

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
lekárské 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 organizmů:**

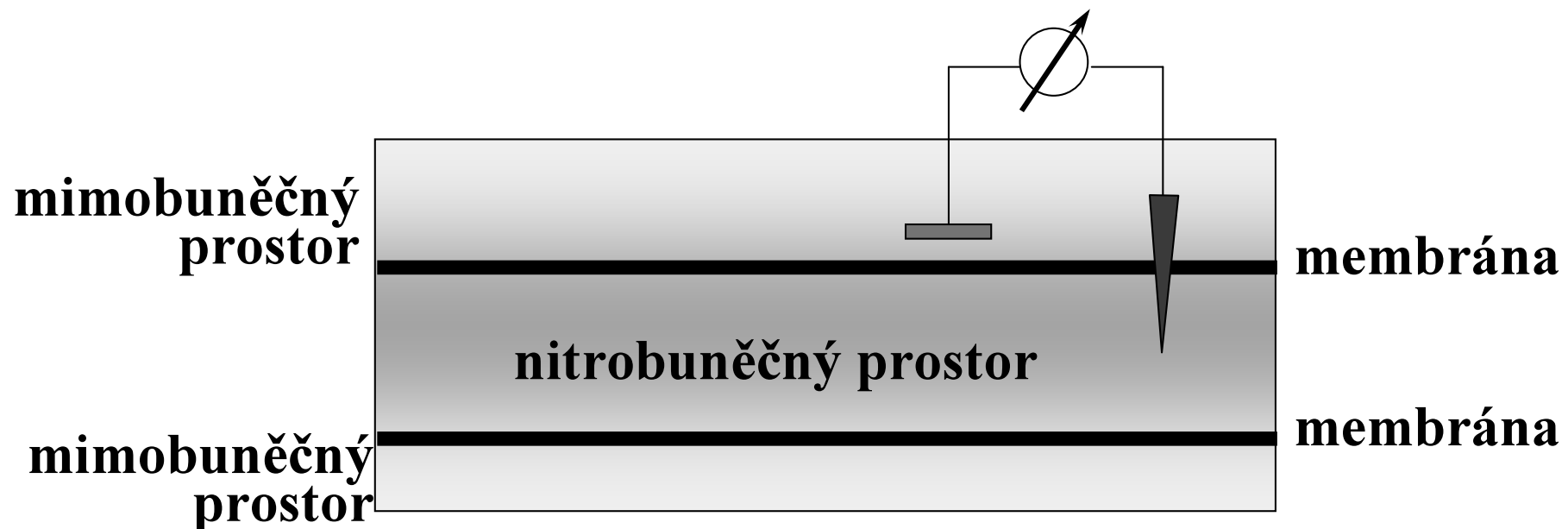
Především pozoruhodná vlastnost určitých specializovaných buněk (skupin buněk - svalových, nervových)

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
krytalů:**

- **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**

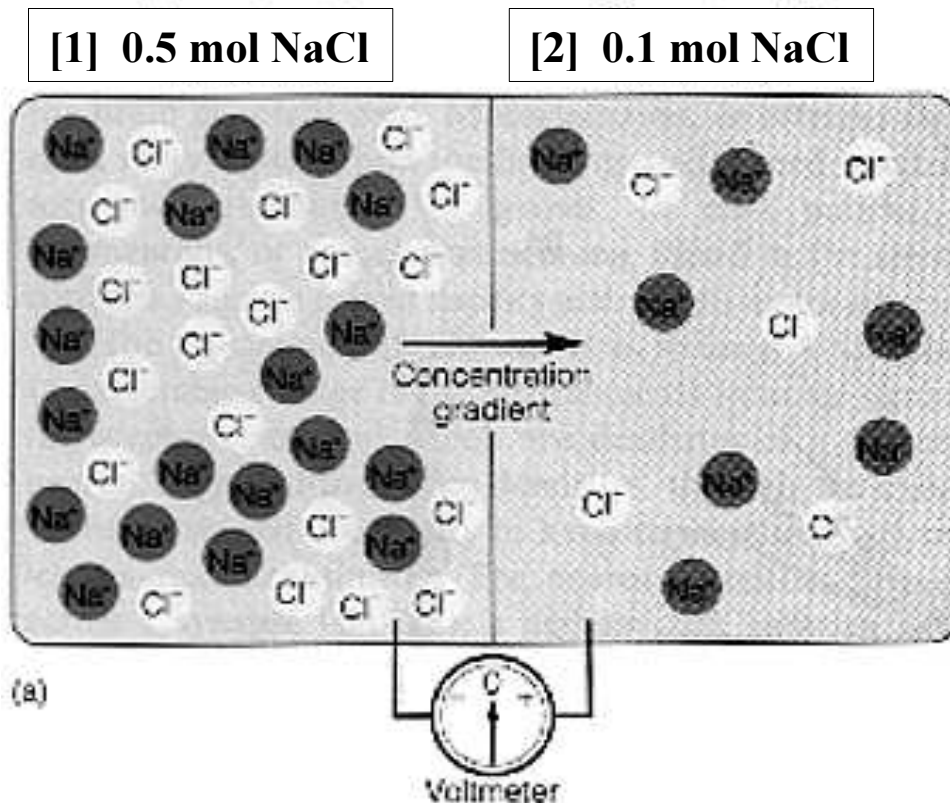
Některé základní pojmy související s elektrickým polem

- **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^-

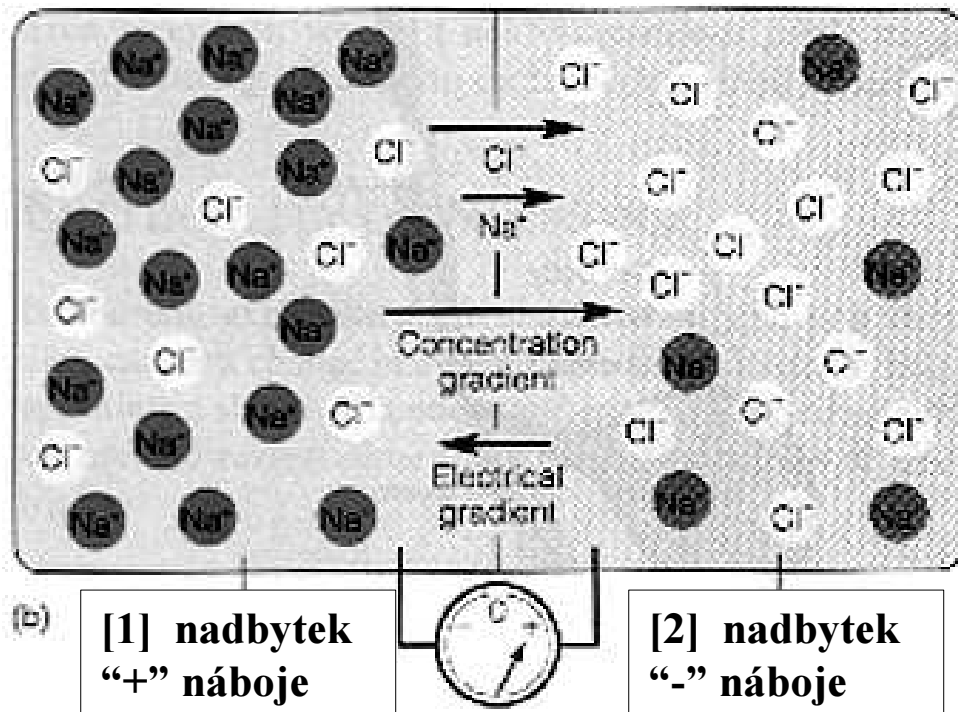


elektricky neutrální kompartmenty, ale je přítomen koncentrační gradient
⇒ difuze iontů z [1] do [2]

Difuzní napětí (2)

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

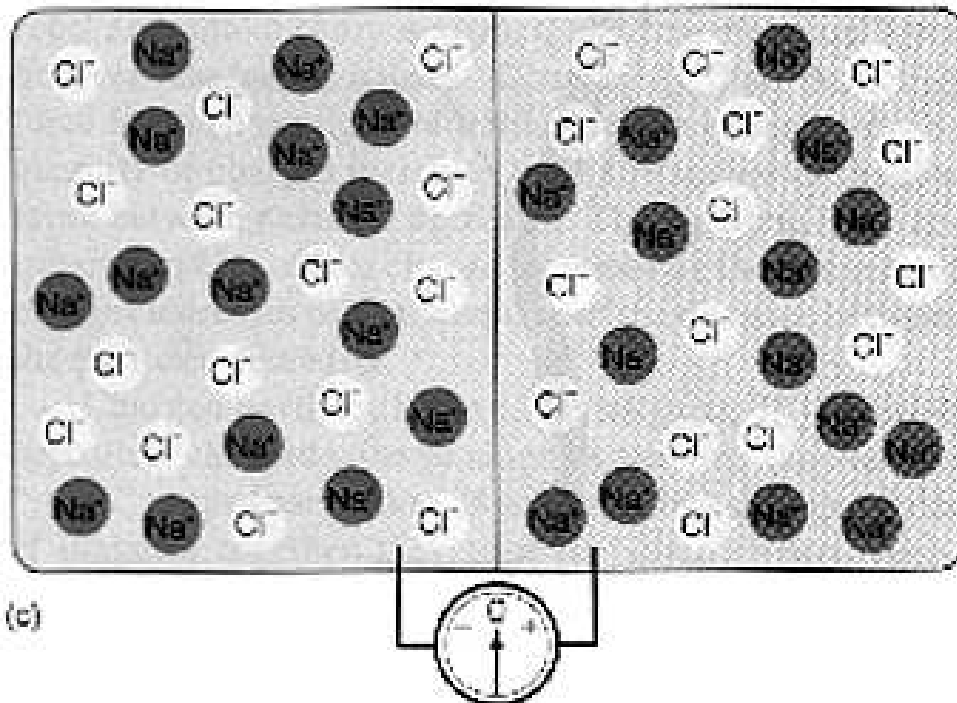
⇒ rychlejší difuze Cl^- po koncentračním spádu



⇒ vznikne dočasné napětí mezi oběma kompartmenty
⇒ difuzní napětí elektrické pole odpuzuje Cl^- z [2]

Difuzní napětí (3)

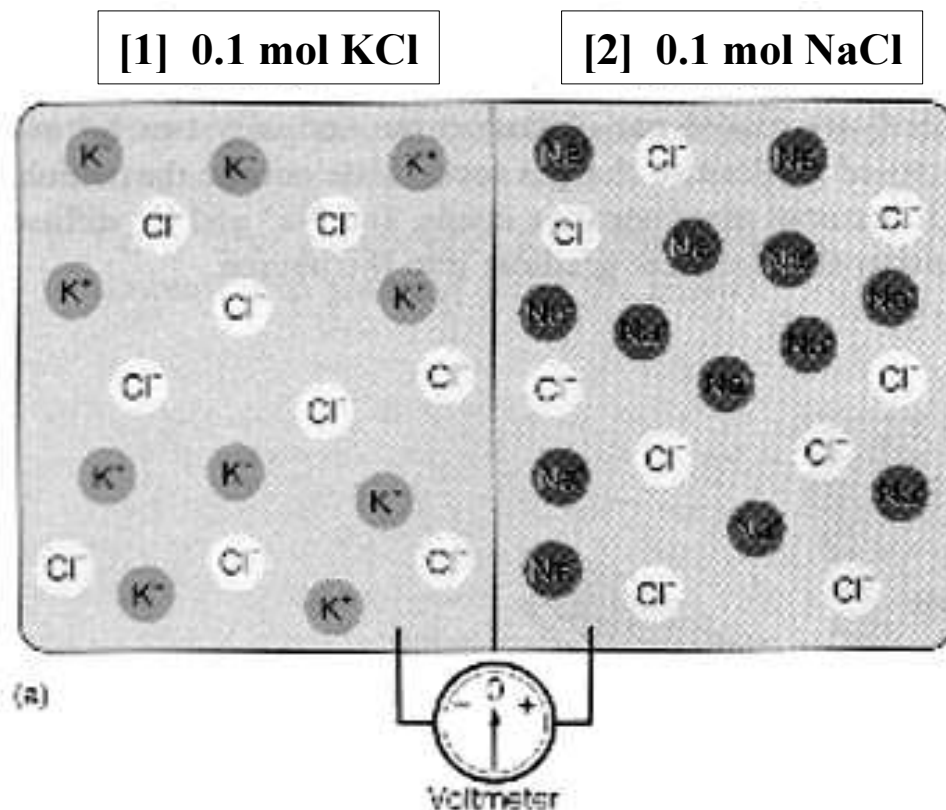
elektrický gradient působí proti
koncentračnímu gradientu,
dokud není dosaženo rovnováhy
(nulového výsledného toku iontů)



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

Difuzní napětí (4)

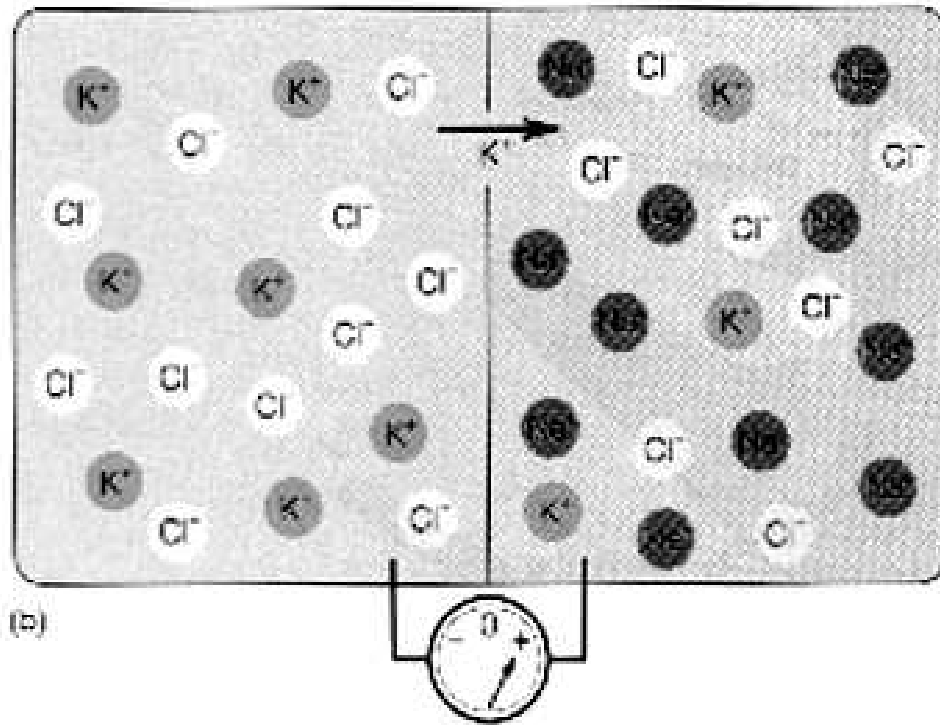
DN v živých systémech - roztoky oddělené selektivně permeabilní membránou



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

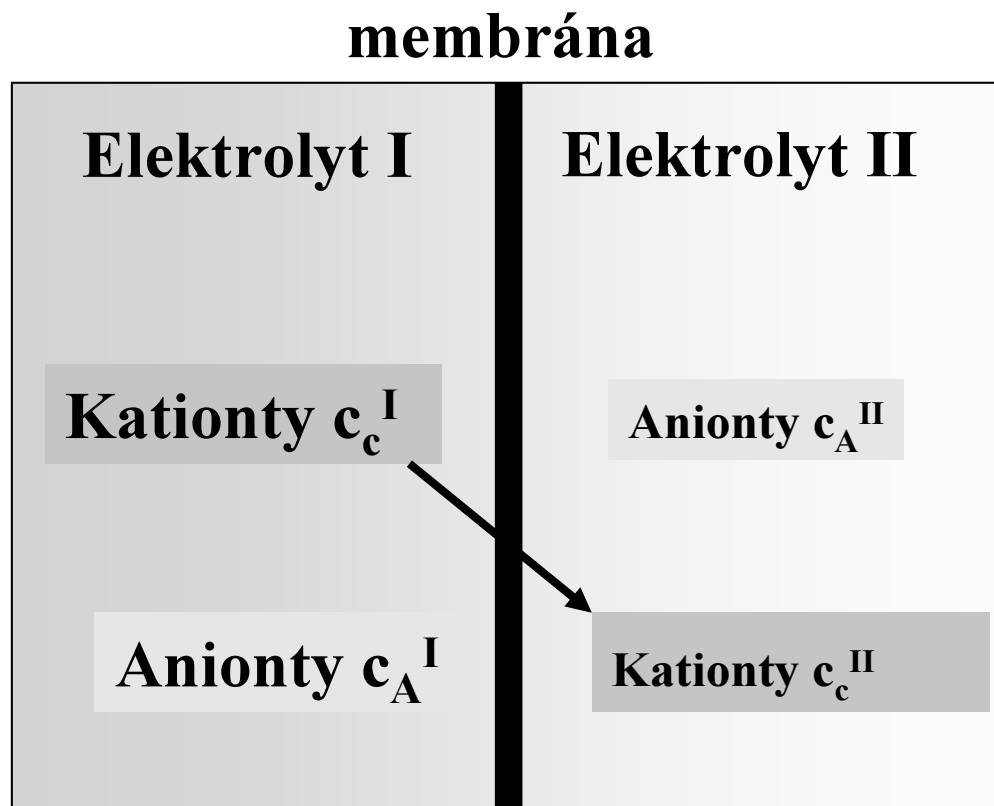
V živých systémech molekuly (produkty metabolismu) nedifundují ve spojitém prostředí - překážky

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



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"

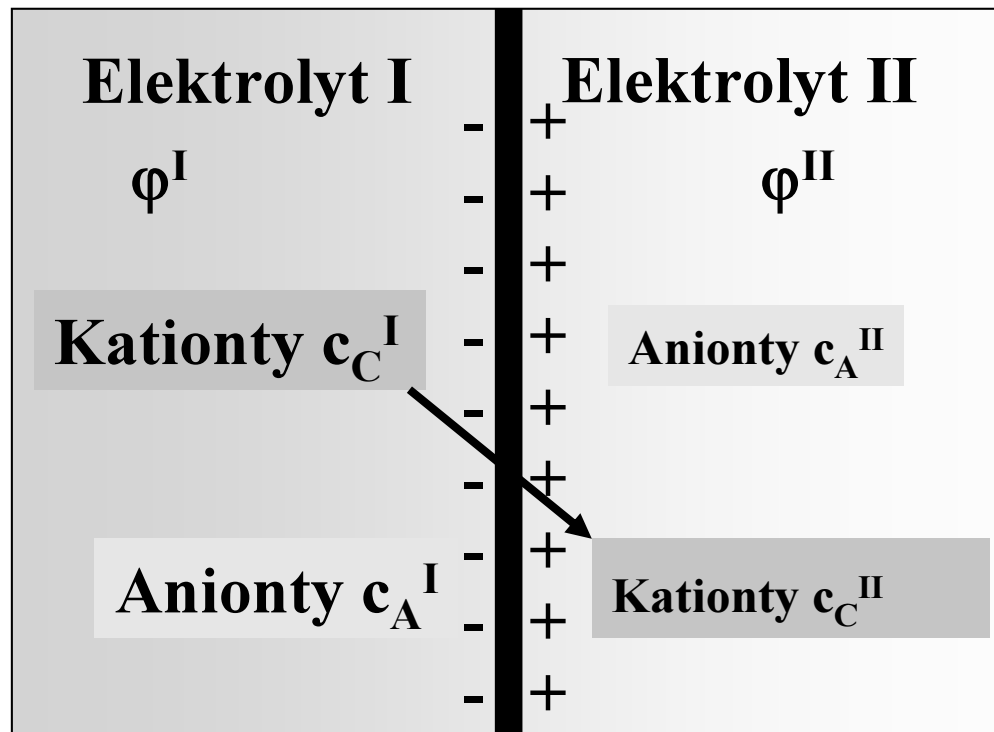
V rovnováze: vznikne
potenciálový rozdíl U :

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

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

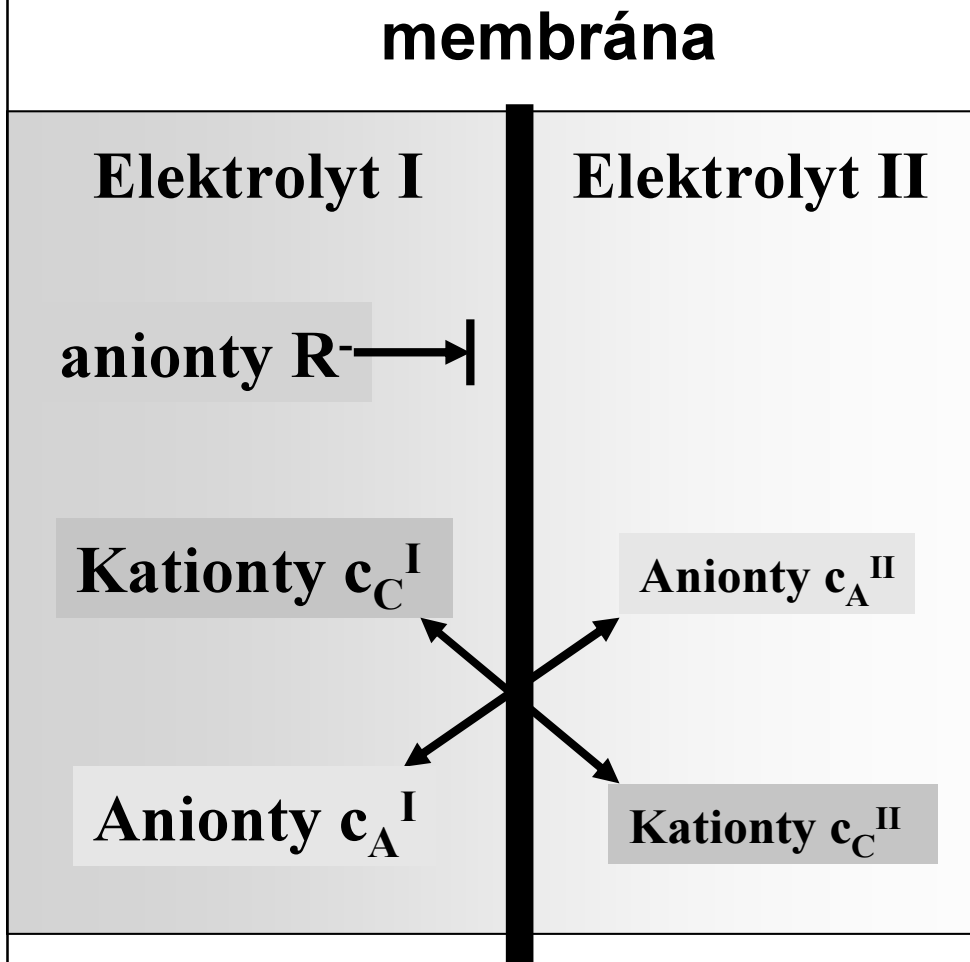
(Nernstova rovnice)

membrána



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^-



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

nedifuzibilní ionty: R^-

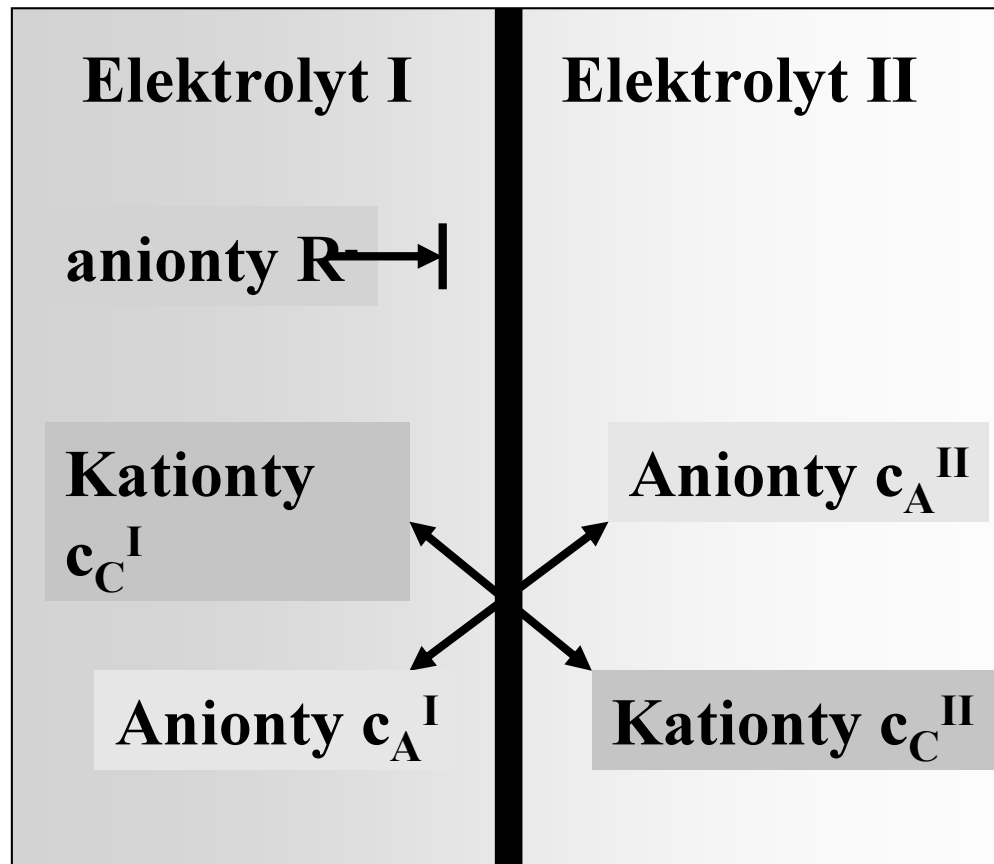
přítomnost R^- :
nevznikne rovnoměrné
rozdělení C^+ ani A^-
⇒ speciální případ
rovnováhy -
Donnanova rovnováha

Donnanova rovnováha (2)

Rovnovážné koncentrace:

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

membrána



Donnanův poměr:

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

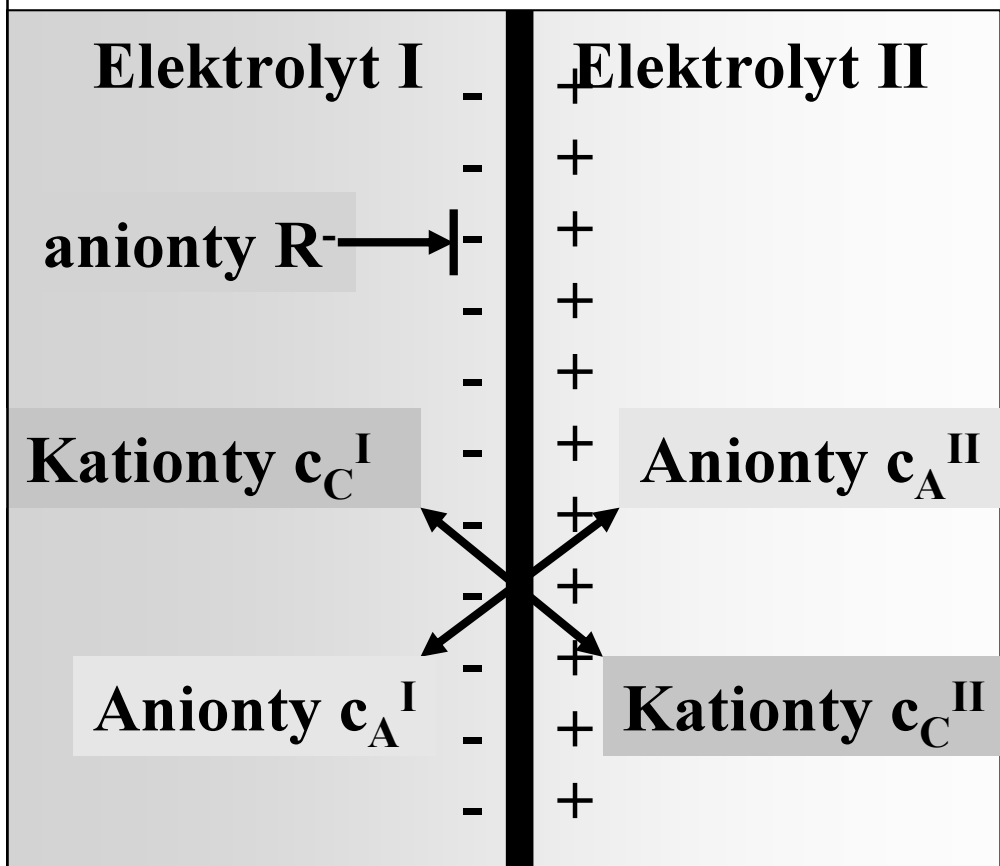
Donnanova rovnováha (3)

Donnanův poměr:

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

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

membrána

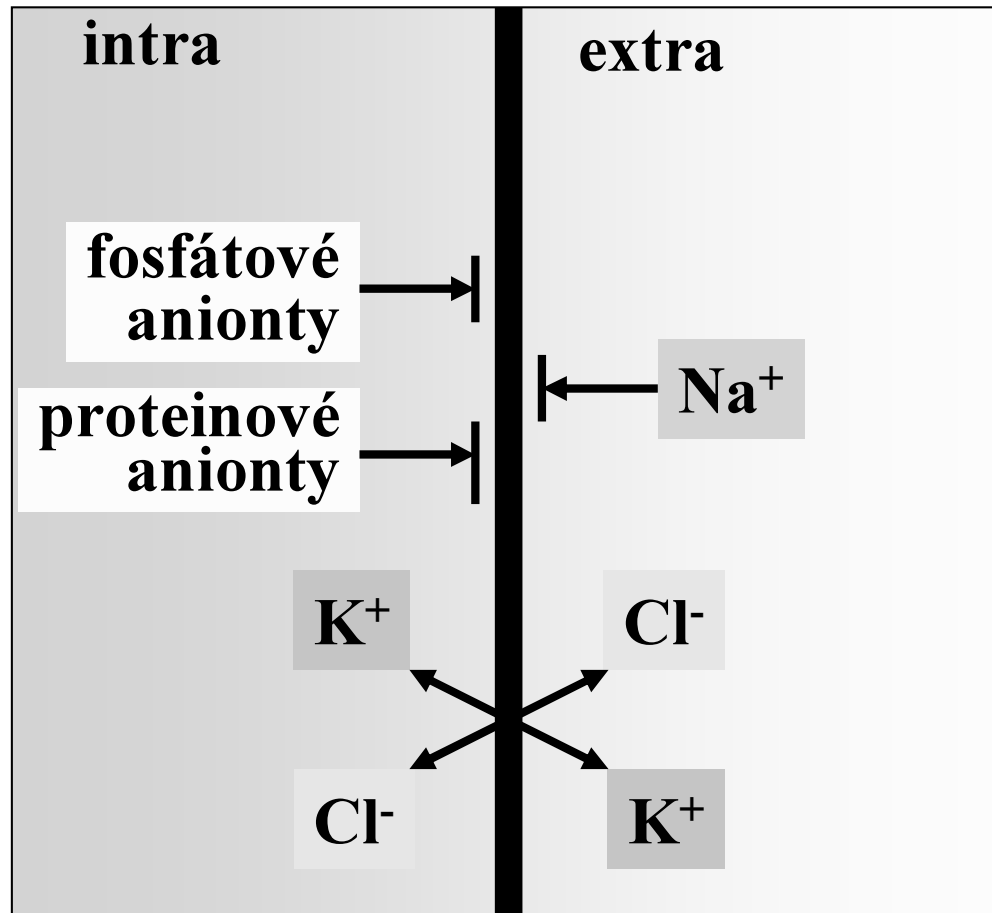


Donnanovo napětí:

$$\begin{aligned} U &= \varphi^{II} - \varphi^I = \\ &= -\frac{R \times T}{F} \ln \frac{c_C^I}{c_C^{II}} = \\ &= -\frac{R \times T}{F} \ln \frac{c_A^{II}}{c_A^I} = \\ &= -\frac{R \times T}{F} \ln r \end{aligned}$$

Donnanův model v živé buňce (1)

buněčná
membrána



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

těž bílkoviny a nukleové
kyseliny

Koncentrace:

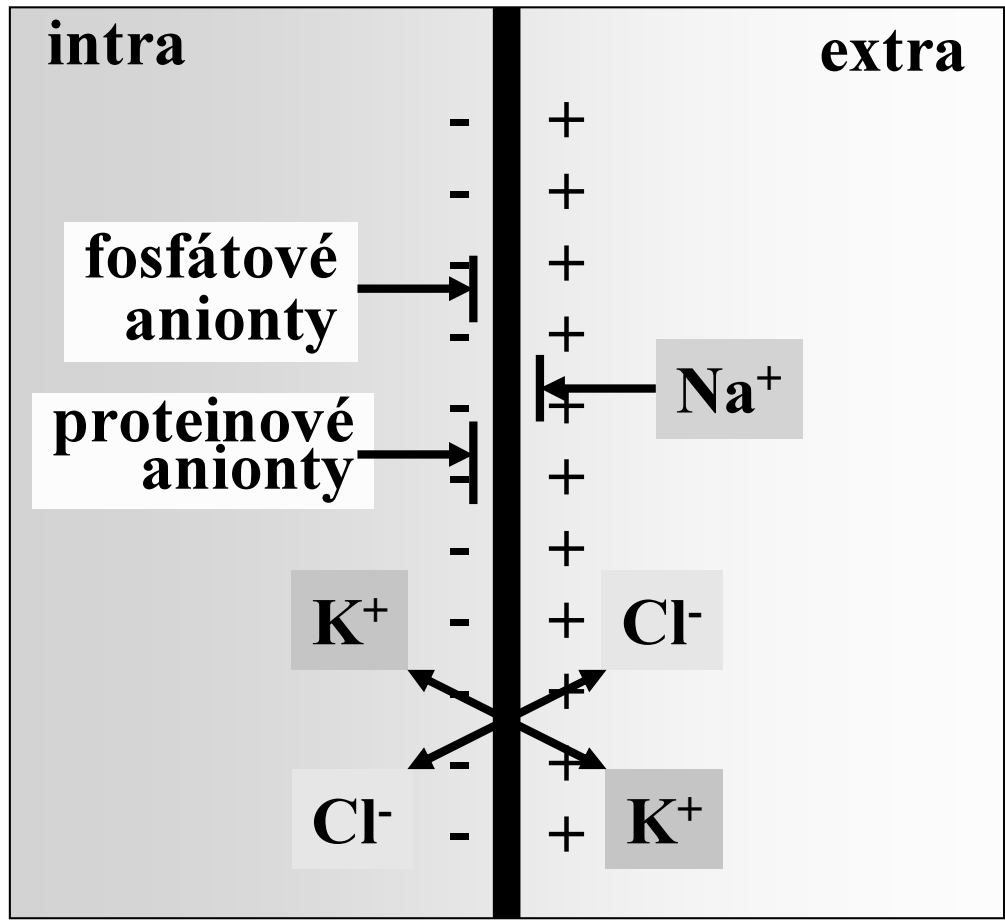
$$[K^+]_{in} > [K^+]_{ex}$$

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

Donnanův model v živé buňce (2)

Donnanův
poměr:
buněčná
membrána

$$\frac{[K^+]_{in}}{[K^+]_{ex}} = \frac{[Cl^-]_{ex}}{[Cl^-]_{in}}$$



Donnanovo napětí:

$$\begin{aligned}
 U &= \varphi_{in} - \varphi_{ex} = \\
 &= - \frac{R \times T}{F} \ln \frac{[K^+]_{in}}{[K^+]_{ex}} = \\
 &= - \frac{R \times T}{F} \ln \frac{[Cl^-]_{ex}}{[Cl^-]_{in}}
 \end{aligned}$$

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 ($t = 25^\circ\text{C}$):

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

Výpočet: $U = -61 \text{ mV}$

Měření: $U = -62 \text{ mV}$

Sval žáby ($t = 25^\circ\text{C}$):

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

Výpočet: $U = -90 \text{ mV}$

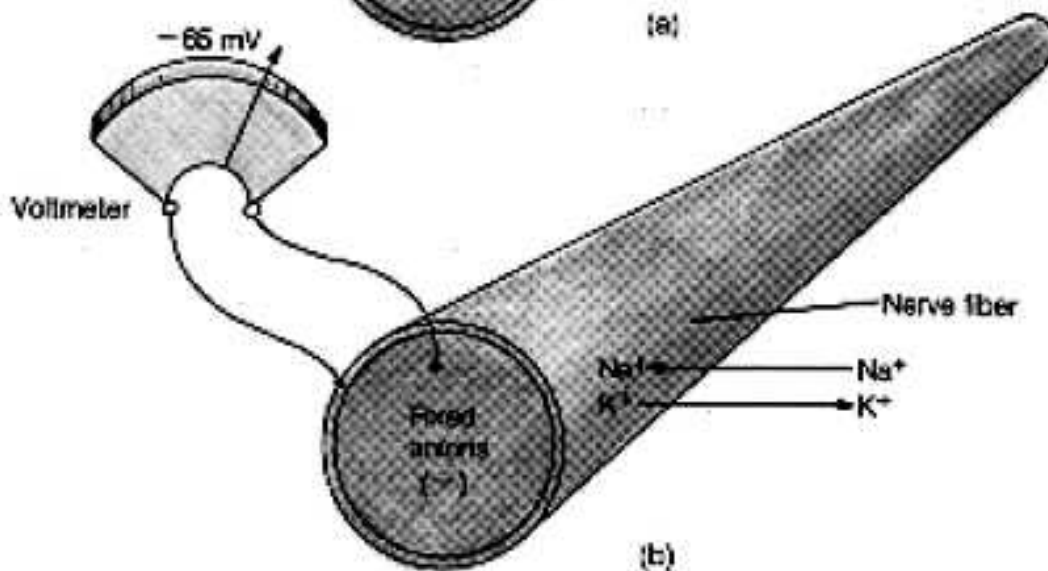
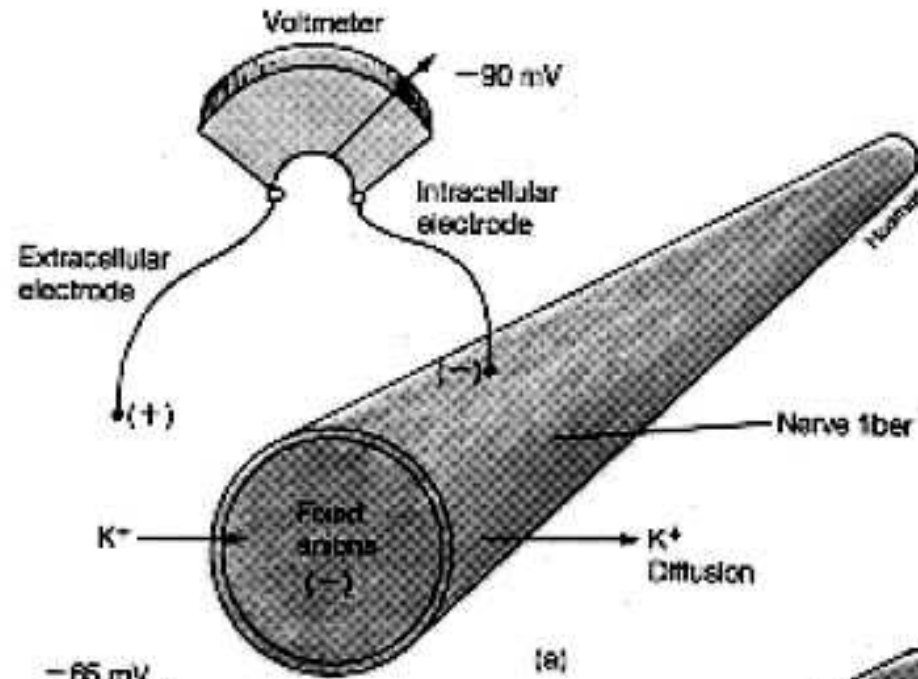
Měření: $U = -92 \text{ mV}$

Akční

potenciál

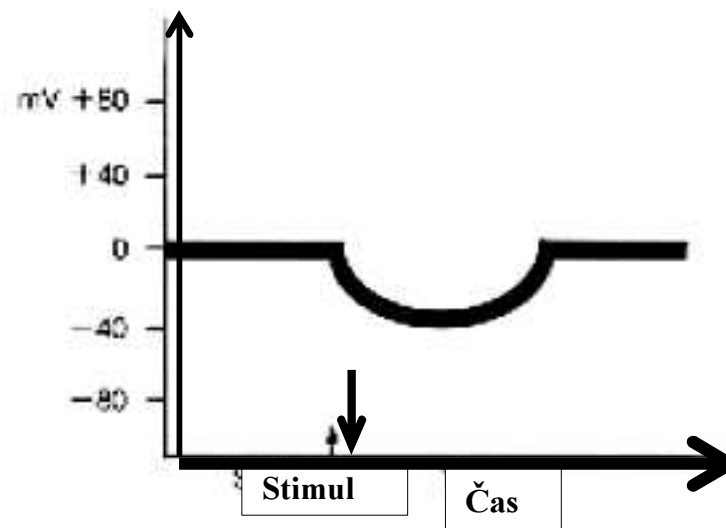
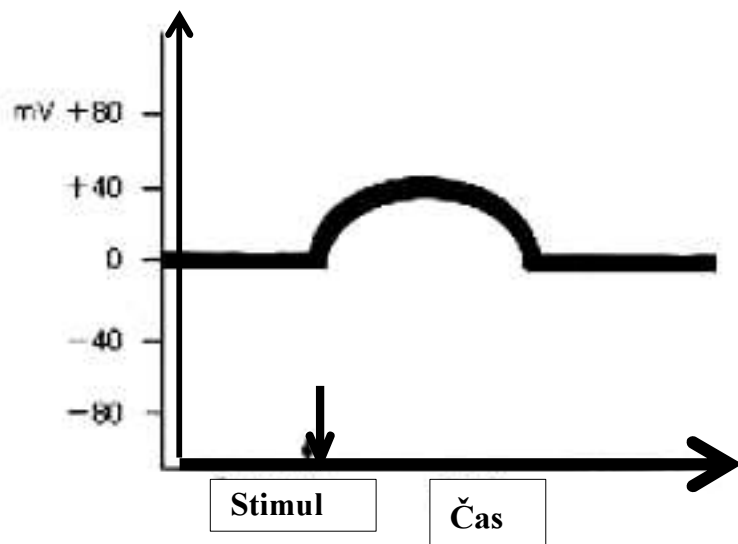
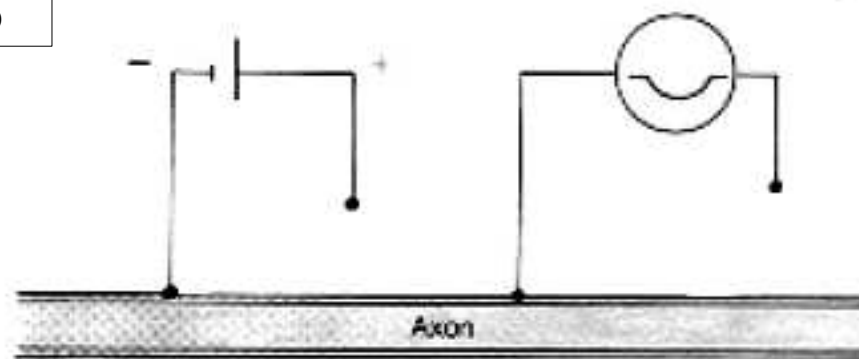
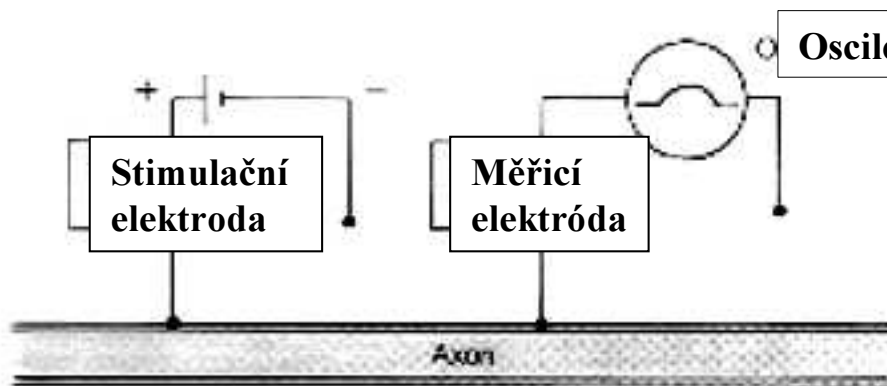
Membránové napětí

pro draslík

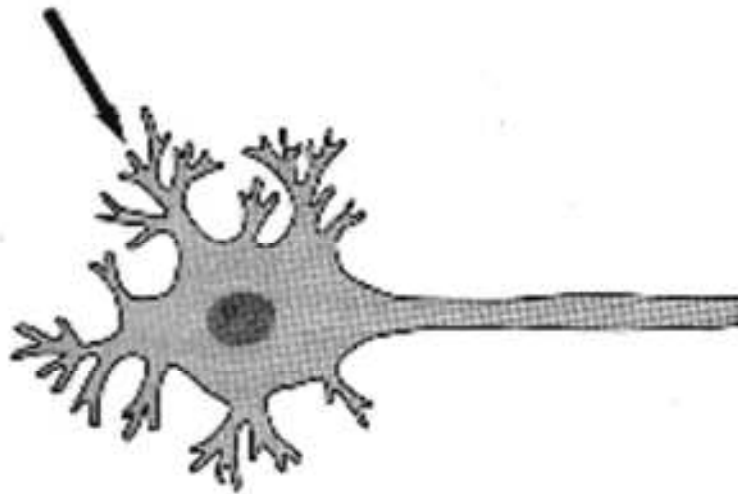


pro draslík
a sodík

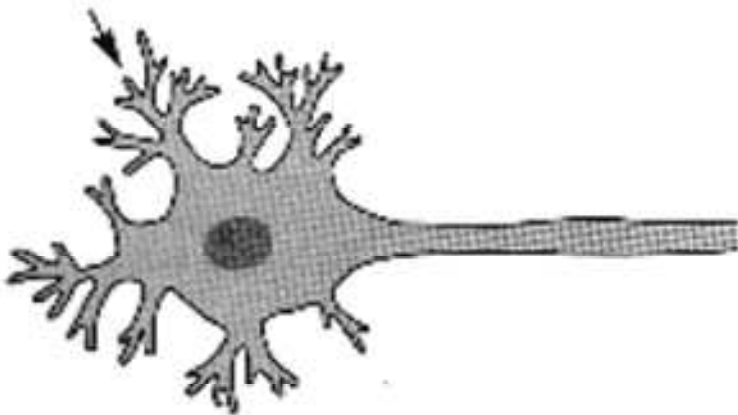
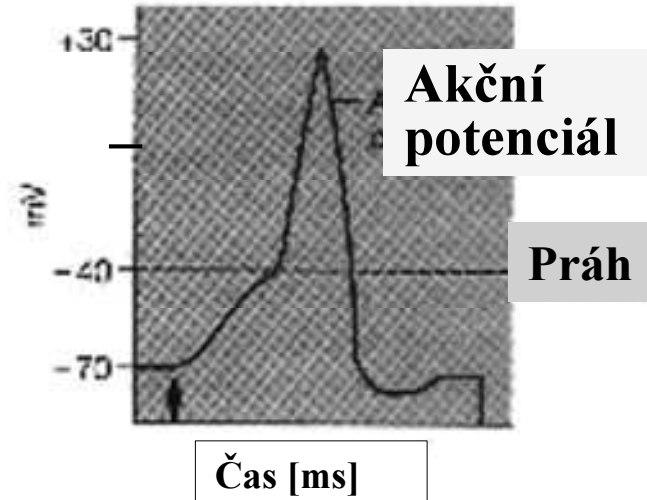
Depolarizace a hyperpolarizace



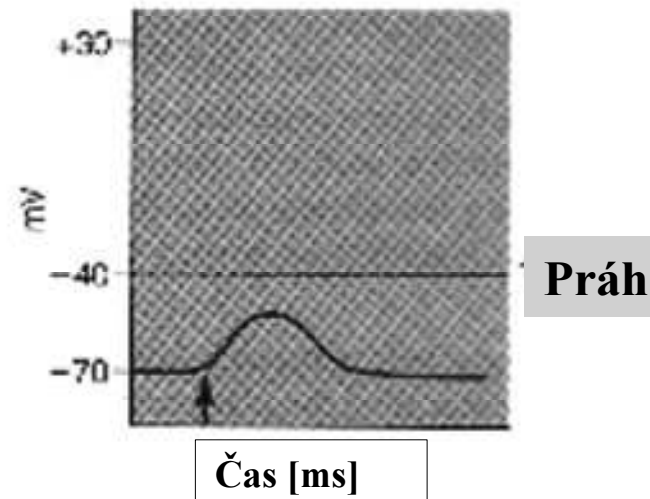
Vznik akčního potenciálu



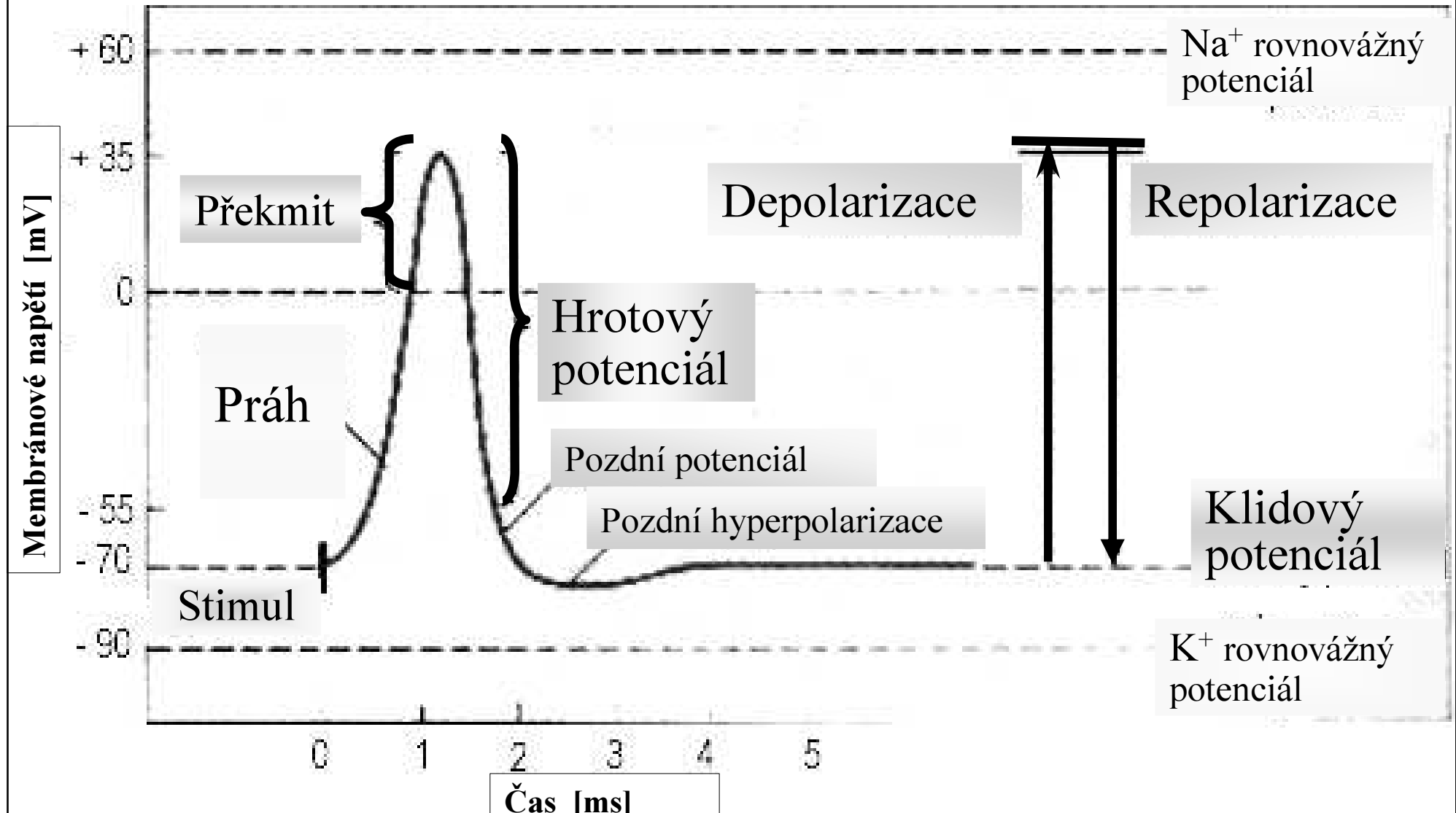
Nadprahový stimul



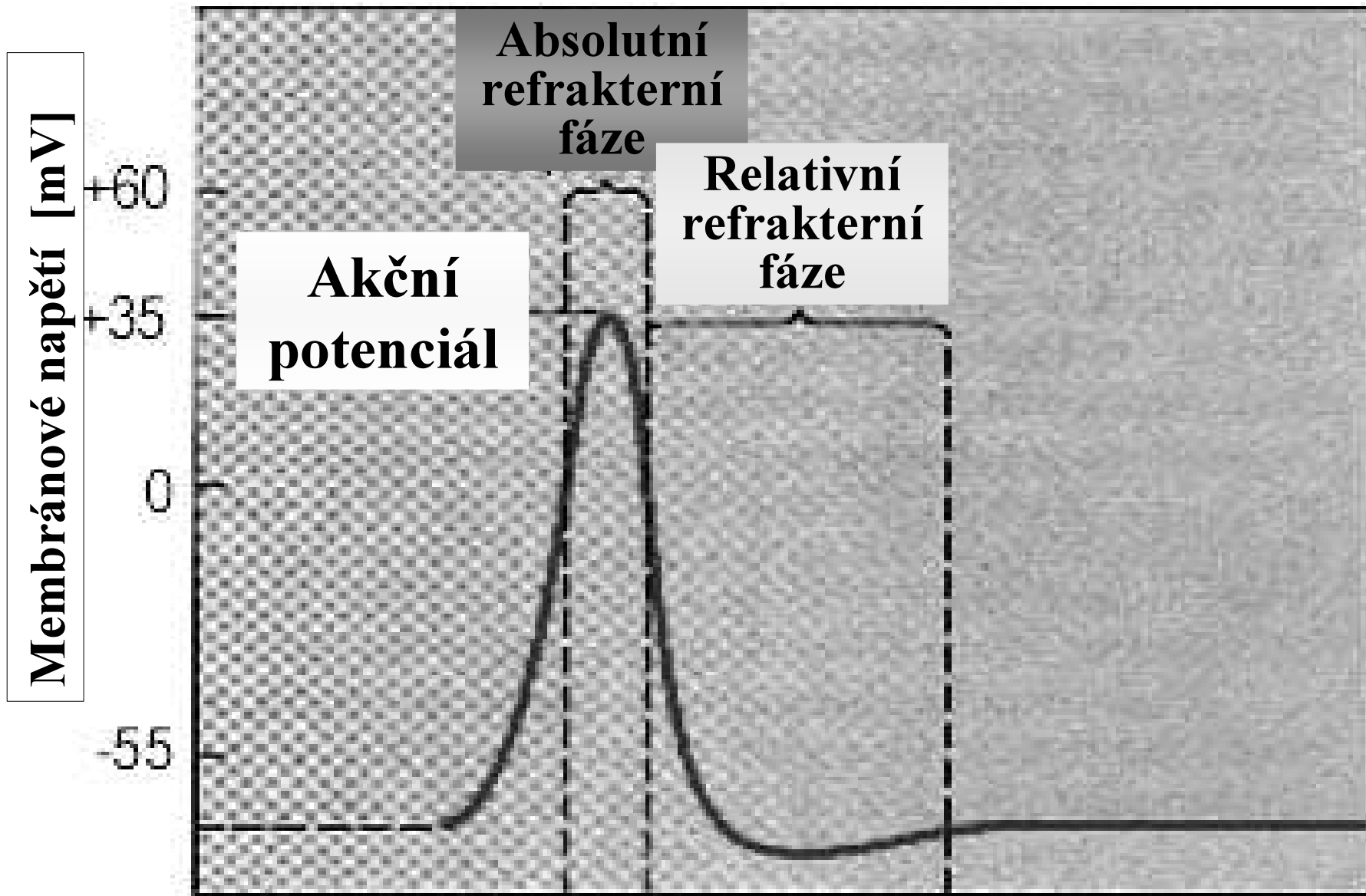
Podprahový stimul



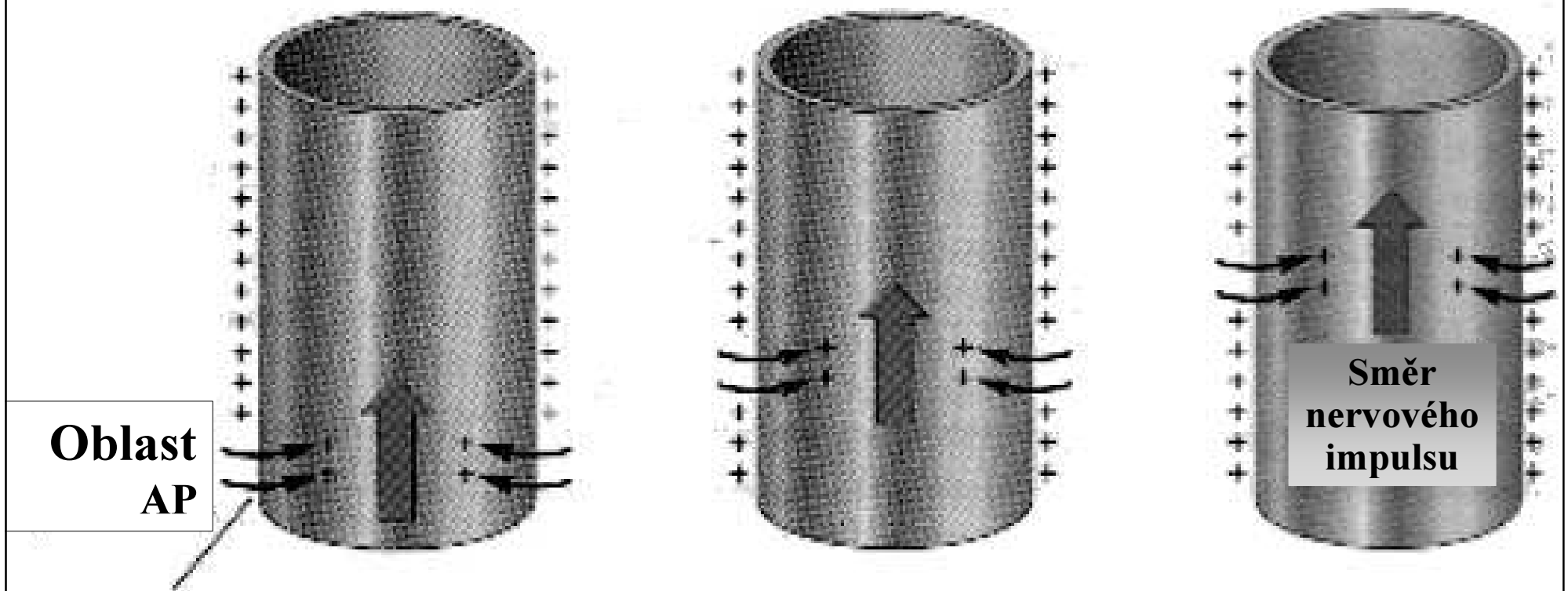
Popis akčního potenciálu



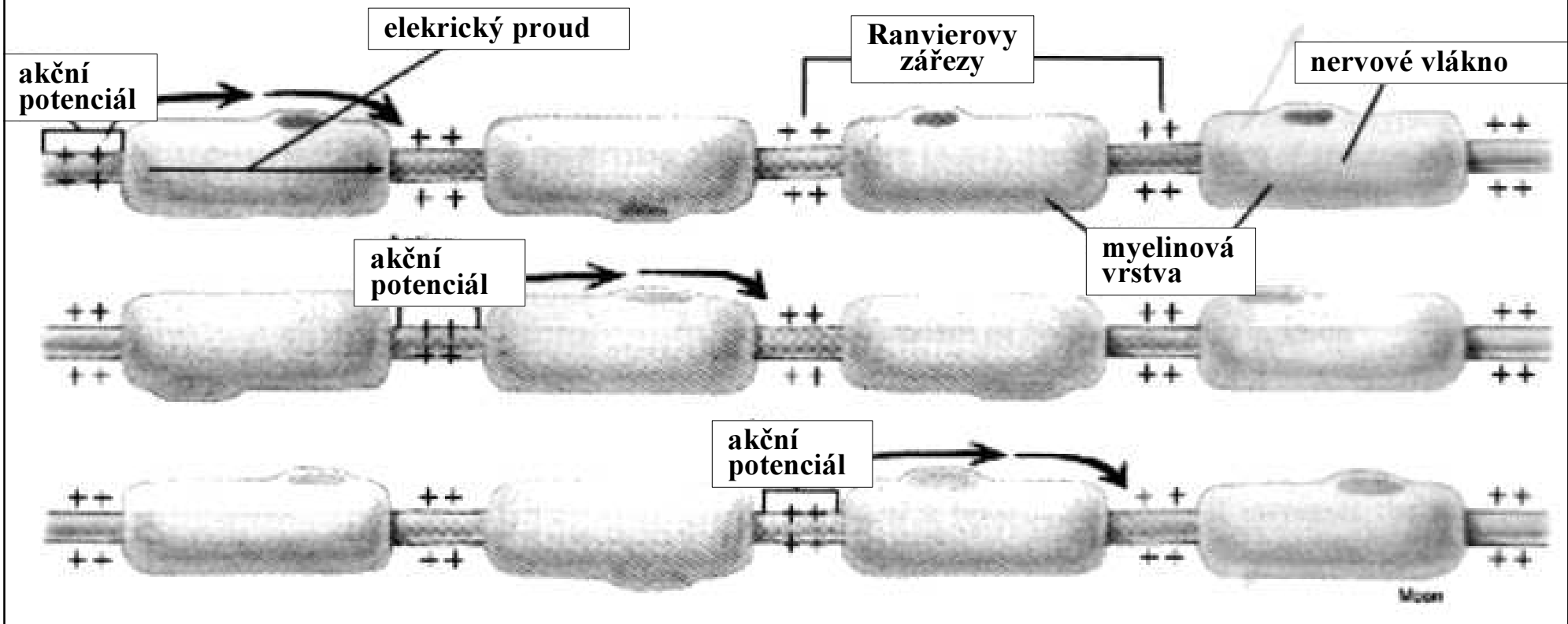
Refrakterní fáze



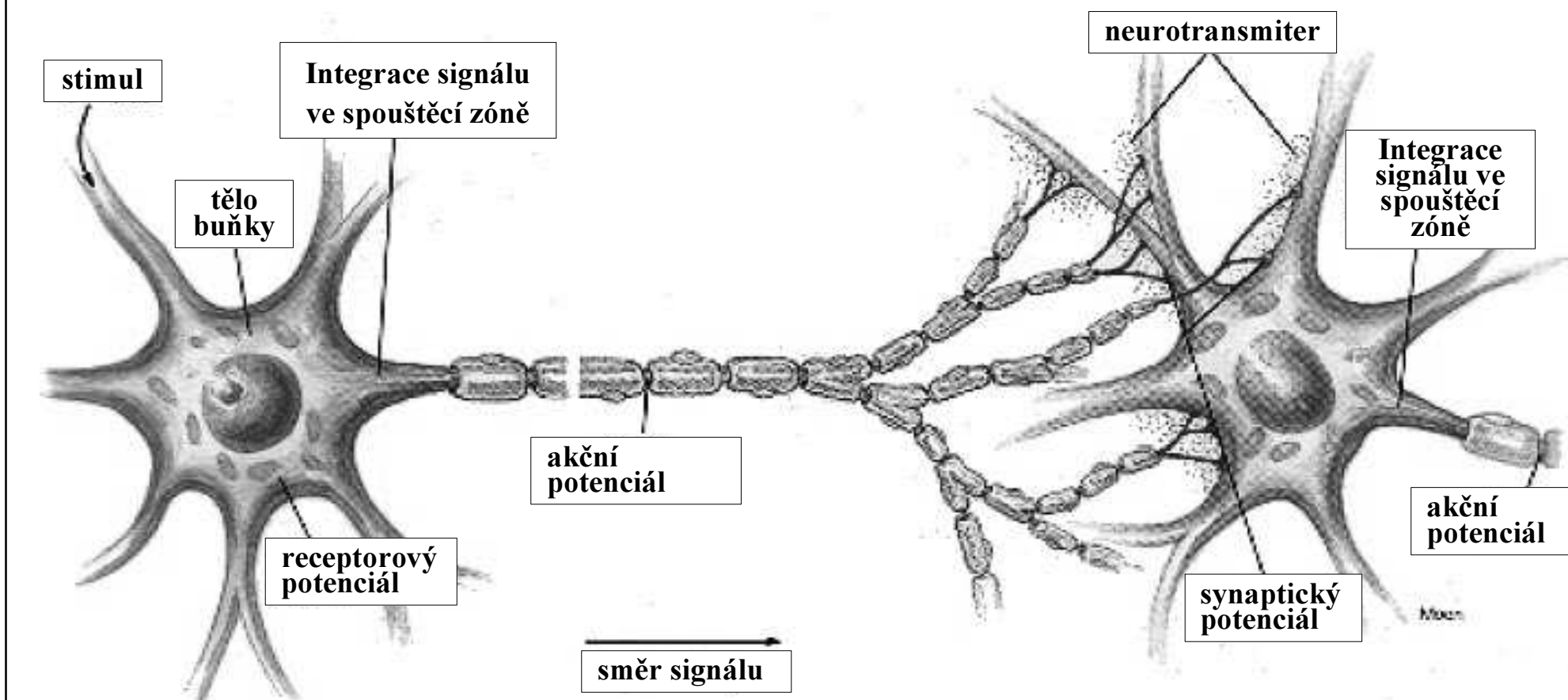
Vedení vzruchu po membráně



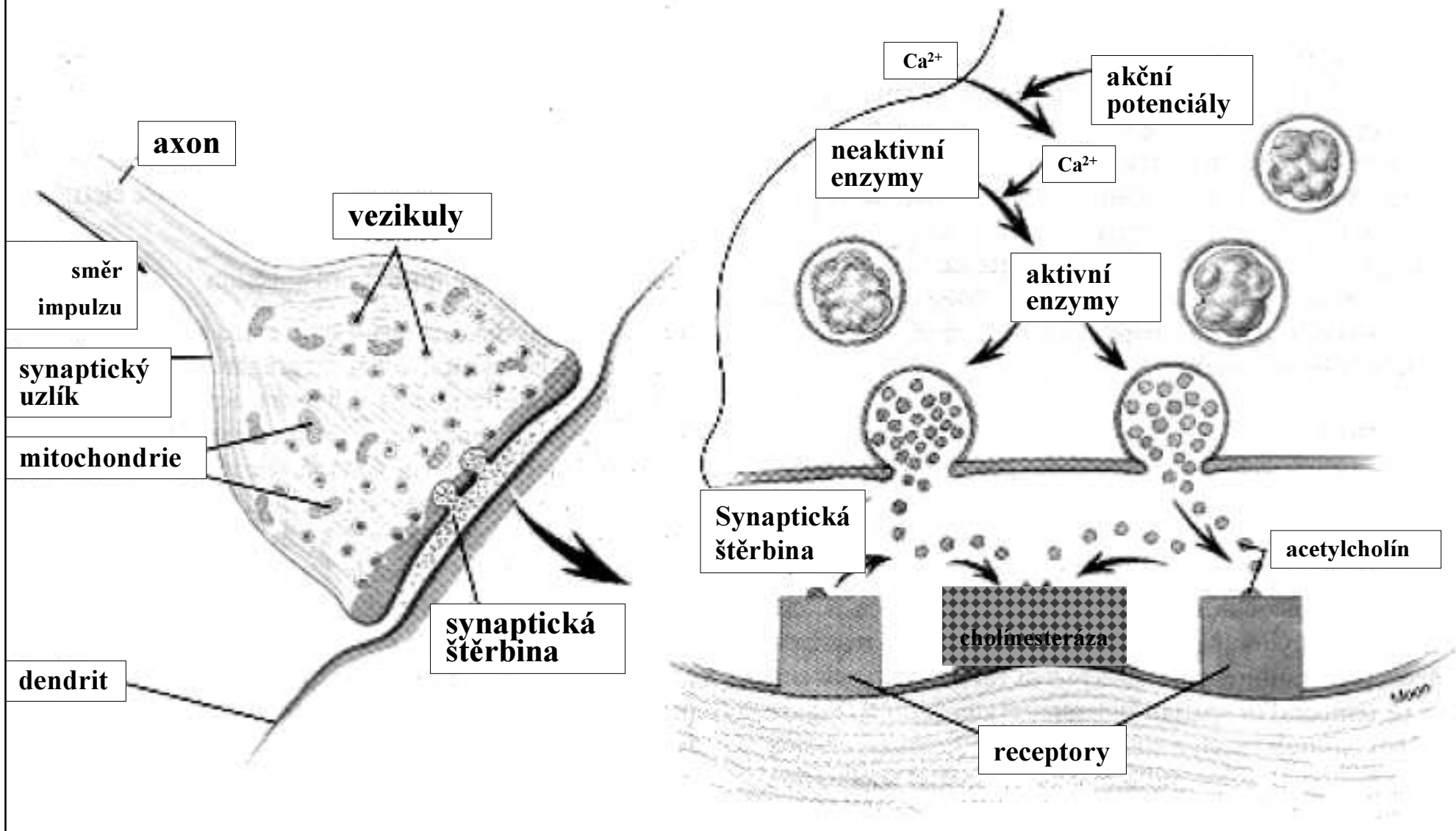
Vedení vzruchu po (myelinizovaném) nervovém vlákně saltatorické - skokem



Vedení vzruchu mezi nervovými buňkami



Chemická synapse



Chemická synapse záznam z elektronového mikroskopu

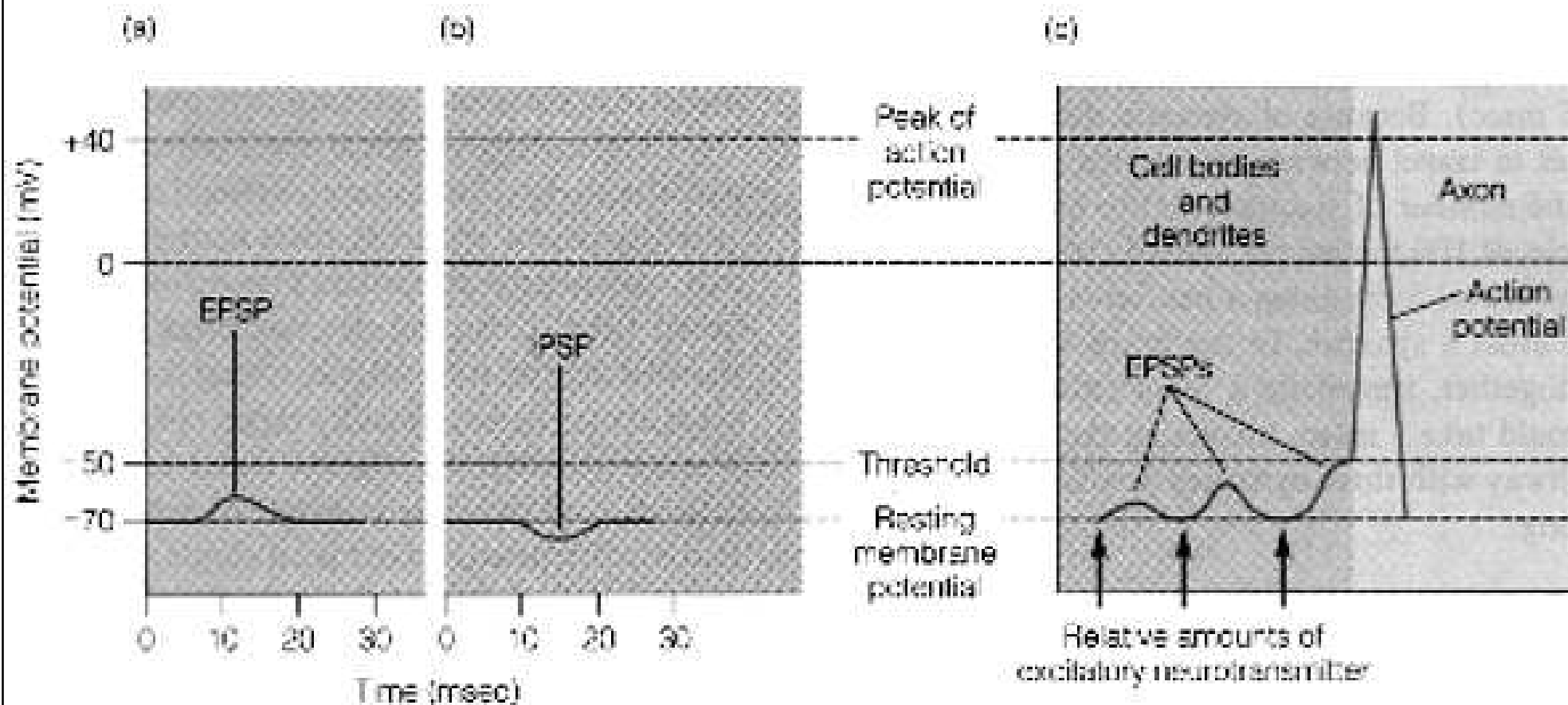


Mitochondrie

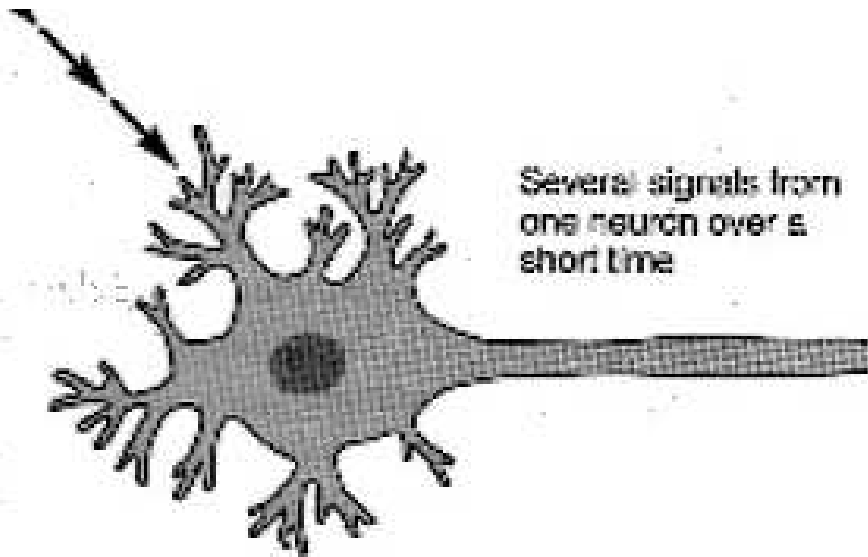
Vezikuly

Synaptická
štěrbina

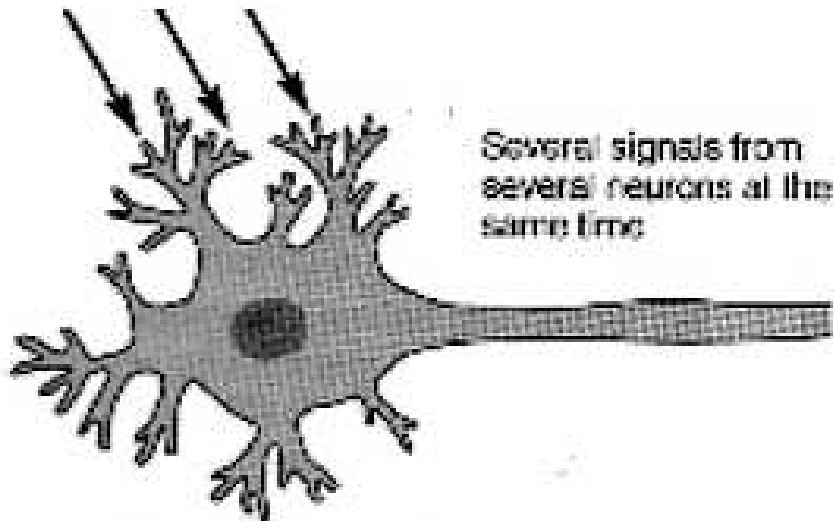
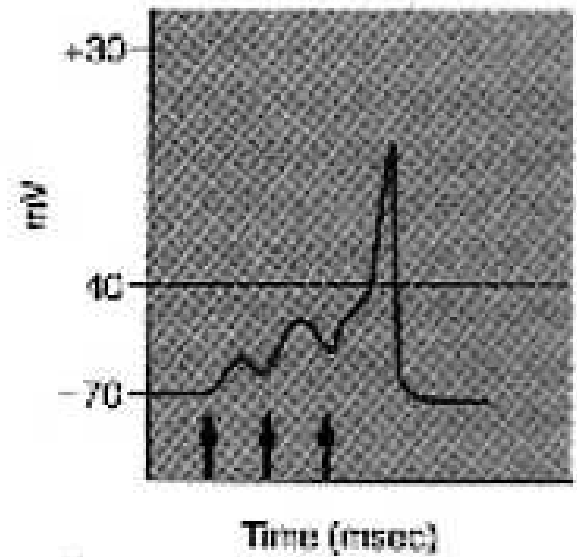
Excitační a inhibiční postsynaptický potenciál



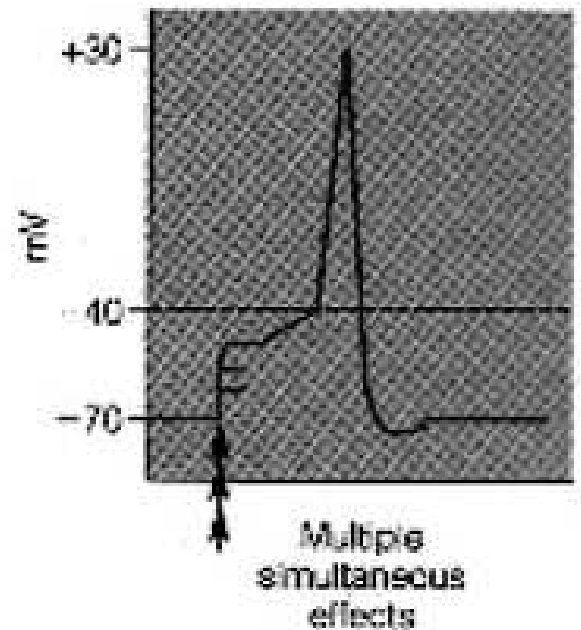
Sumace vzruchů



časová



prostorová



Dobrú chuť!

