládáme:

- konstantní koncentrační rozdíl mezi vnější a vnitřní stranou membrány \Rightarrow konstantní transport přes membránu
- **migrace iontů přes membránu \Rightarrow elektrická dvojvrstva na obou stranách membrány**
- všechny druhy iontů na obou stranách membrány se berou v úvahu současně
- **empirický fakt - membrána není ani úplně permeabilní, ani úplně nepermeabilní pro žádný iont**
- různá permeabilita pro různé ionty

Model transportu iontů (2)

$$U = \frac{R \cdot T}{F} \cdot \ln \frac{\sum P_{ki} \cdot c_{ki \text{ EXT}} + \sum P_{ai} \cdot c_{ai \text{ INT}}}{\sum P_{ki} \cdot c_{ki \text{ INT}} + \sum P_{ai} \cdot c_{ai \text{ EXT}}}$$

Goldman - Hodgkin - Katz

$$U = \frac{2,3 \cdot R \cdot T}{F} \cdot \log \frac{P_{K^+} \cdot [K^+]_{\text{EXT}} + P_{Na^+} \cdot [Na^+]_{\text{EXT}} + P_{Cl^-} \cdot [Cl^-]_{\text{INT}}}{P_{K^+} \cdot [K^+]_{\text{INT}} + P_{Na^+} \cdot [Na^+]_{\text{INT}} + P_{Cl^-} \cdot [Cl^-]_{\text{EXT}}}$$

P - permeabilita

Model transportu iontů (3)

Tzv. obří axon sépie ($t = 25^{\circ}\text{C}$):

$$p_K : p_{\text{Na}} : p_{\text{Cl}} = 1 : 0,04 : 0,45$$

Výpočet: $U = -61 \text{ mV}$

Měření: $U = -62 \text{ mV}$

Sval žáby ($t = 25^{\circ}\text{C}$):

$$p_K : p_{\text{Na}} : p_{\text{Cl}} = 1 : 0,01 : 2$$

Výpočet: $U = -90 \text{ mV}$

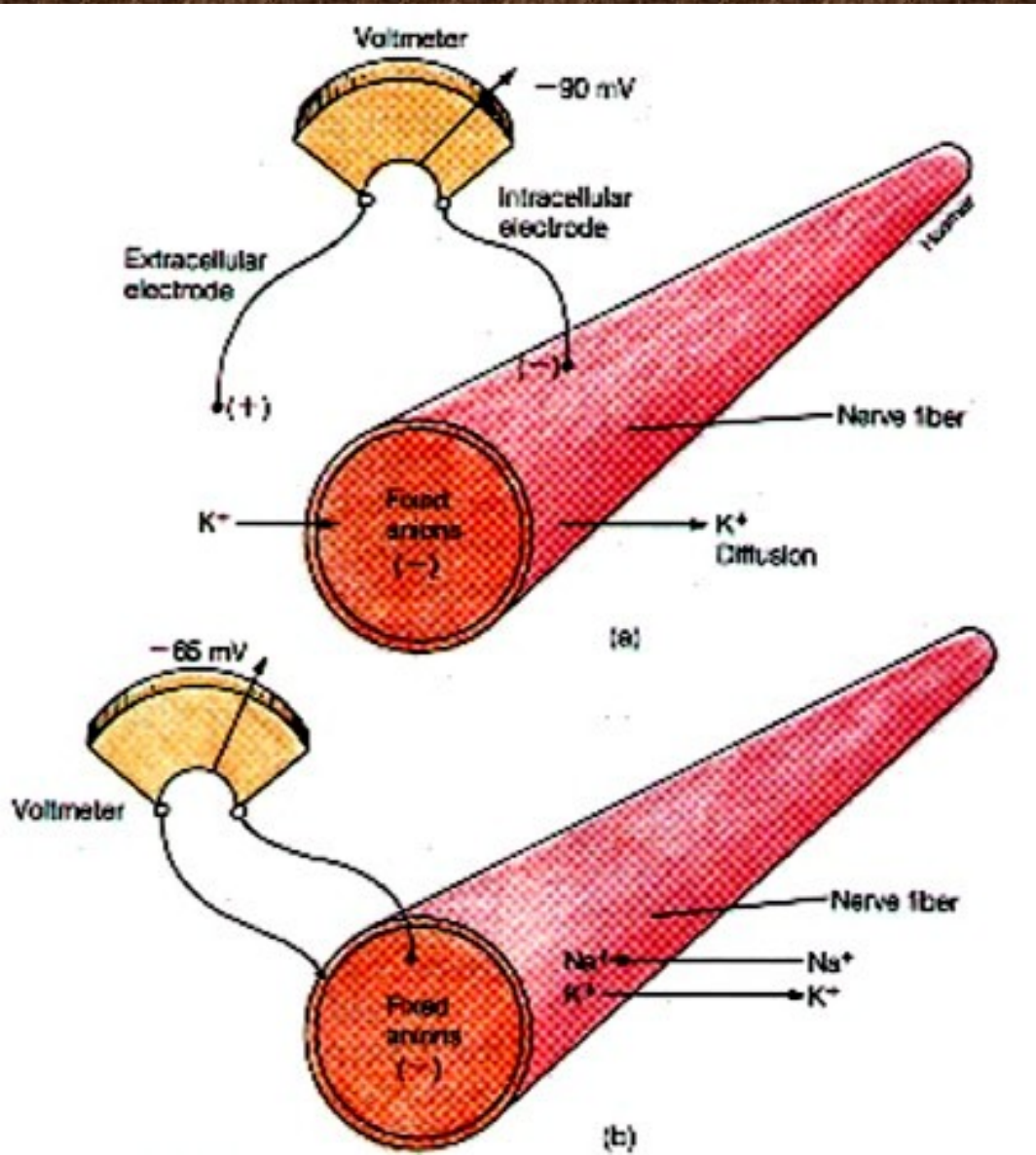
Měření: $U = -92 \text{ mV}$

Akční potenciál

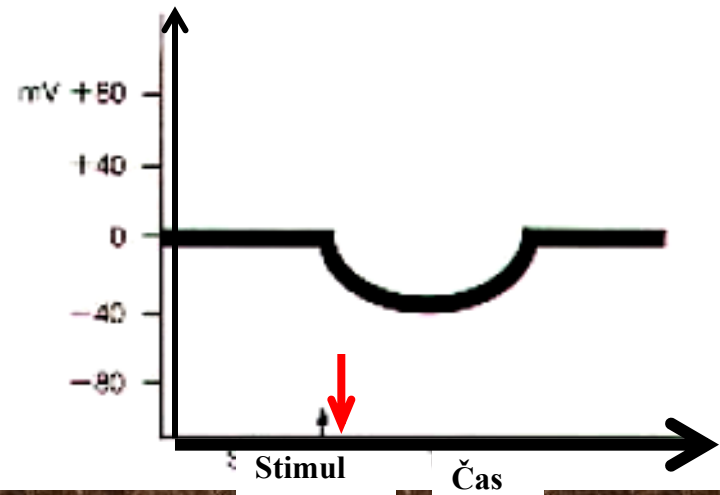
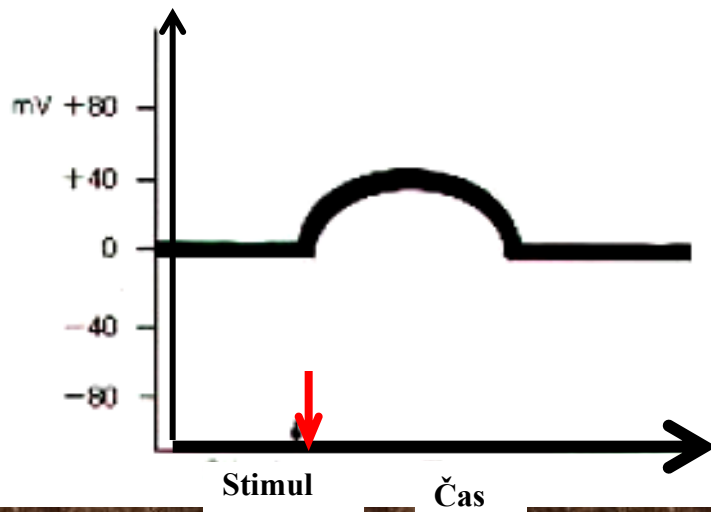
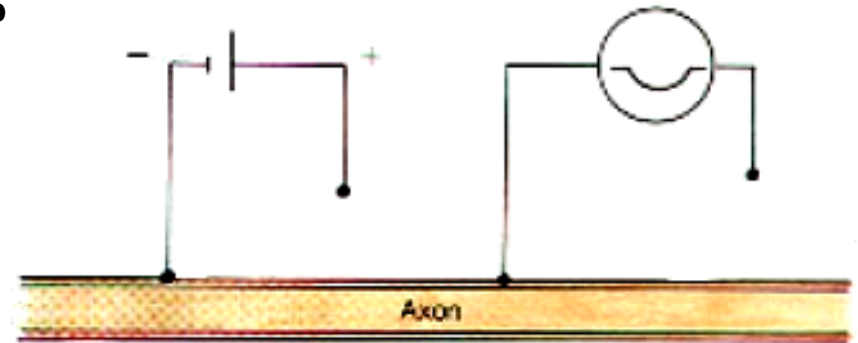
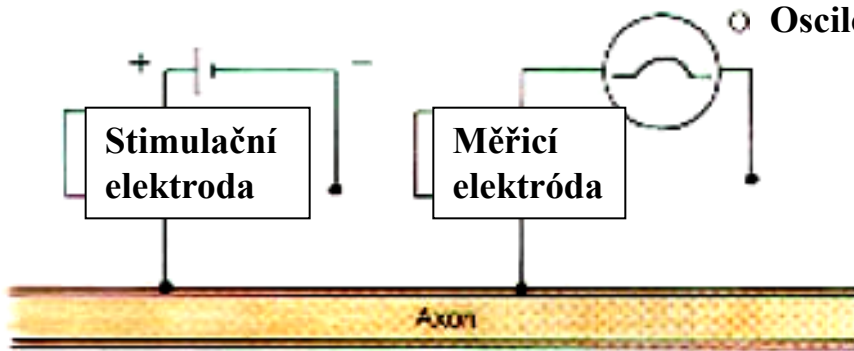
Membránové napětí

pro draslík

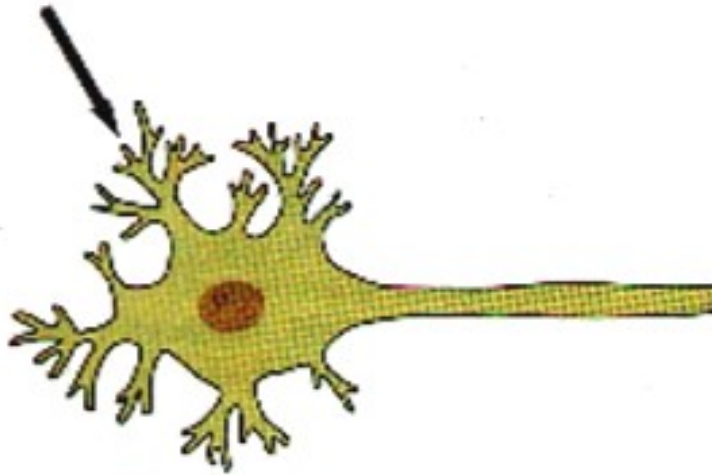
pro draslík
a sodík



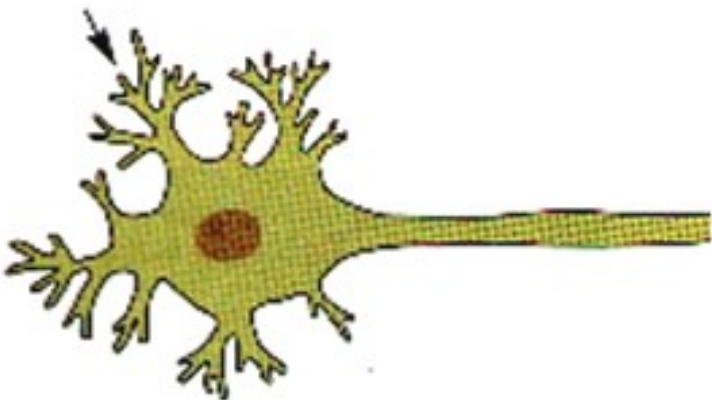
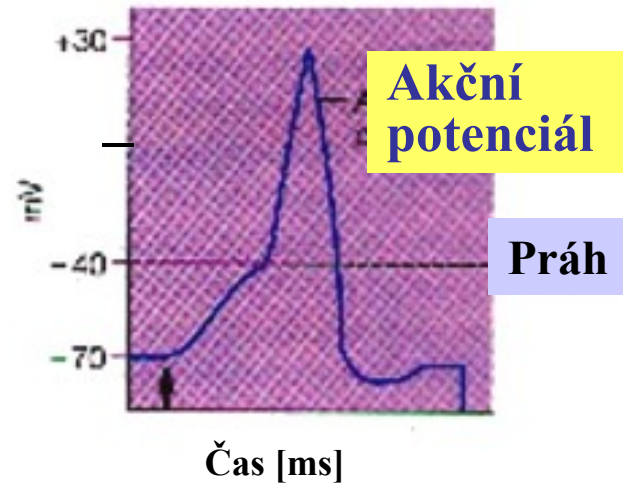
Depolarizace a hyperpolarizace



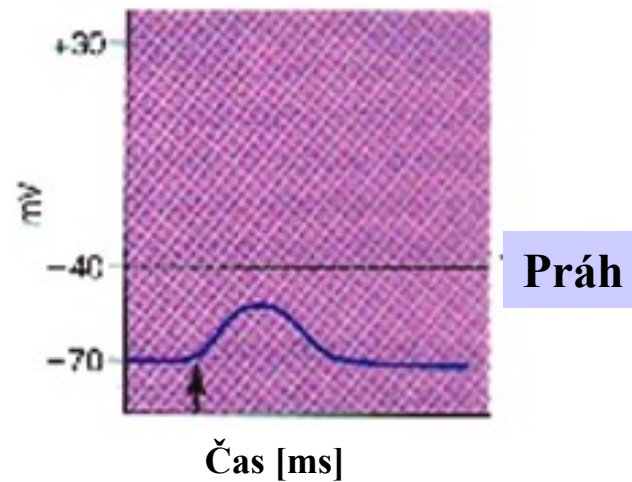
Vznik akčního potenciálu



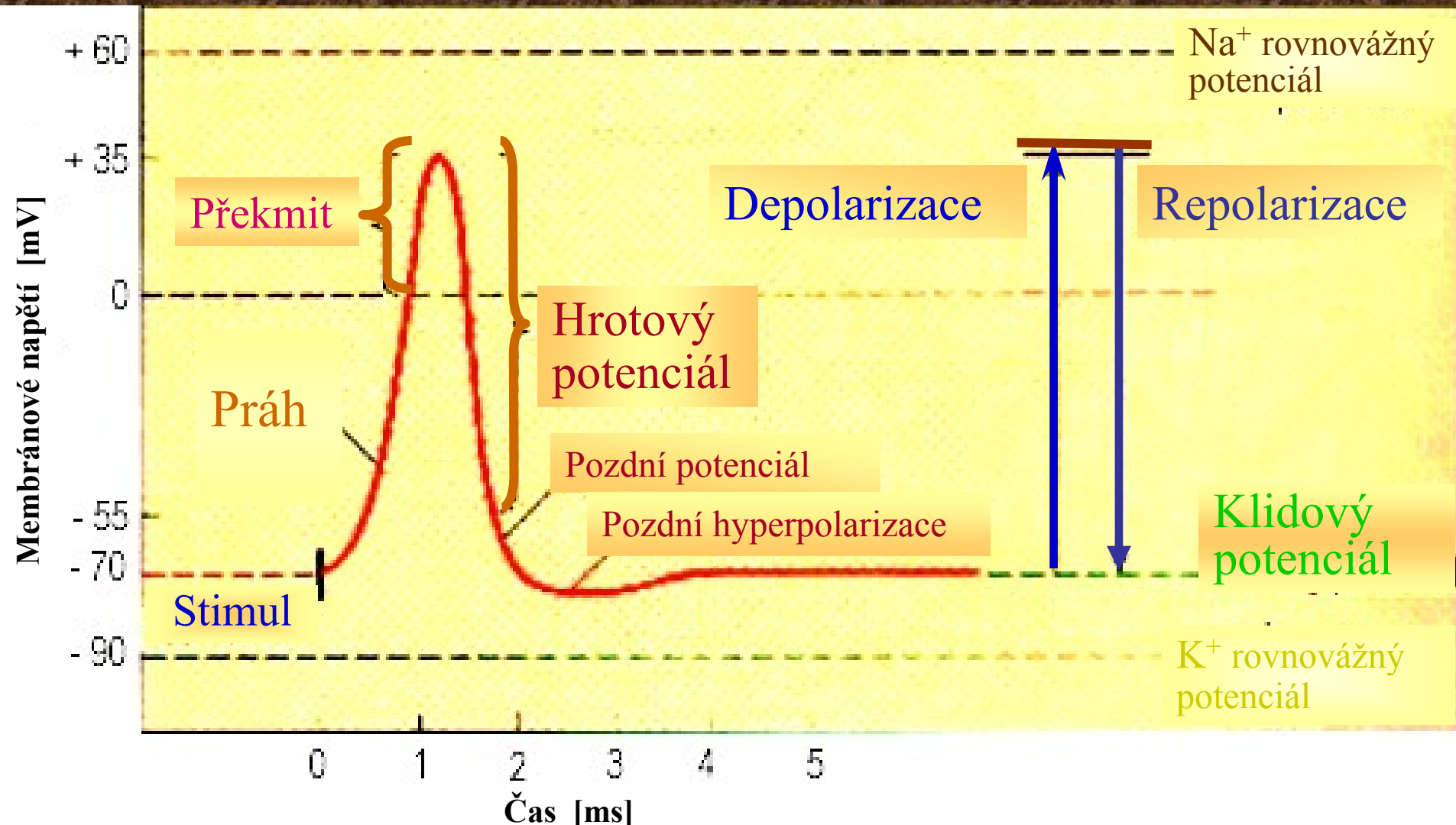
Nadprahový stimul



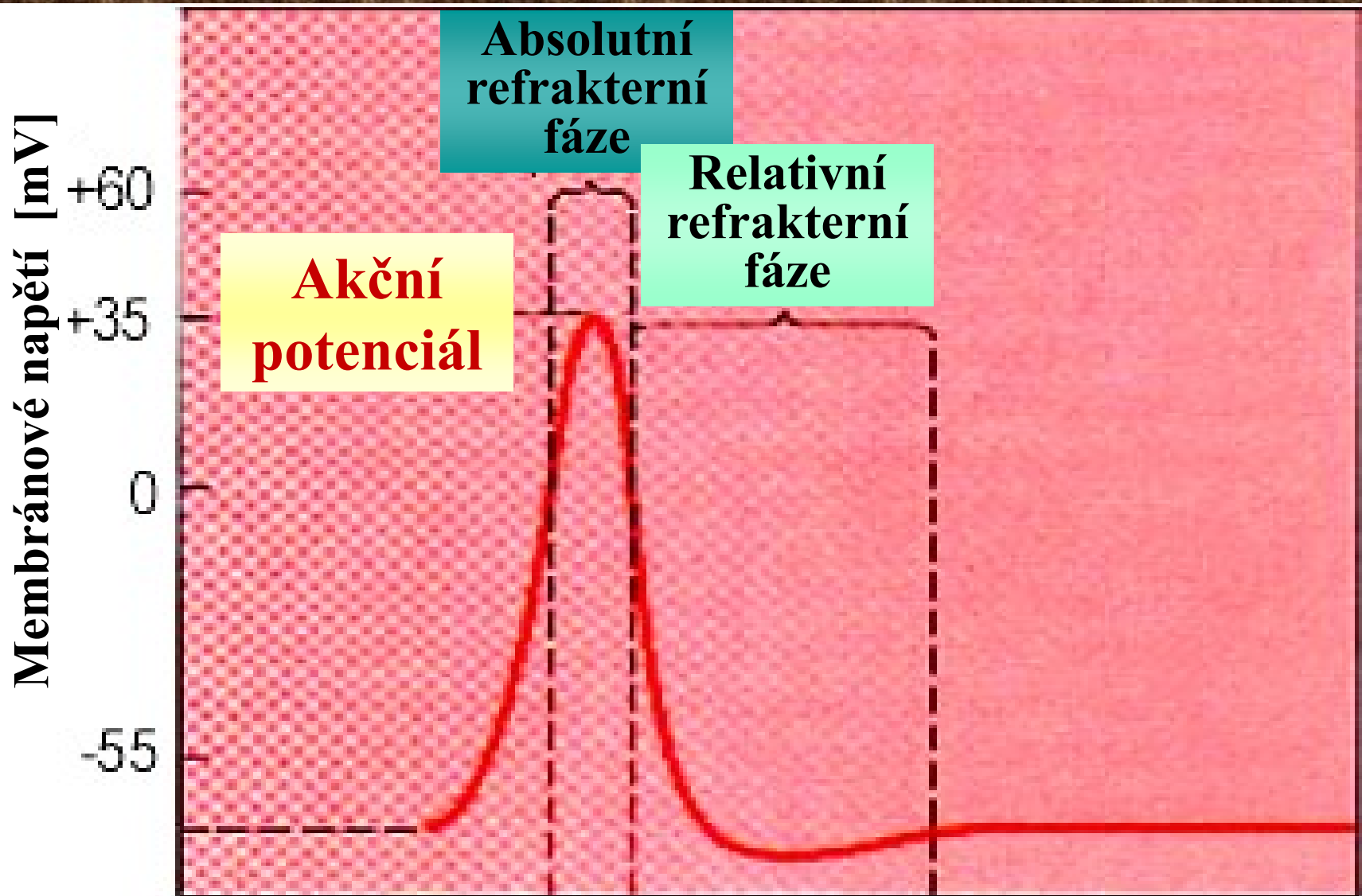
Podprahový stimul



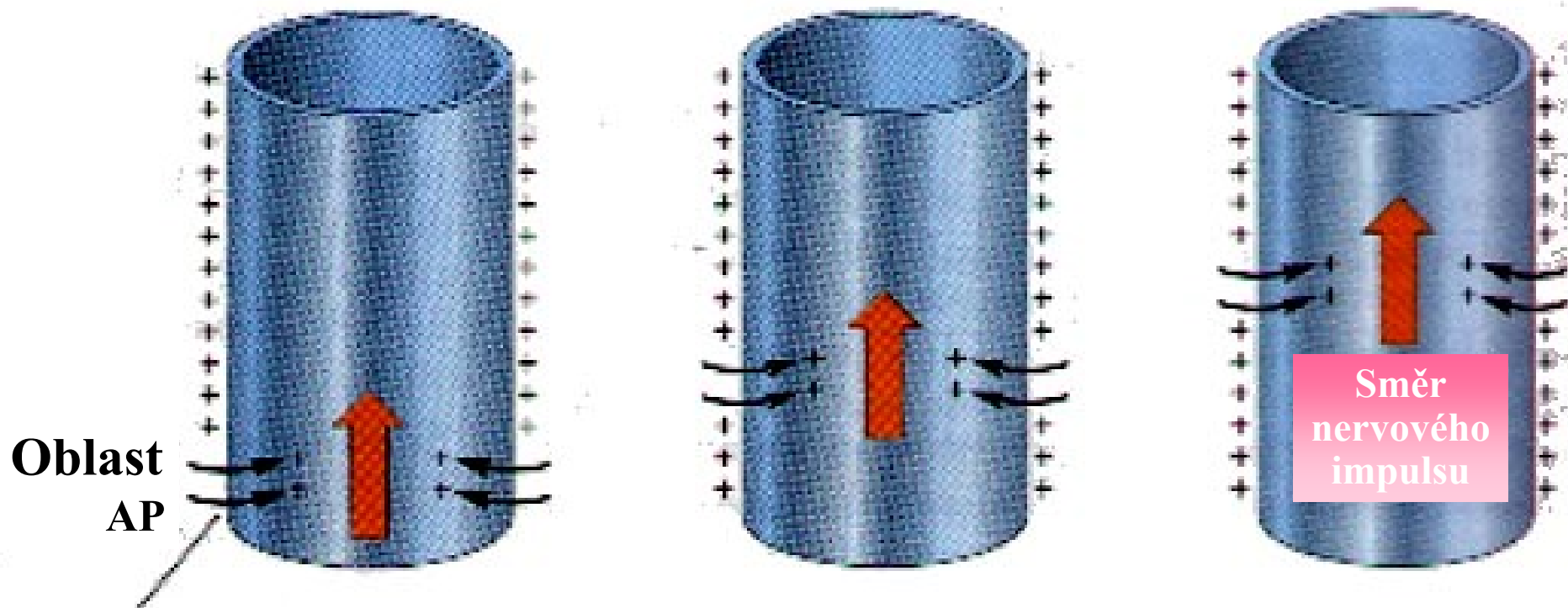
Popis akčního potenciálu



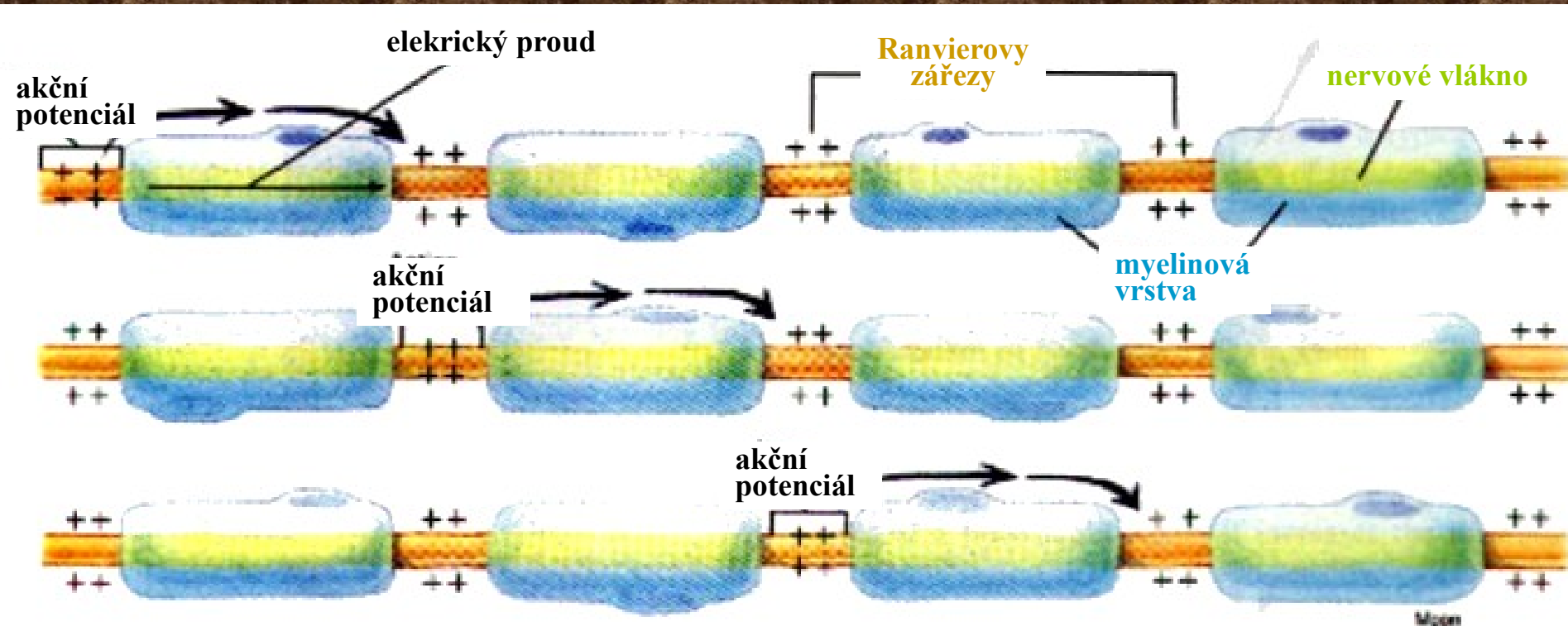
Refrakterní fáze



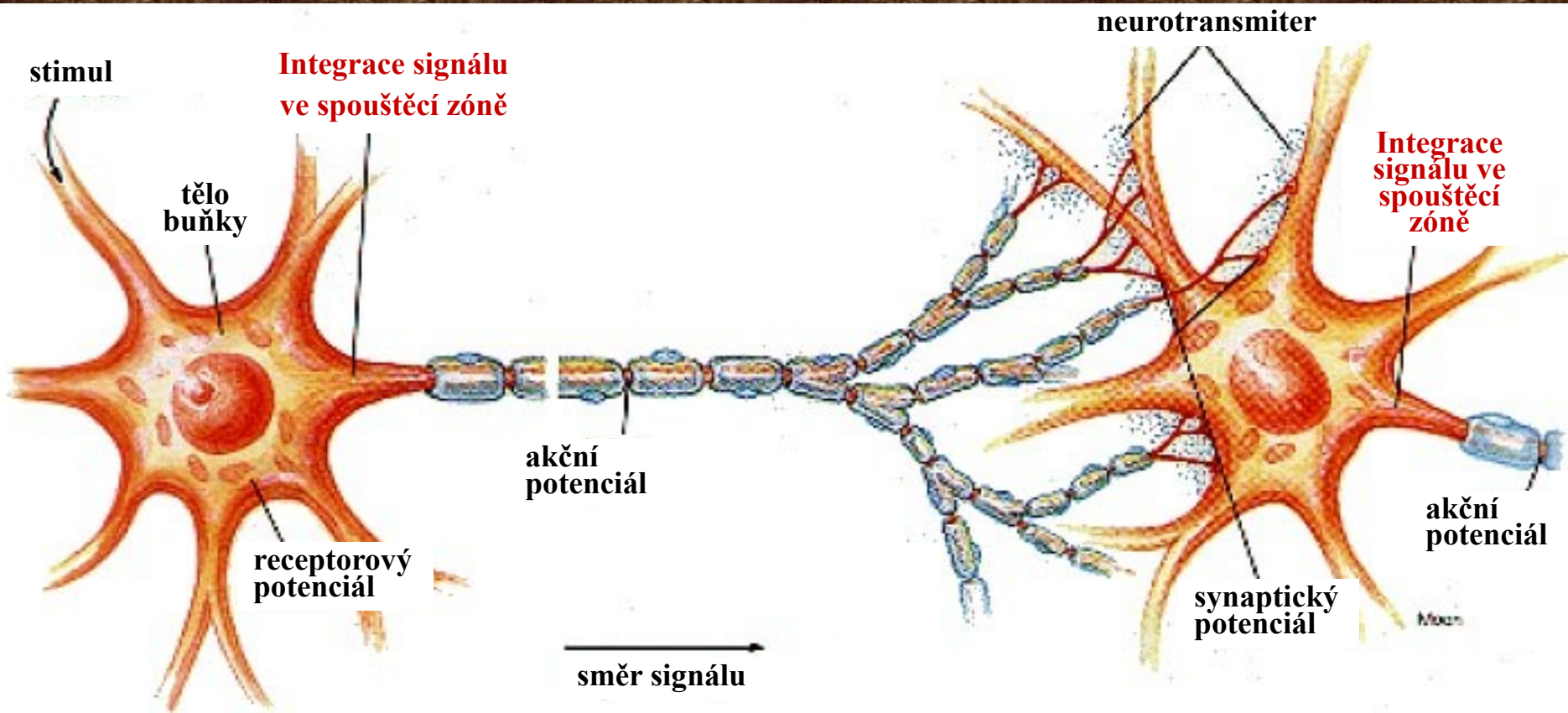
Vedení vzruchu po membráně



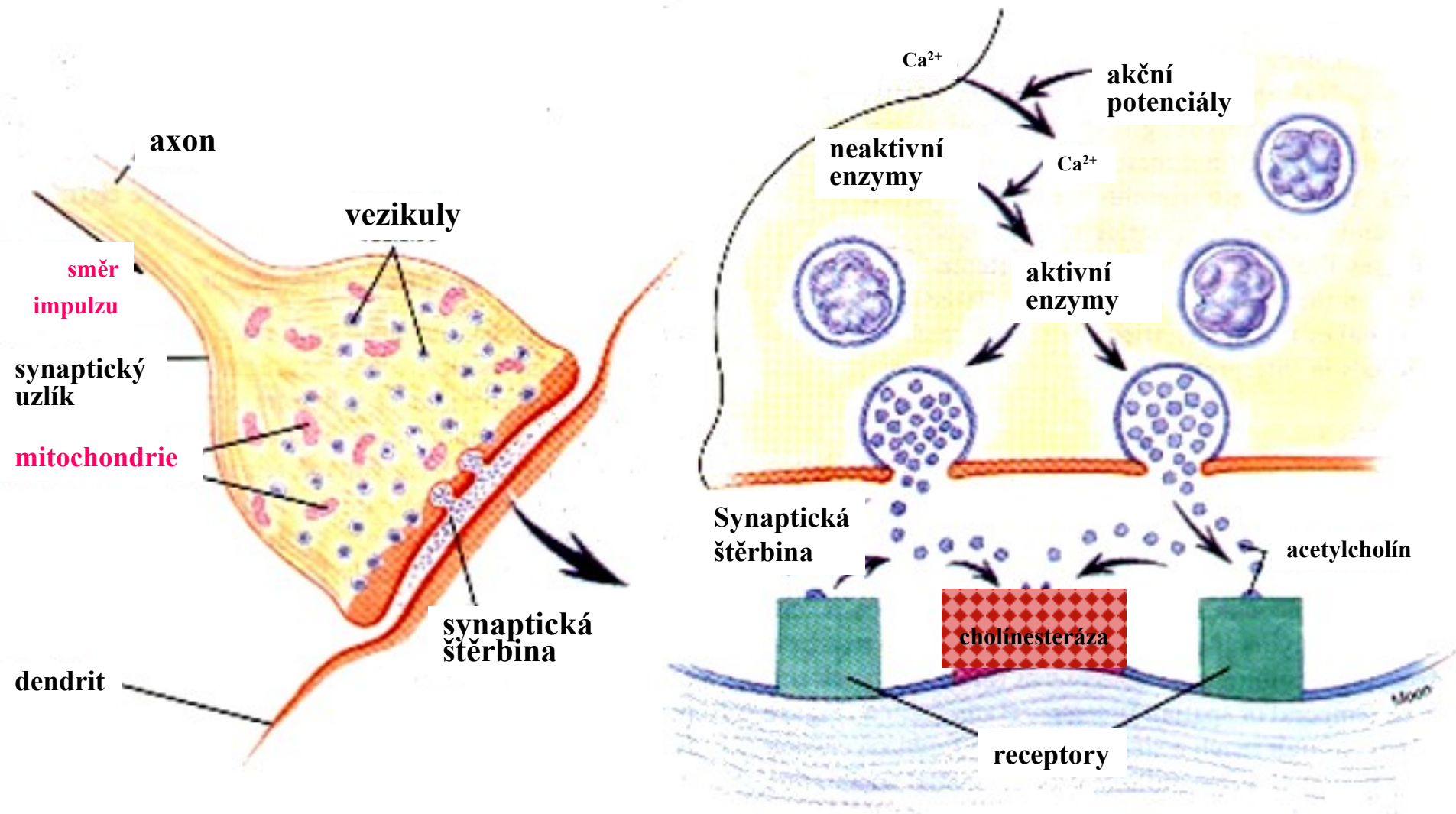
Vedení vzruchu po (myelinizovaném) nervovém vlákně saltatorické - skokem



Vedení vzruchu mezi nervovými buňkami

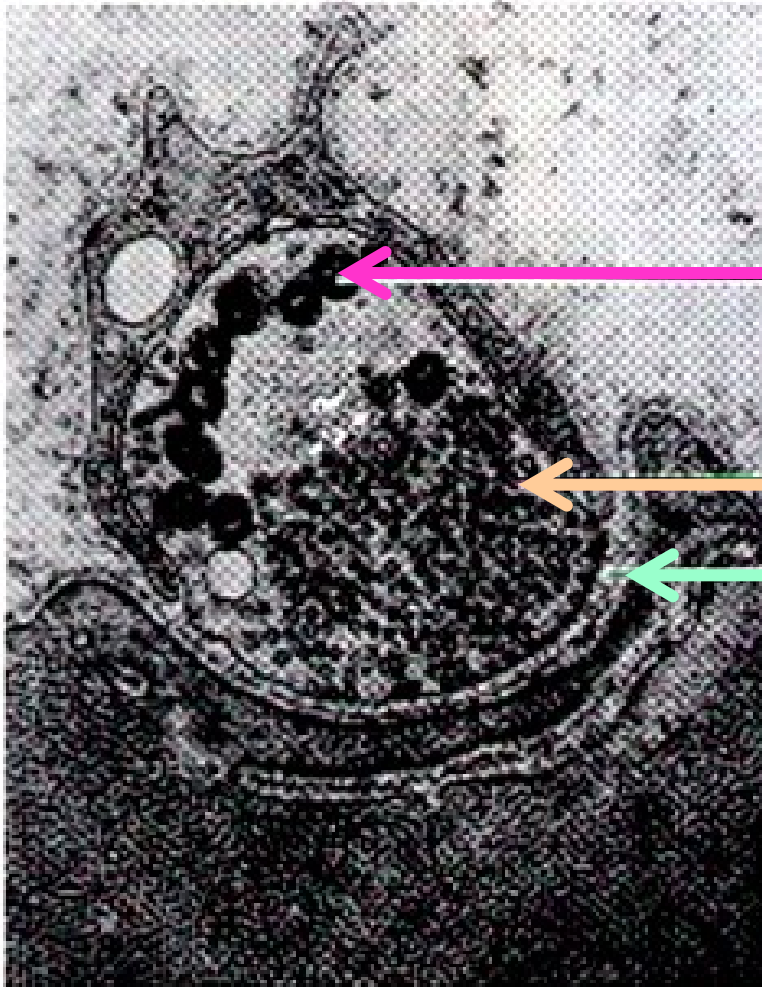


Chemická synapse



Chemická synapse

záznam z elektronového mikroskopu

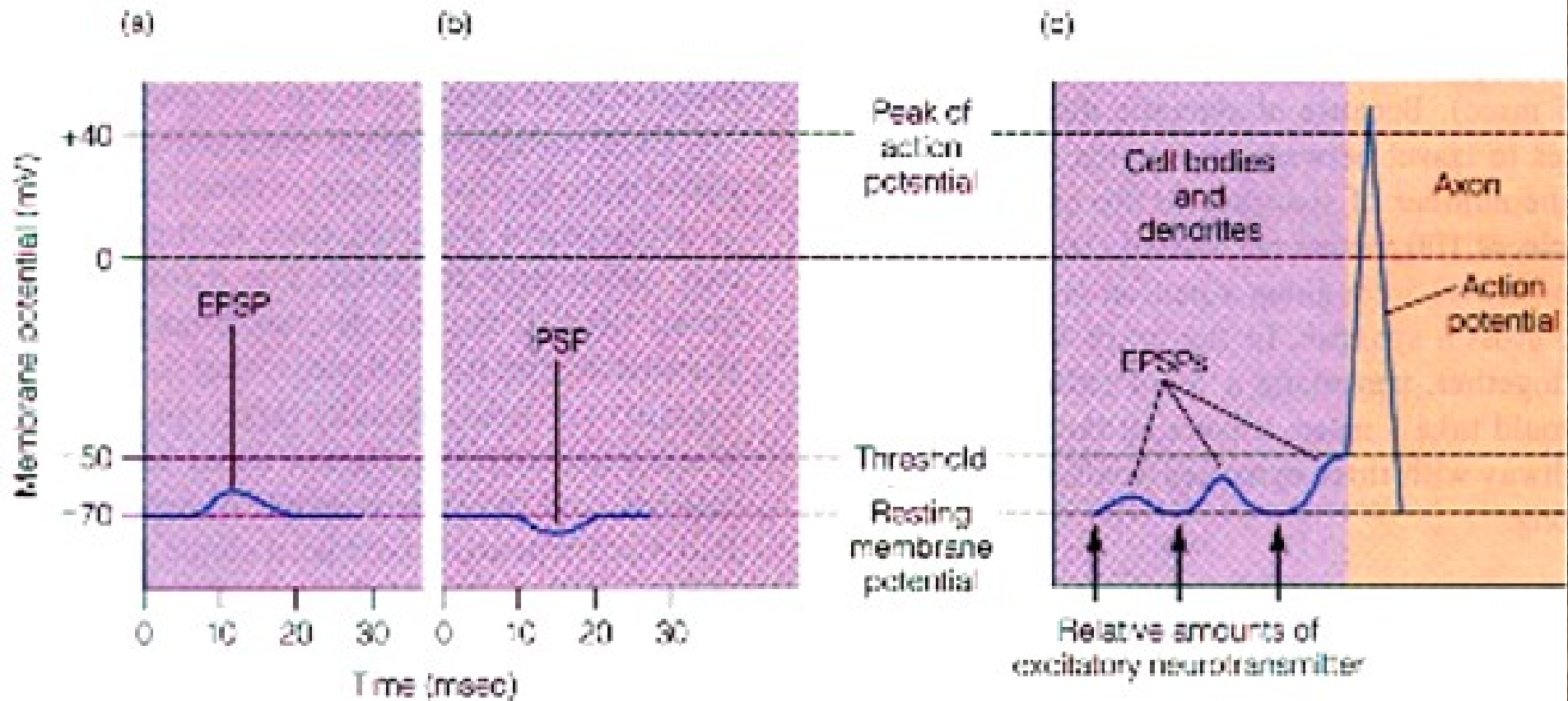


Mitochondrie

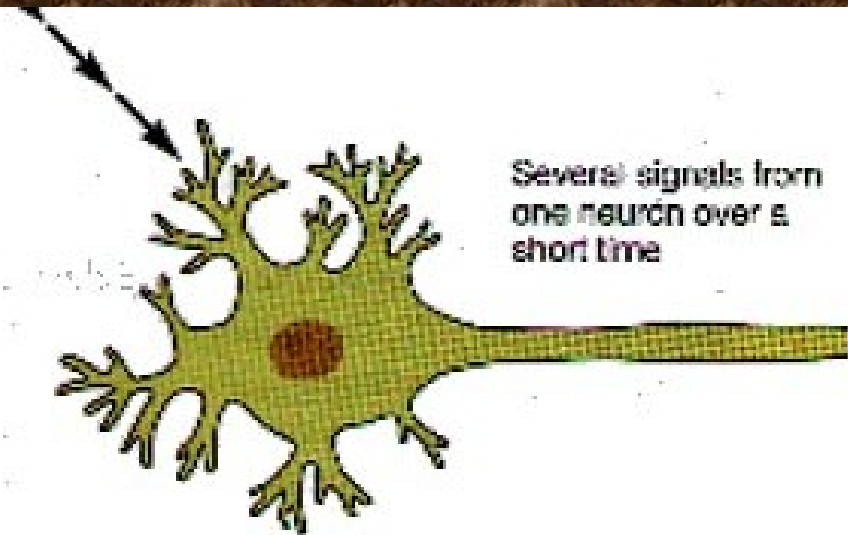
Vezikuly

Synaptická
štěrbina

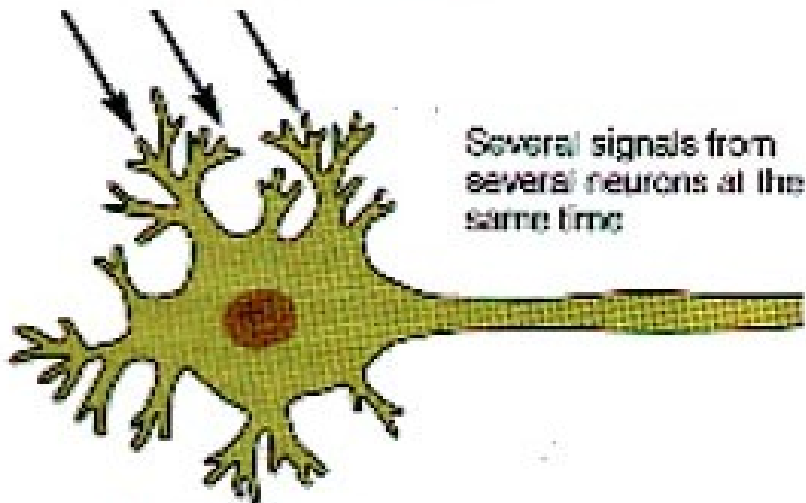
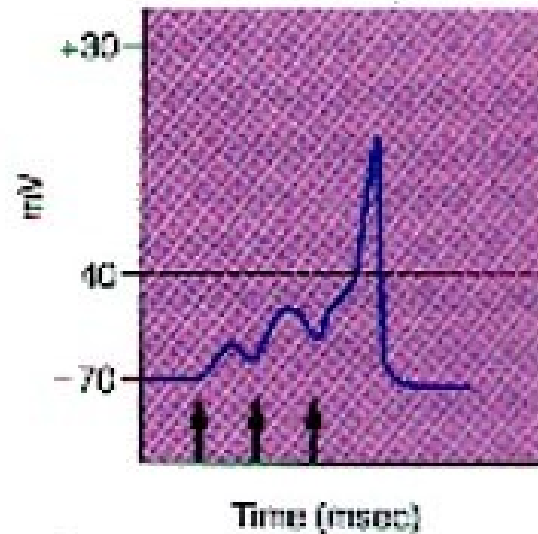
Excitační a inhibiční postsynaptický potenciál



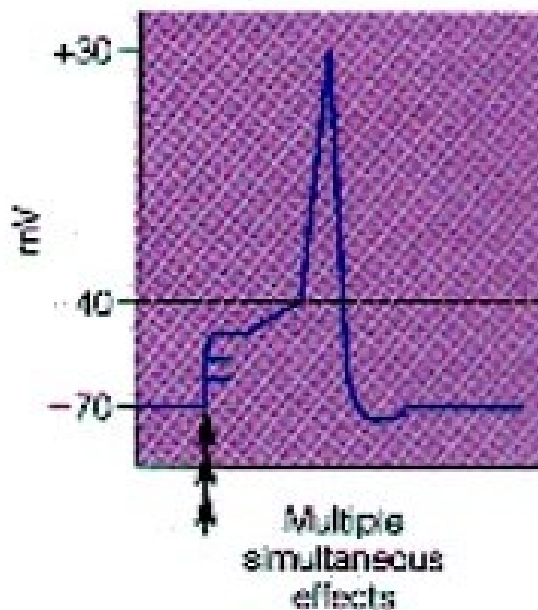
Sumace vzruchů



časová



prostorová



Dobrú chuť!

