

Transzportfolyamatok a biológiai rendszerekben

Transzportfolyamatok a sejt nyugalmi állapotában

Elektrofiziológiai jelenségek és a transzportfolyamatok kapcsolata

A nyugalmi potenciál jelentősége

a sejt homeosztázisának (sejttérfogat, pH) fenntartása

ingerlékenység

érzékelés

jelátadás

A nyugalmi potenciál értelmezése:

-Donnan vagy egyensúlyi modell

-Transzport modell

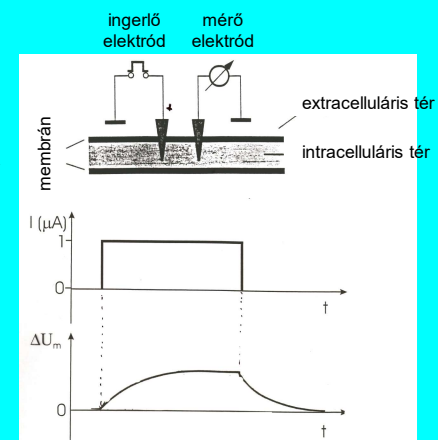
-Elektromos modell

A nyugalmi potenciál megváltozása

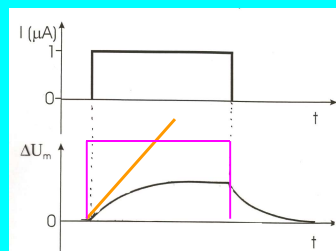
1. A membrán "passzív" elektromos tulajdonságai

Kísérlet

Áramirány :
pozitív töltések
áramlásának
iránya.



Miért éppen így?

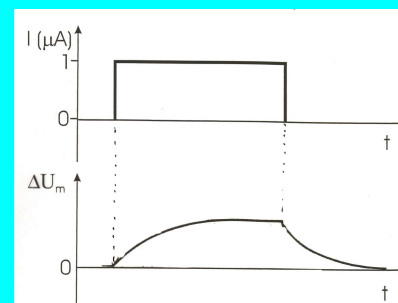


Nem így
Nem így

Miért éppen így?

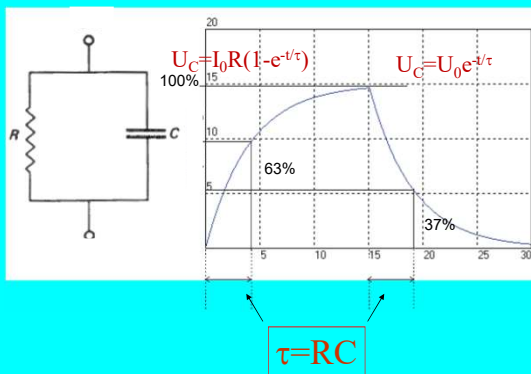
A membrán elektromos tulajdonságai miatt:

- ellenállás
- kapacitás

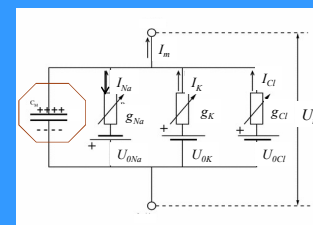


Hol is láttam már ehhez hasonlót?

Párhuzamos RC-kör töltése és kisütése



Összevetése az elektromos modellel:



$$I_{ion} + I_c = I_m = 0$$

$$g_{Na} (U_m - U_{0Na}) = I_{Na}$$

$$g_{ion} (U_m - U_0) = I_{ion}$$

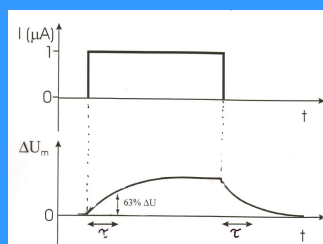
$$C_m \frac{\Delta U_m}{\Delta t} + \frac{\Delta U_m - U_0}{R_m} - I_{inger} = 0$$

Az ingerlés kezdetétől eltelt idő

$$U_m(t) = U_t \left[1 - e^{-\frac{t}{R_m C_m}} \right]$$

A membránpotenciál időbeli változása

A membránpotenciál telítési értéke



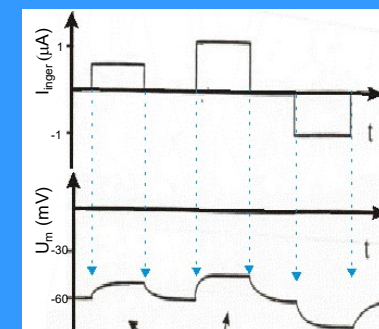
$$\tau = C_m R_m$$

a membrán kapacitása a membrán keresztirányú ellenállása

τ a membrán időállandója:

- az az idő, ami alatt az impulzussal keltett feszültségváltozás -eléri a telítési érték 63%-át vagy
- az ingerlés megszűnte után e-ed részére csökken

$$U_m(t) = U_t \left[1 - e^{-\frac{t}{R_m C_m}} \right]$$

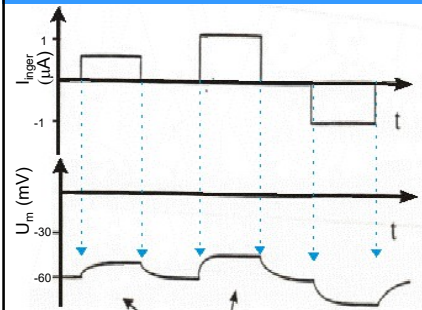


U_t egyenesen arányos az ingerlő impulzus nagyságával

A változás meredeksége függ az ingerlő impulzus nagyságától

depolarizáció hiperpolarizáció

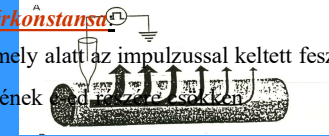
A nyugalmi potenciál helyi megváltozása



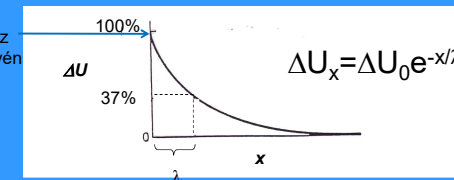
obligát
ugrásmentes
változtatható amplitúdójú
változtatható irányú
analog
lokalizált

A nyugalmi potenciál helyi megváltozása az ingerlés helyétől távolodva

λ a membrán térkonstansa
az a távolság, amely alatt az impulzussal keltett feszültségváltozás
maximális értékének e^{-1} részére csökken



Változás az
ingerlés helyén



$$\lambda \sim \sqrt{\frac{R_m}{R_i}}$$

A nyugalmi potenciál helyi megváltozása

- kísérletileg áramimpulzusokkal
- adekvát ingerekkel
- posztzinaptikus membránon neurotranszmitterekkel
 - serkentő - depolarizáló
 - gátló - hiperpolarizáló

A nyugalmi potenciál helyi megváltozásának jelentősége

ingerületvezetés
érzékelés - receptorműködés
jelátadás

A nyugalmi potenciál megváltozása

2. A membrán "aktív" elektromos tulajdonságai

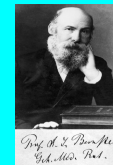
"Akción potenciál történelem"



1780: **Luigi Galvani** – elektromos vezetés és izomösszehúzódás kapcsolata



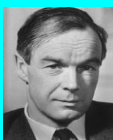
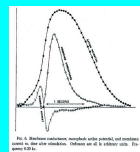
1843: **Emil Dubois-Reymond** – nyugalmi potenciál, ami megváltozik izomösszehúzódáskor



1868: Dubois-Reymond tanítványa **Julius Bernstein** – egyenlőtlen ioneloszlás leírása; ionáram ingerléskor; terjedő elektromos potenciálváltozás: *akción potenciál*



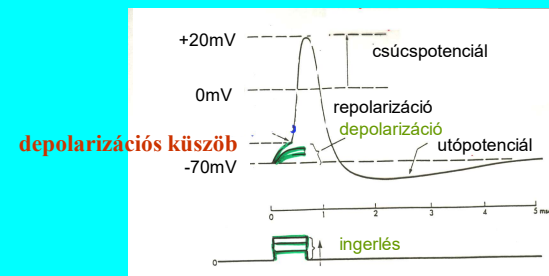
1938: **K.C. Cole** – méréssel igazolta, hogy a membrán vezetőképessége megnő az akción potenciál alatt



1948: **Alan Hodgkin és Bernard Katz** – kimutatta, hogy az akción potenciál amplitúdója függ az extracelluláris Na^+ koncentrációtól



Az akción potenciál kialakulása

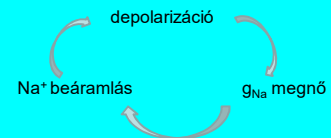


fakultatív
azonos amplitúdójú – minden vagy semmi
nem lokalizált

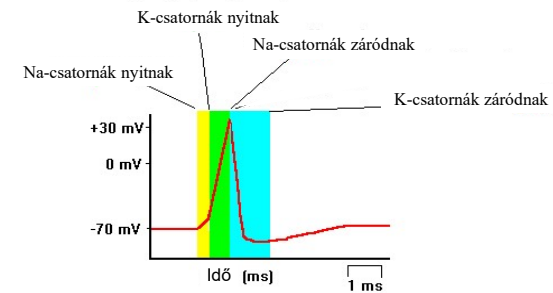
Hodgkin-Katz hipotézise az akciós potenciál kialakulásáról

feszültségfüggő ioncsatornák működése

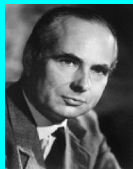
$$\varphi_e - \varphi_i = -\frac{RT}{F} \ln \frac{\sum p_k^+ c_{ke}^+ + \sum p_k^- c_{ki}^-}{\sum p_k^+ c_{ki}^+ + \sum p_k^- c_{ke}^-}$$



Hodgkin-Katz hipotézise az akciós potenciál kialakulásáról



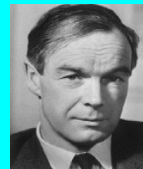
Hogyan lehetne az egyedi ionáramokat mérni?



Andrew Fielding Huxley
(1917-)

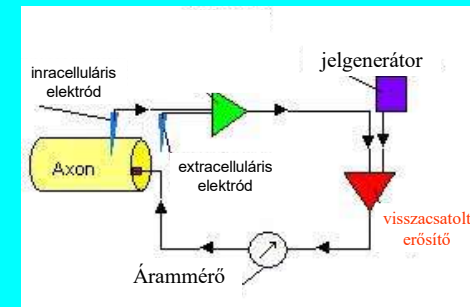
The Nobel Prize in Physiology or Medicine
1963

"for their discoveries concerning the ionic mechanisms involved in excitation and inhibition in the peripheral and central portions of the nerve cell membrane"

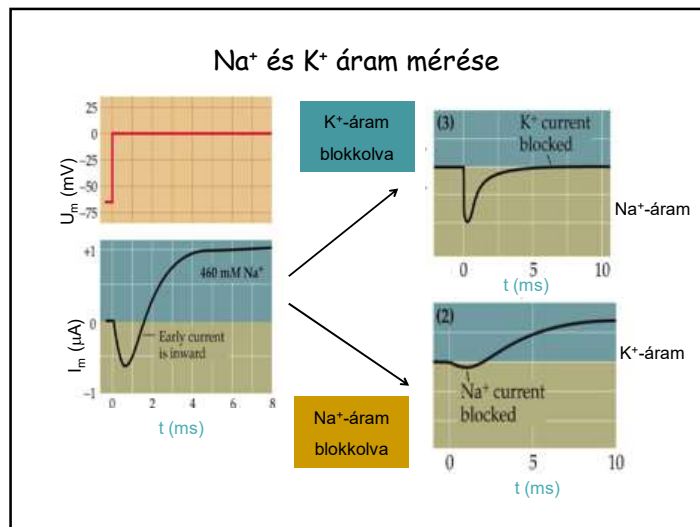


Alan Loyd Hodgkin
(1914-1998)

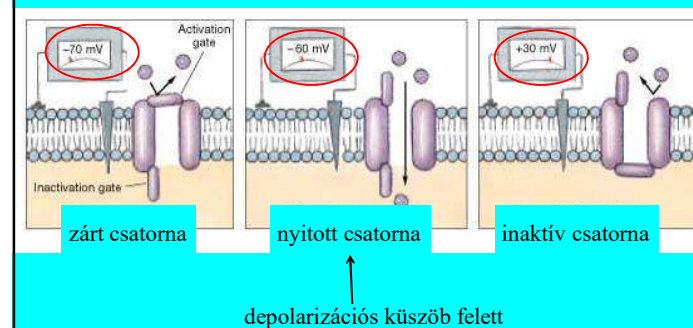
Voltage Clamp



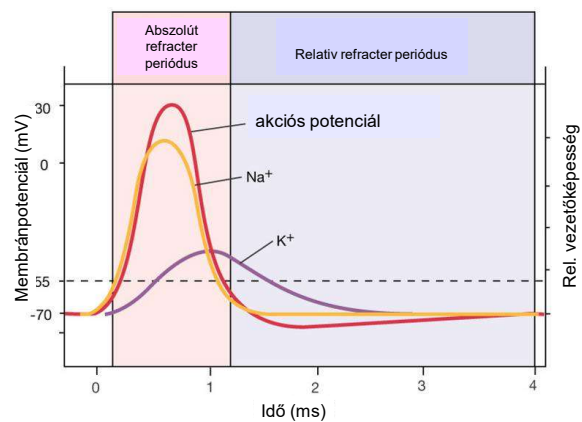
- membránpotenciált állandó értéken tartja
- az ionáramot – áramerősséget – méri



Feszültszabályozott Na⁺ -csatornák állapotai

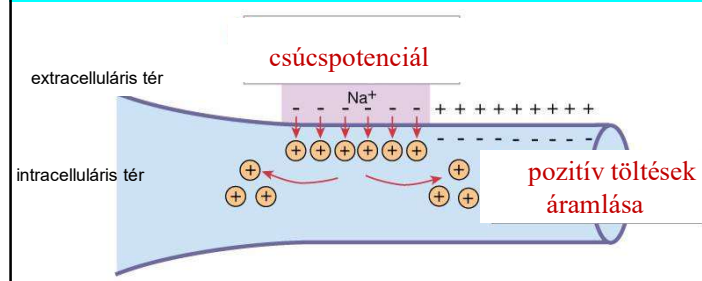


Vezetőképesség az akciós potenciál alatt



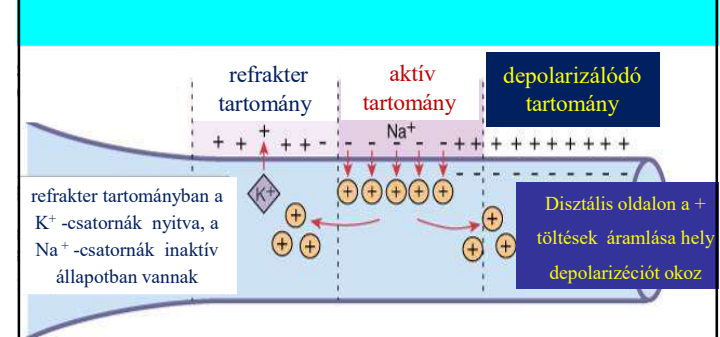
Az elektromos jellemzők hatása a jelvezetés
sebességére

Az akciós potenciál terjedése (1)



Alapja: helyi áramok kialakulása – helyi depolarizáció

Az akciós potenciál terjedése (2)



Terjedés sebessége – milyen gyorsan, milyen messze?

Sebessége: τ és λ , vagyis az elektromos jellemzők függvénye

- mennyi idő alatt éri el a depolarizációs küszöböt — τ
- milyen távolságon éri még el a depolarizációs küszöböt — λ

Az axon sugarának hatása a vezetés sebességére:

$$\lambda \sim \sqrt{\frac{R_m}{R_i}}$$

$$\tau = C_m R_m$$

$$r \uparrow \Rightarrow \begin{matrix} R_i \downarrow (\sim 1/r^2) \\ R_m \downarrow (\sim 1/r) \end{matrix} \Rightarrow \begin{matrix} \tau \downarrow \\ \lambda \uparrow \end{matrix}$$

tintahal óriás axon $r=250\mu\text{m}$
 $v=25\text{m/s}$

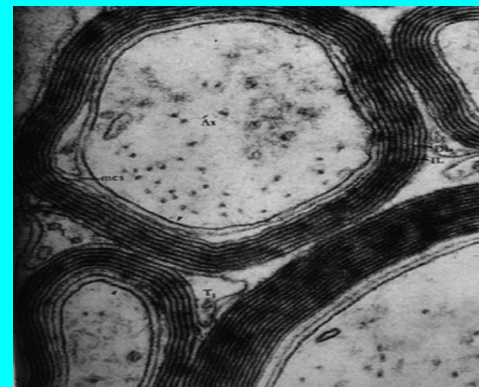
emberi idegsejt $r=10\mu\text{m}$
 $v \approx 0.5\text{m/s}$?

Hogyan növelhetjük a vezetés sebességét?

1. Az axon sugarának növelésével – metabolikusan “drága”
– helyigényes
2. A membráncapacitás csökkentése, mert kevesebb töltés szükséges a membránpotenciál változtatásához



Megoldás: mielinhüvely !



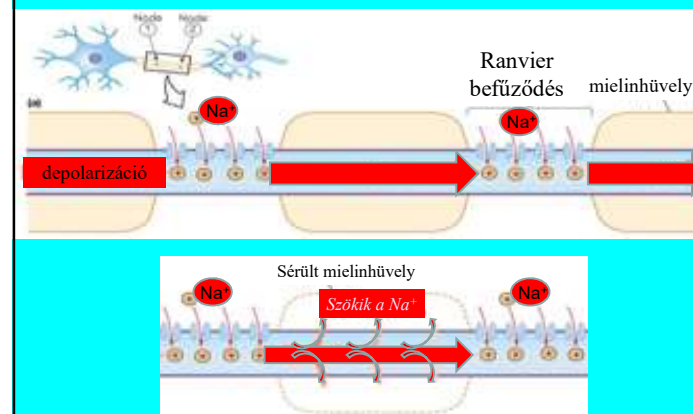
Megoldás: mielinhüvely !

R_m – nagyon nagy \Rightarrow nagy térkonstans

C_m – nagyon kicsi \Rightarrow kis időállandó

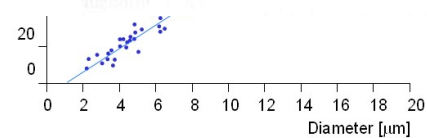
emberi idegsejt $r = 10 \mu m$
 $v \sim 100 m/s$?

Saltatorikus vezetés – gyors, energiatakarékos



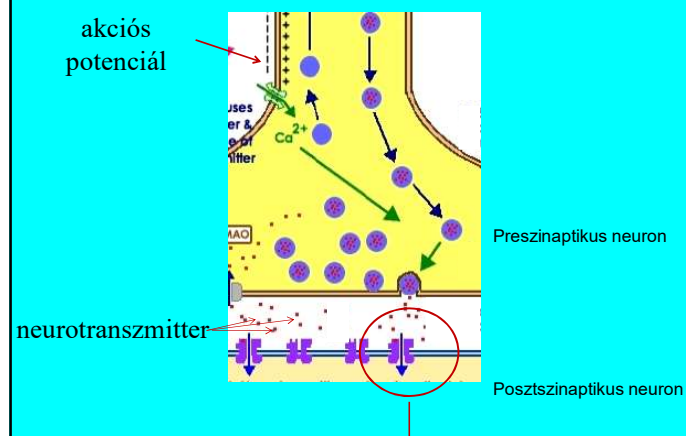
Az átmérő és a mielinhüvely hatása a vezetés sebességére

axon típusa	axon átmérője (μm)	vezetés sebessége (m/s)
mielinált		
A α	18.5	42
A β	14.0	25
A γ	11.0	17
B	Approximately 3.0	4.2
nem mielinált		
C	2.5	0.4–0.5



Az elektromos jellemzők hatása a jelátadás sikerességére

Jelátadás a szinapszisban

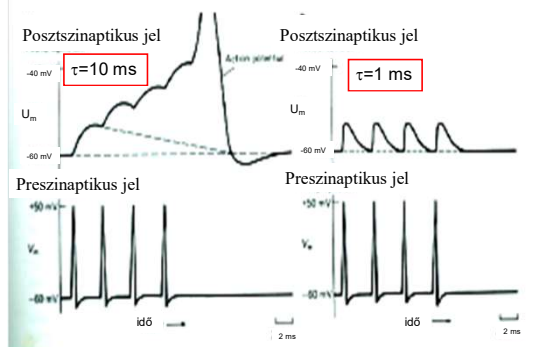


Az elektromos jellemzők hatása a jelátadás sikerességére

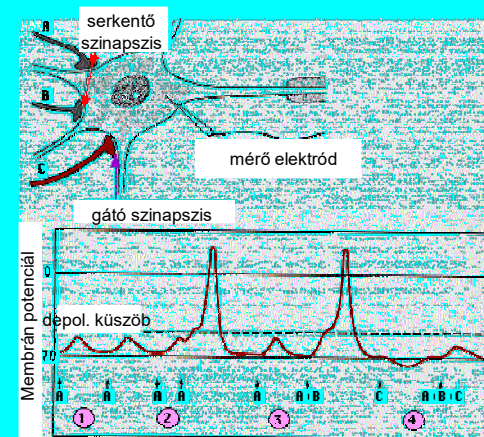
térbeli szummáció: egyidejűleg, több ponton érkező küszöb alatti ingerek összegződése

időbeli szummáció: egyazon pontba érkező küszöb alatti ingerek összegződése

időbeli szummáció: egyazon pontba érkező küszöb alatti ingerek összegződése akciós potenciált válthat ki



Példa az időbeli és térbeli szummációra



Összefoglalás

Nyugalmi potenciál

leírása: egyensúlyi modell
transzport modell
elektromos modell

szerepe

A nyugalmi potenciál helyi megváltozása

jellemzői: időálló
térkonstans

szerepe: ingerületvezetés sebessége
jelátadás sikeressége

Akciós potenciál

szerepe: információ továbbítás
lefolyása