

# 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

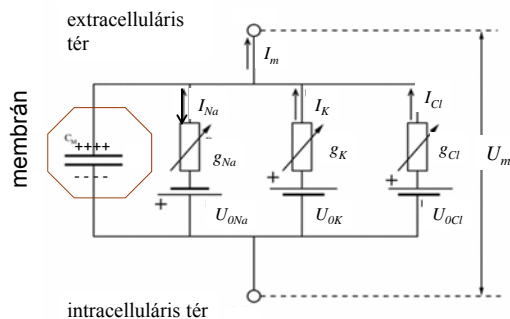
## A nyugalmi potenciál értelmezése:

-Donnan vagy egyensúlyi modell

-Transzport modell

-Elektromos modell

## A sejtmembrán elektromos modellje:



elektromotoros erő  
vezetőképesség  
kapacitás

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

Konduktív áram

Kapacitív áram

Változik, ha a csatorna  
vezetőképessége potenciálfüggő

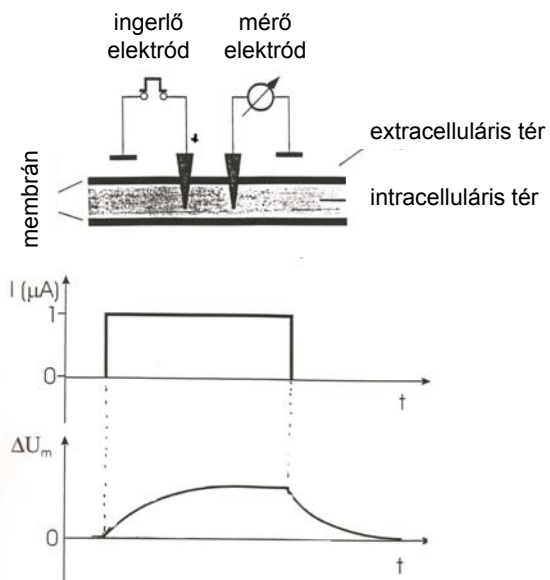
$$I_c = C_m \frac{\Delta U_m}{\Delta t}$$

## A nyugalmi potenciál megváltozása

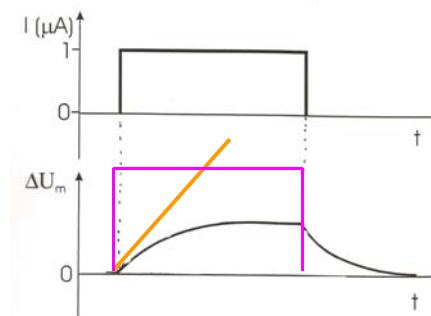
1. A membrán “passzív” elektromos tulajdonságai

## Kísérlet

Áramirány :  
pozitív töltések  
áramlásának  
iránya.



## Miért éppen így?

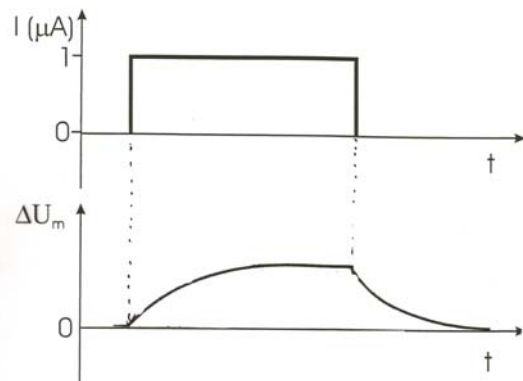


Nem így  
Nem így

Miért éppen így?

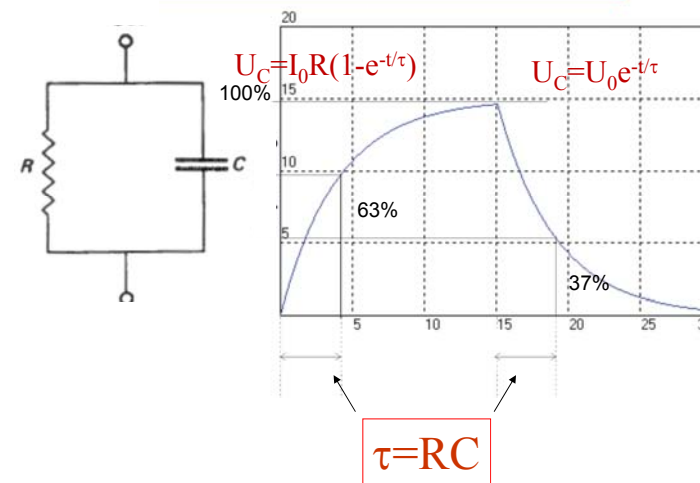
A membrán elektromos tulajdonságai miatt:

- ellenállás
- kapacitás

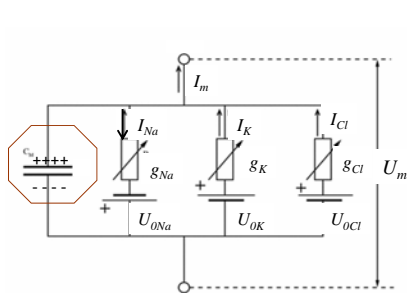


Hol is láttam már ehhez hasonlót?

Párhuzamos RC-kör töltése és kisütése



Összevetése az elektromos modellel:



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

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

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

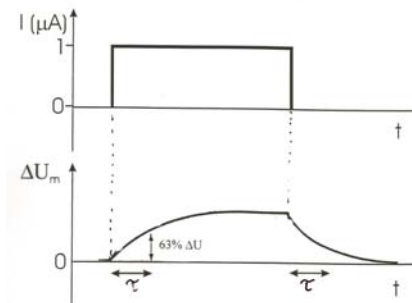
$$C_m \frac{\Delta U_m}{\Delta t} + \frac{\Delta U_m - U_0}{R_m} - I_{inger} = 0$$

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



a membrán kapacitása  
a membrán keresztirányú ellenállása

$$\tau = C_m R_m$$

**τ a membrán időállandója:**

az az idő, ami alatt az impulzussal keltett feszültségváltozás

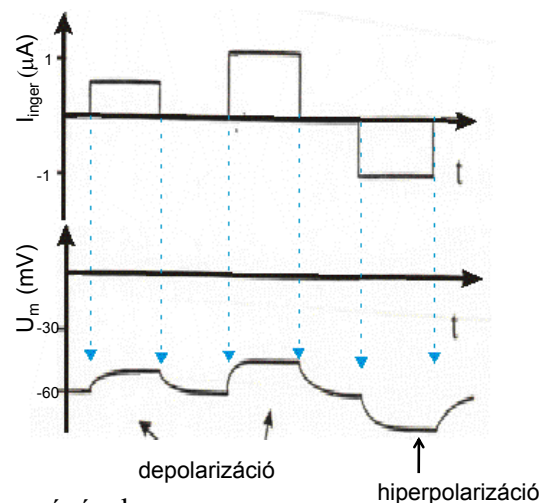
-eléri a telítési érték 63%-át vagy

-az ingerlés megszűnte után e-ed részére csökken

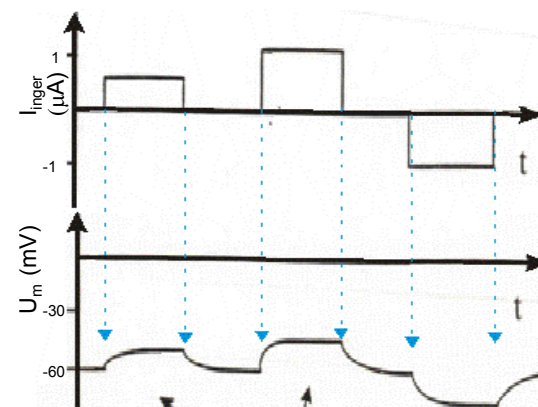
$$U_m(t) = U_t \left[ 1 - e^{-\frac{t}{R_m C_m}} \right]$$

$U_t$  egyenesen arányos az ingerlő impulzus nagyságával

A változás meredeksége függ az ingerlő impulzus nagyságától



## A nyugalmi potenciál helyi megváltozása

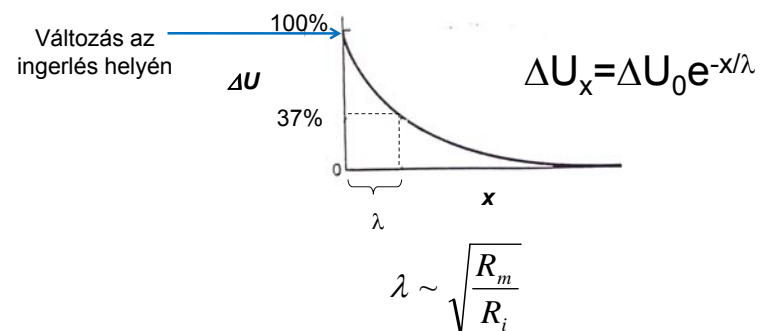
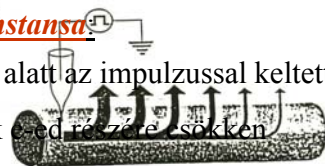


obligát  
ugrásmentes  
változtatható amplitúdójú  
változtatható irányú  
analóg  
lokalizált

## A nyugalmi potenciál helyi megváltozása az ingerlés helyétől távolodva

$\lambda$  a membrán térkonstansa

az a távolság, amely alatt az impulzussal keltett feszültségváltozás maximális értékének  $\frac{1}{e}$  részére esik le



## A nyugalmi potenciál helyi megváltozása

- kísérletileg áramimpulzusokkal
- adekvát ingerekkel
- posztszinaptikus 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

### “Akiós potenciál történelem”



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



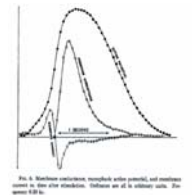
1843: **Emil Dubois-Reymond** – nyugalmi potenciál, ami megváltozik izomösszehúzódáskor



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

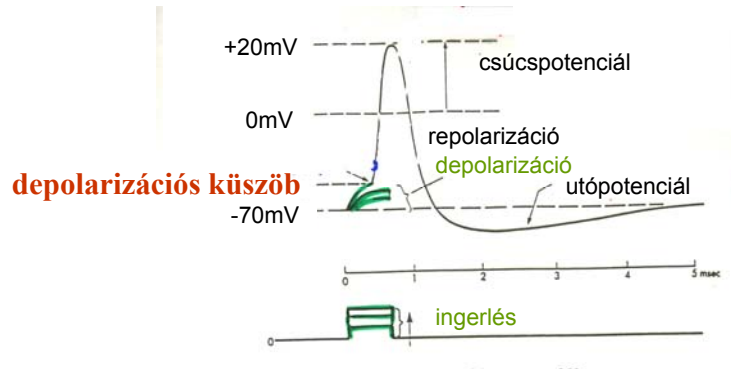


1938: **K.C. Cole** – méréssel igazolta, hogy a membrán vezetőképessége megnő az akciós potenciál alatt



1948: **Alan Hodgkin és Bernard Katz** – kimutatta, hogy az akciós potenciál amplitúdója függ az extracelluláris  $\text{Na}^+$  koncentrációtól

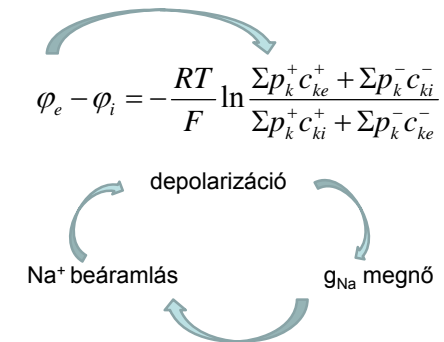
## Az akciós potenciál kialakulása



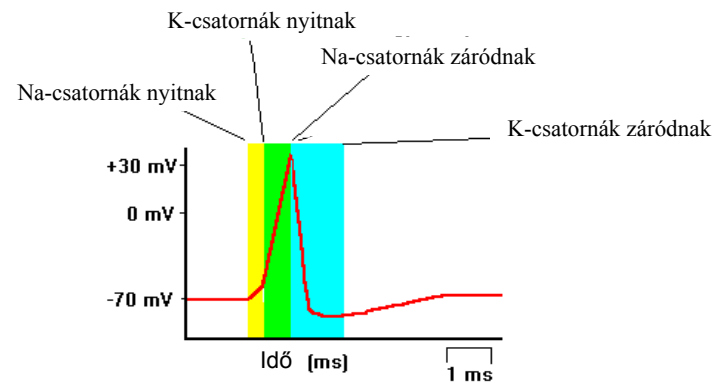
fakultatív  
azonos amplitúdójú – minden vagy semmi  
nem lokalizált

## Hodgkin-Katz hipotézise az akciós potenciál kialakulásáról

feszültségfüggő ioncsatornák működése



## Hodgkin-Katz hipotézise az akciós potenciál kialakulásáról



Hogyan lehetne az egyedi ionáramokat mérni?



Andrew Fielding Huxley  
(1917- )

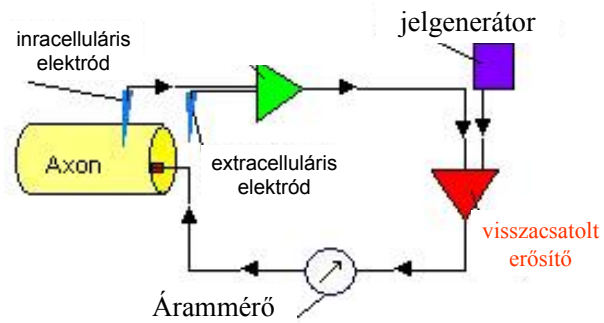


Alan Loyd Hodgkin  
(1914-1998)

The Nobel Prize in Physiology or Medicine  
1963

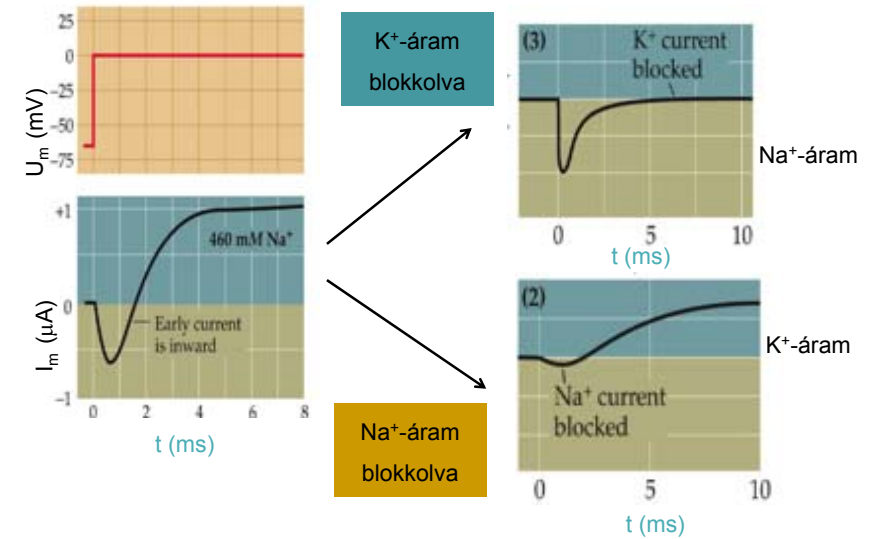
“for their discoveries concerning the ionic mechanisms involved in excitation and inhibition in the peripheral and central portions of the nerve cell membrane”

## Voltage Clamp

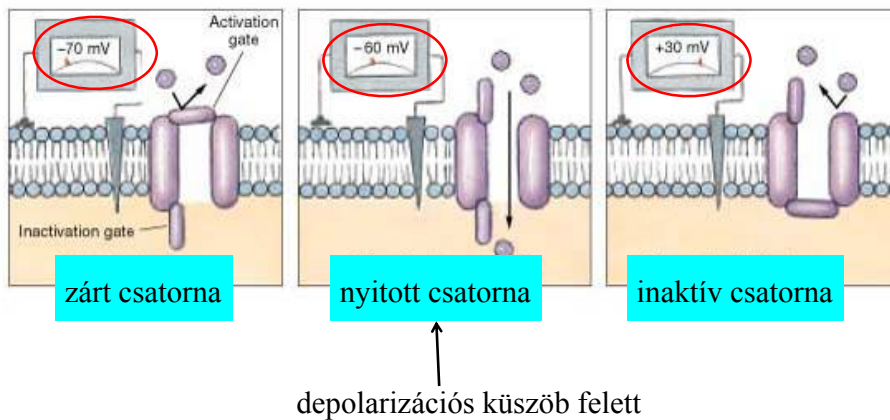


- membránpotenciált állandó értéken tartja
- az ionáramot – áramerősséget – méri

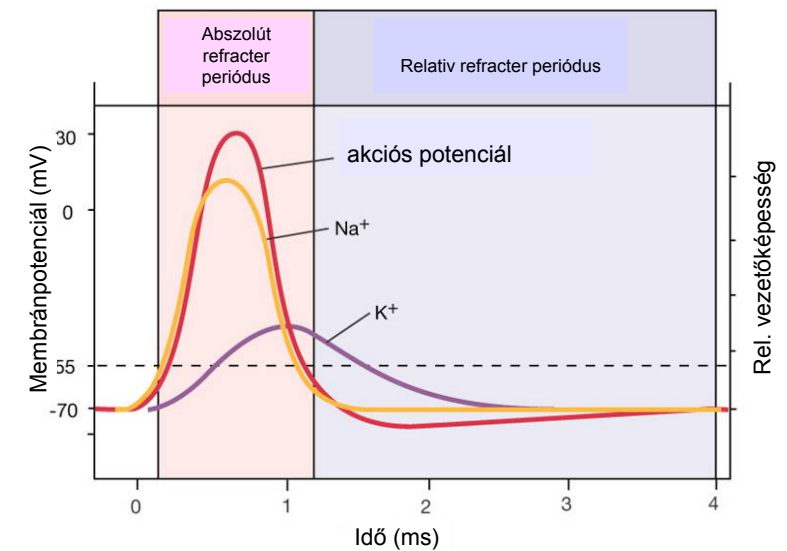
## Na<sup>+</sup> és K<sup>+</sup> áram mérése



## Feszültségszabályozott Na<sup>+</sup> -csatornák állapotai

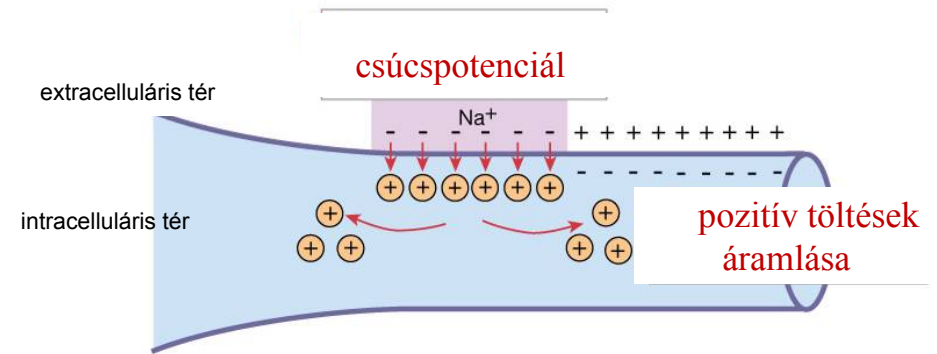


## Vezetőképesség az akciós potenciál alatt



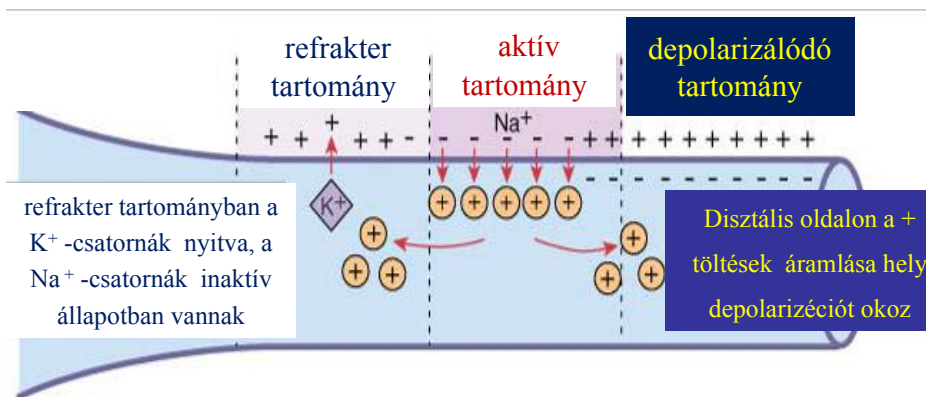
## Az elektromos jellemzők hatása a jelvezetés sebességére

### Az akciós potenciál terjedése (1)



**Alapja:** helyi áramok kialakulása – helyi depolarizáció

### Az akciós potenciál terjedése (2)



**Terjedés sebessége – milyen gyorsan, milyen messze?**

**Sebessége:**  $\tau$  és  $\lambda$ , vagyis az elektromos jellemzők függvénye

- mennyi idő alatt éri el a depolarizációs küszöböt —  $\tau$

- milyen távolságon éri még el a depolarizációs küszöböt —  $\lambda$



*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  $r=250\mu\text{m}$   
 $v=25\text{m/s}$

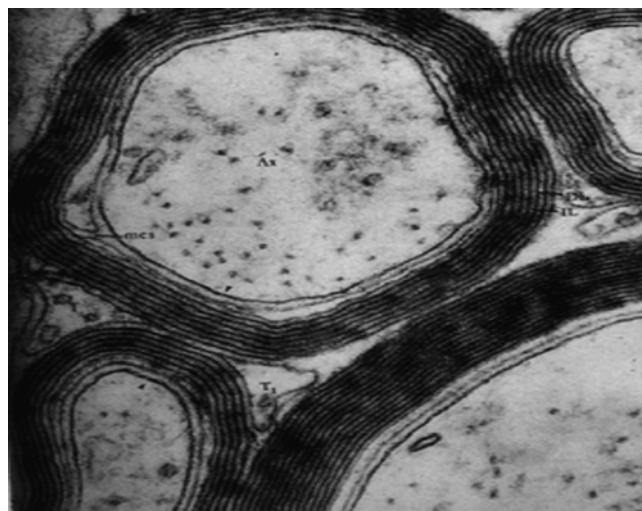
emberi idegsejt  $r=10\mu\text{m}$   
 $v \approx 0.5\text{m/s}$  ?

*Hogyan növelhetjük a vezetés sebességét?*

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



**Megoldás: mielinhüvely !**



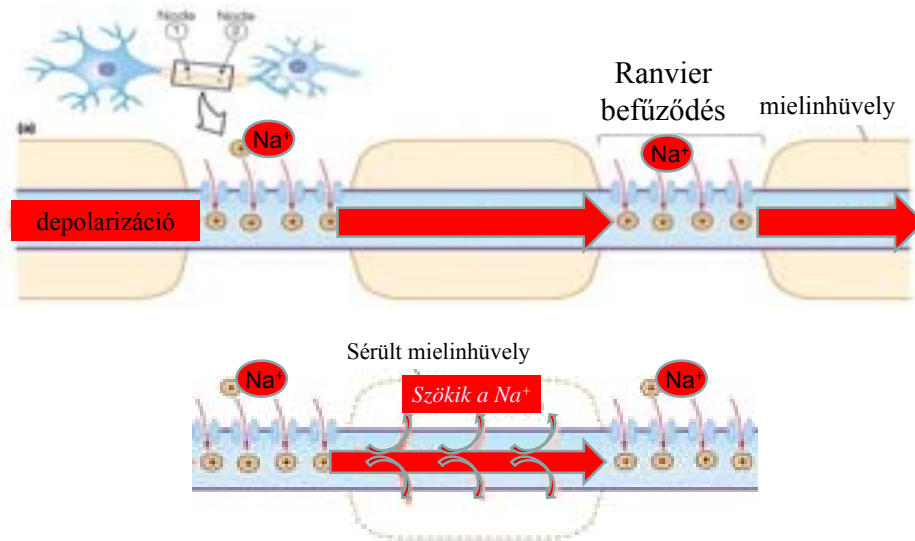
**Megoldás: mielinhüvely !**

$R_m$  – nagyon nagy  $\Rightarrow$  nagy térkonstans

$C_m$  – nagyon kicsi  $\Rightarrow$  kis időállandó

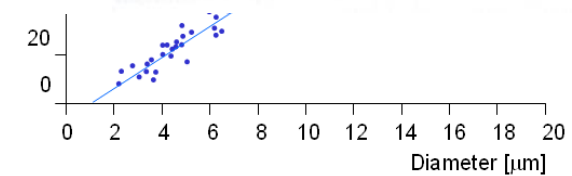
emberi idegsejt  $r=10\mu\text{m}$   
 $v \sim 100\text{m/s}$  ?

## Saltatorikus vezetés - gyors, energiatakarékos



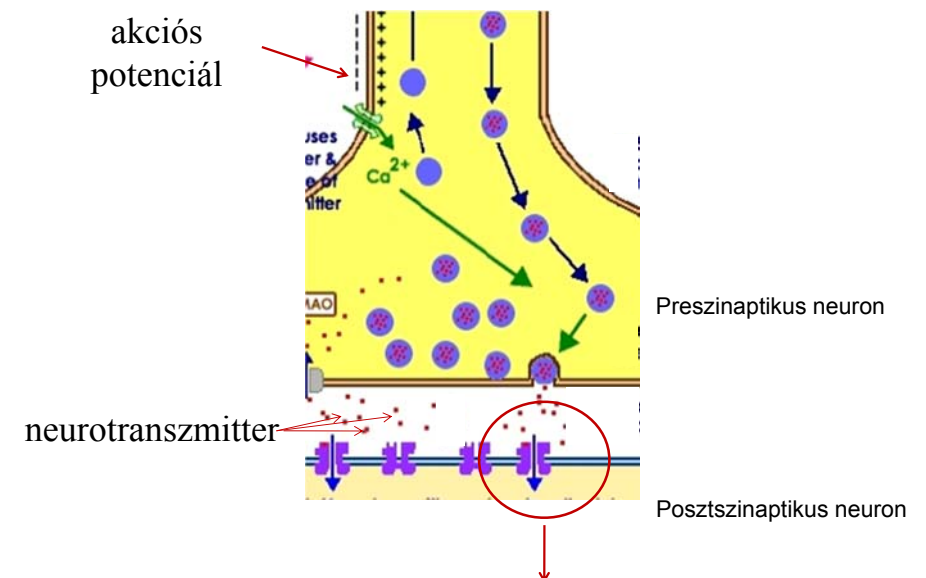
## Az átmérő és a mielinhüvely hatása a vezetés sebességére

| axon típusa   | axon átmérője (μm) | vezetés sebessége (m/s) |
|---------------|--------------------|-------------------------|
| mielinált     |                    |                         |
| Aα            | 18.5               | 42                      |
| Aβ            | 14.0               | 25                      |
| Aγ            | 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

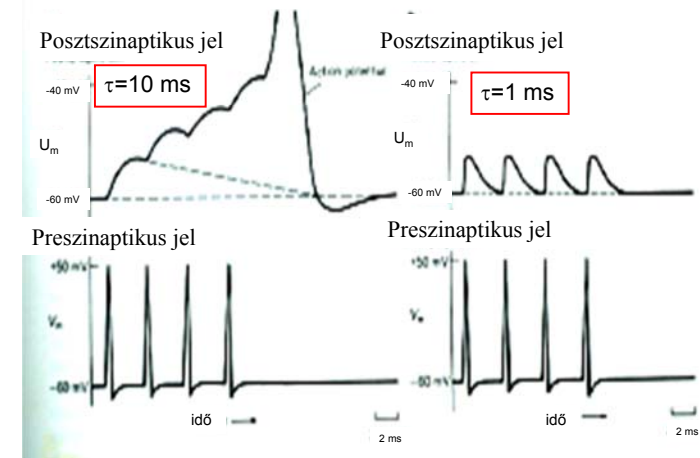


## Az elektromos jellemzők hatása a jelátadás sikerességére

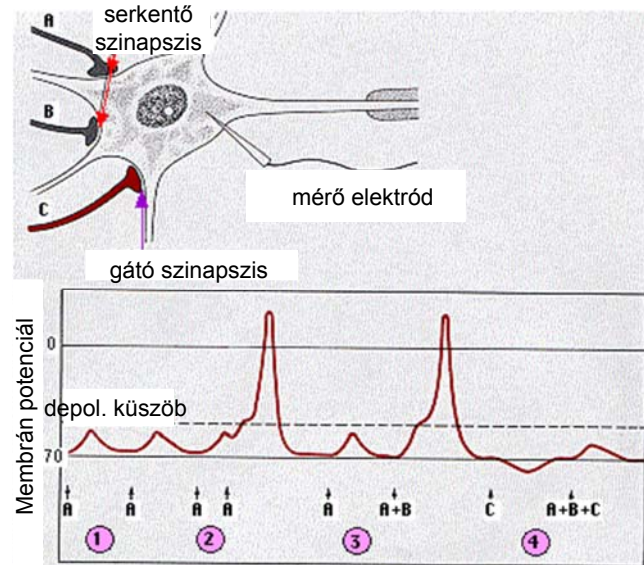
**térbeli szummáció:** egyidejűleg, több ponton érkező küszöb alatti ingerek összegződése

**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: időállandó  
térkonstans  
szerepe: ingerületvezetés sebessége  
jelátadás sikeressége

### Akciós potenciál

szerepe: információ továbbítás  
lefolyása