

# 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

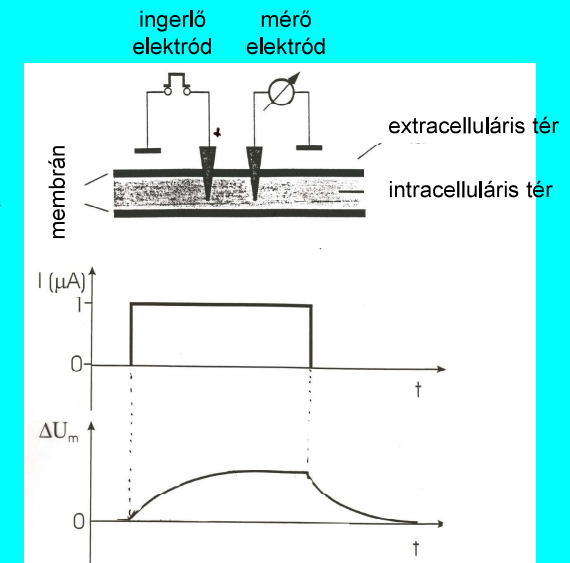
-Elektromos modell

## *A nyugalmi potenciál megváltozása*

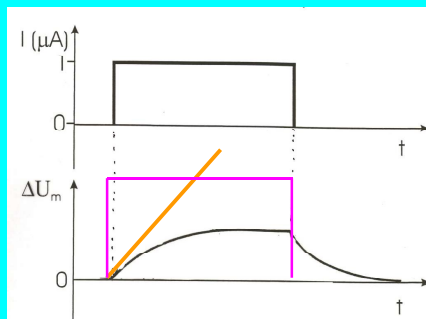
### 1. A membrán “passzív” elektromos tulajdonságai

## Kísérlet

Áramirány :  
pozitív töltések  
áramlásának  
iránya.



## Miért éppen így?

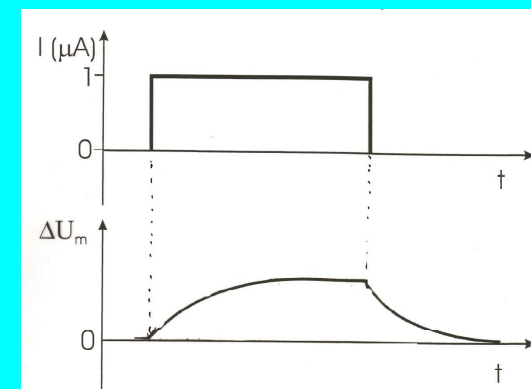


Nem így  
Nem így

## Miért éppen így?

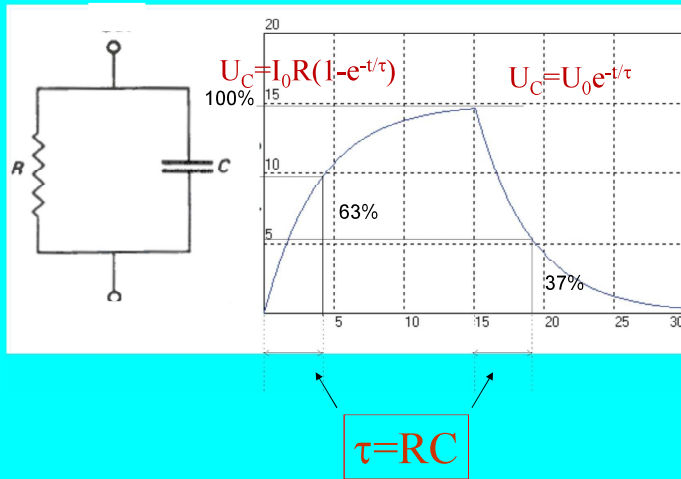
A membrán elektromos tulajdonságai miatt:

- ellenállás
- kapacitás

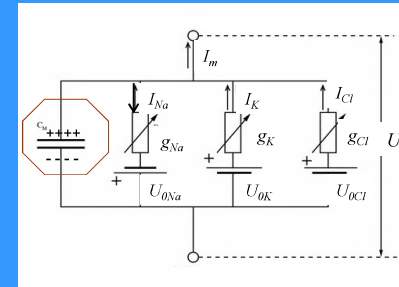


Hol is láttam már ehhez hasonlót?

Párhuzamos RC-kör töltése és kistítése



Összevetése az elektromos modellel:



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

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

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

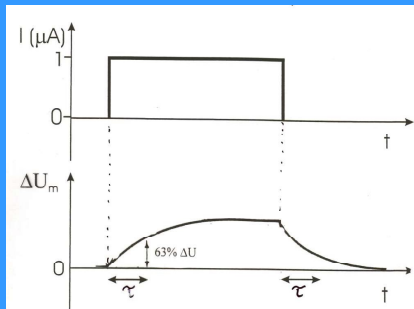
$$C_m \frac{\Delta U_m}{\Delta t} + \frac{\Delta U_m - U_0}{R_m} - I_{inger} = 0$$

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

$$\tau = C_m R_m$$

$\tau$  a membrán időállandója:

az az idő, ami alatt az impulzussal keltett feszültségváltozás

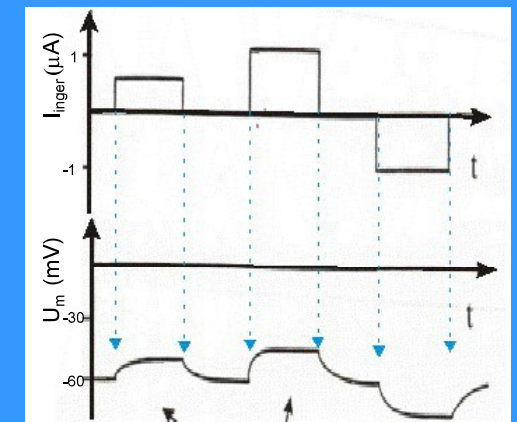
-eléri a telítési érték 63%-át vagy

-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

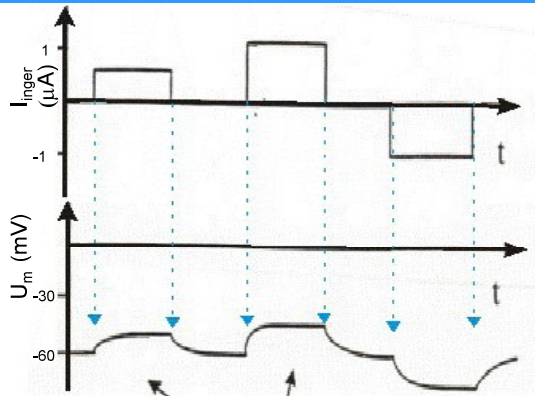
A változás meredeksége függ az ingerlő impulzus nagyságától



depolarizáció

hiperpolarizáció

## A nyugalmi potenciál helyi megváltozása

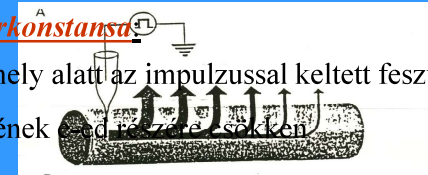


obligát  
ugrásmentes  
változtatható amplitúdójú  
változtatható irányú  
analog  
lokalizált

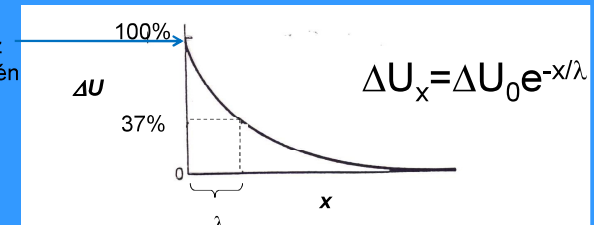
## A nyugalmi potenciál helyi megváltozása az ingerlés helyétől távolodva

$\lambda$  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
- 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

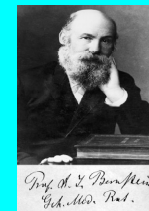


#### “Akcións potenciál történelem”

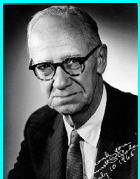
1780: **Luigi Galvani** – elektromos vezetés és izomösszehúzódás kapcsolata



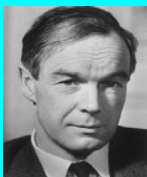
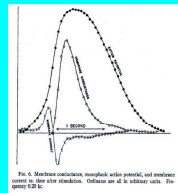
1843: **Emil Dubois-Reymond** – nyugalmi potenciál, ami megváltozik izomösszehúzódáskor



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



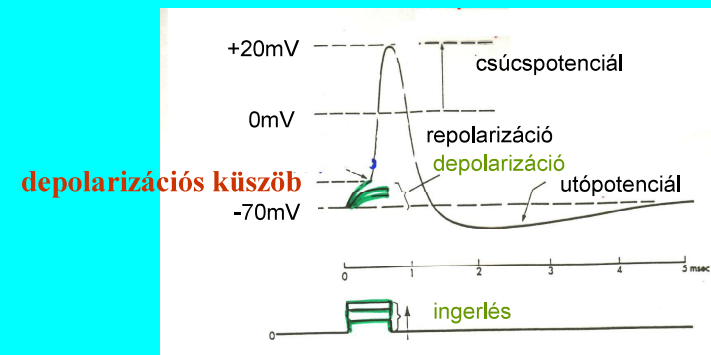
1938: **K.C. Cole** – méréssel igazolta, hogy a membrán vezetőképessége megnő az akcións potenciál alatt



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



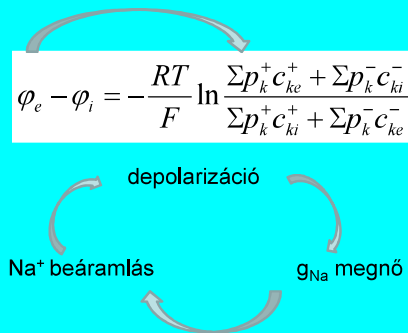
### *Az akcións potenciál kialakulása*



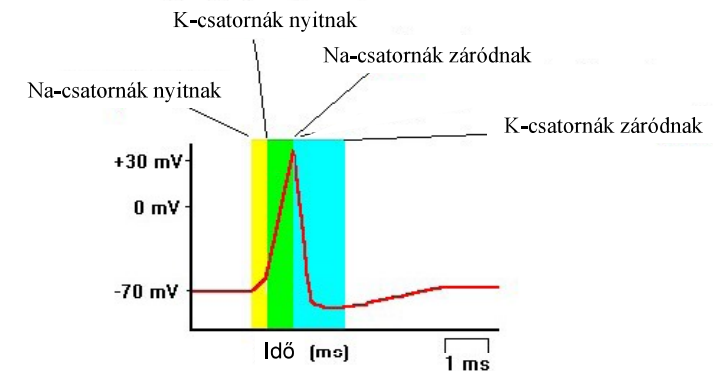
fakultatív  
azonos amplitúdójú – minden vagy semmi  
nem lokalizált

## Hodgkin-Katz hipotézise az akciós potenciál kialakulásáról

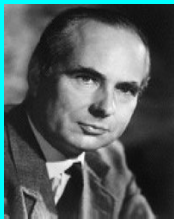
feszültségfüggő ioncsatornák működése



## Hodgkin-Katz hipotézise az akciós potenciál kialakulásáról



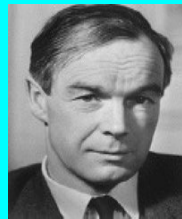
Hogyan lehetne az egyedi ionáramokat mérni?



**Andrew Fielding Huxley**  
(1917- )

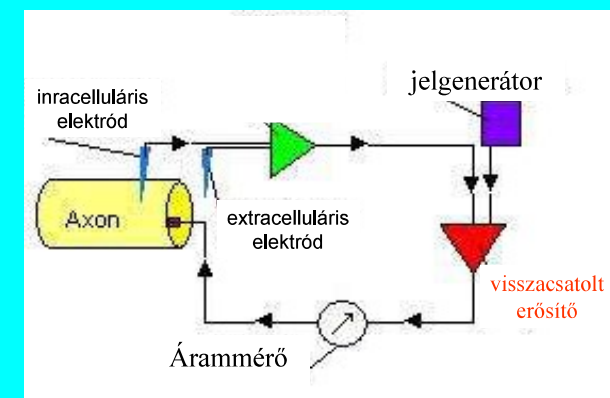
The Nobel Prize in Physiology or Medicine  
1963

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



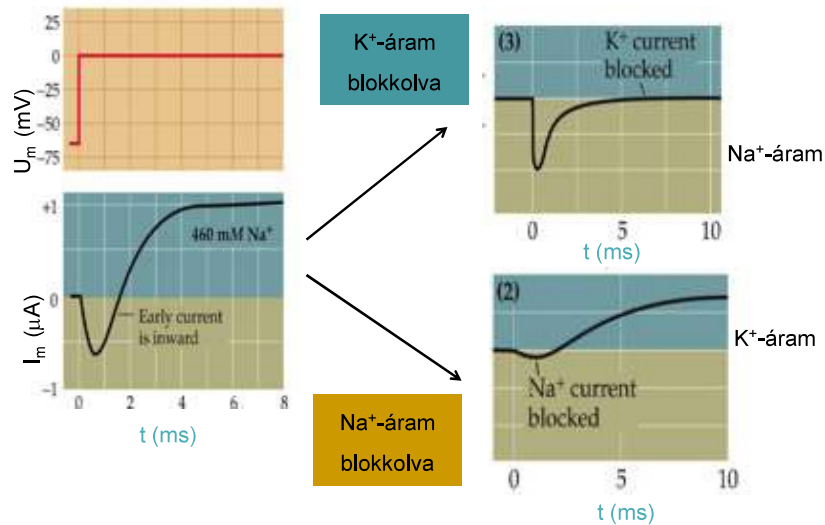
**Alan Loyd Hodgkin**  
(1914-1998)

## Voltage Clamp

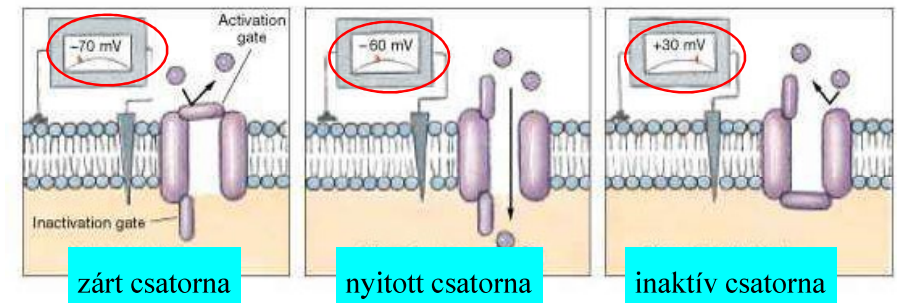


- membránpotenciált állandó értéken tartja
- az ionáramot – áramerősséget – méri

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

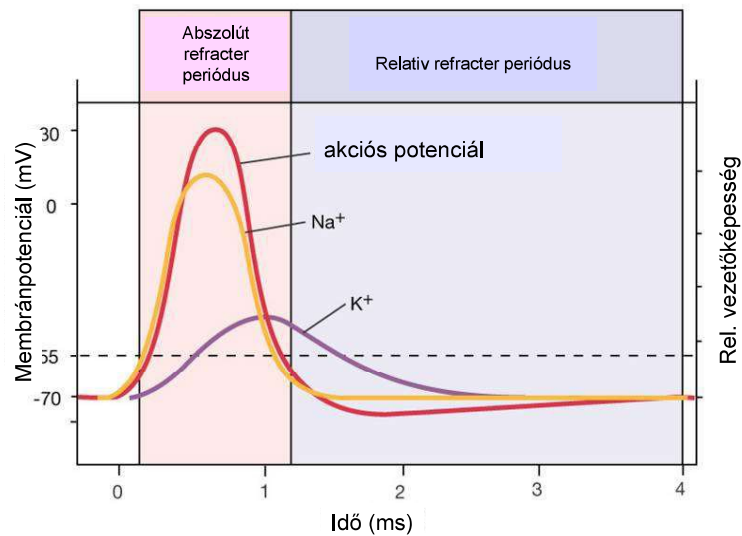


## Feszültségszabályozott Na<sup>+</sup> -csatornák állapotai



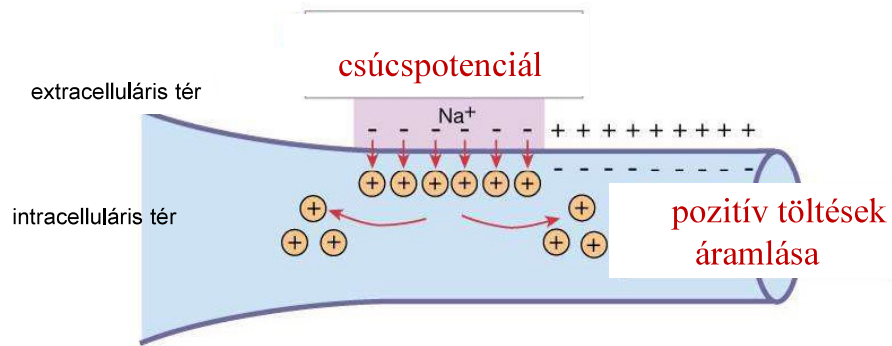
depolarizációs küszöb felett

## Vezetőképesség az akciós potenciál alatt



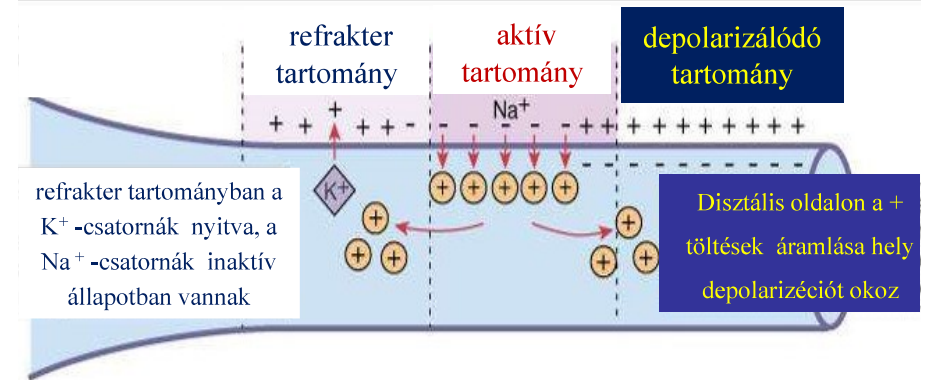
Az elektromos jellemzők hatása a jelvezetés sebességére

## 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:**

$$\lambda \sim \sqrt{\frac{R_m}{R_i}} \quad \tau = C_m R_m$$

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

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

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

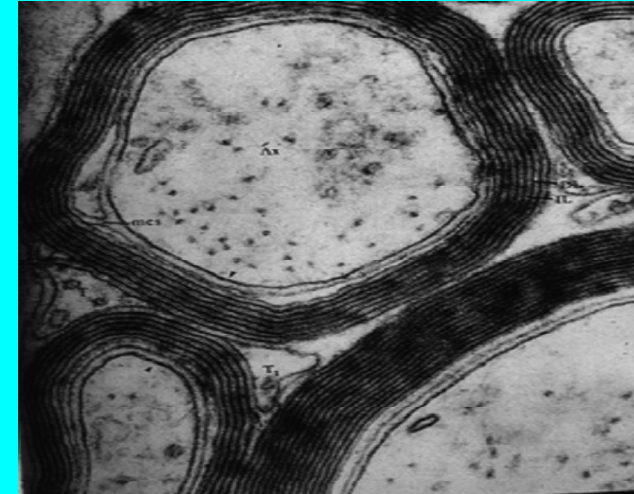


## Hogyan növelhetjük a vezetés sebességét?

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



## Megoldás: mielinhüvely !



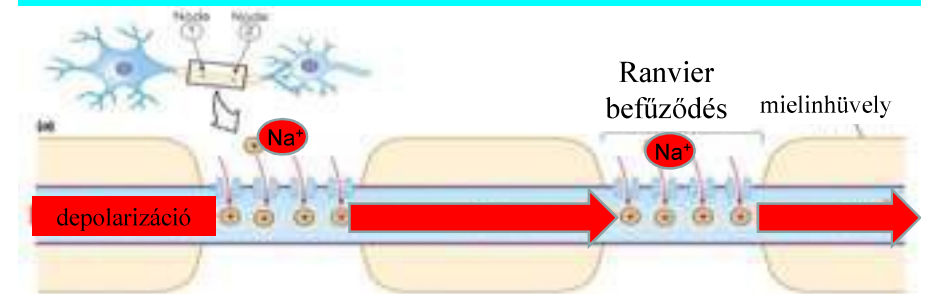
## Megoldás: mielinhüvely !

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

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

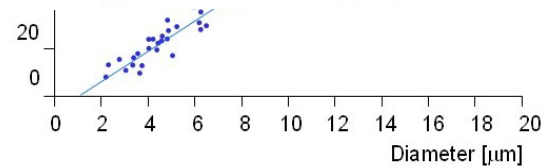
emberi idegsejt  $r = 10 \mu m$   
 $v \sim 100 m/s$  ?

## Saltatorikus vezetés - gyors, energiatakarékos



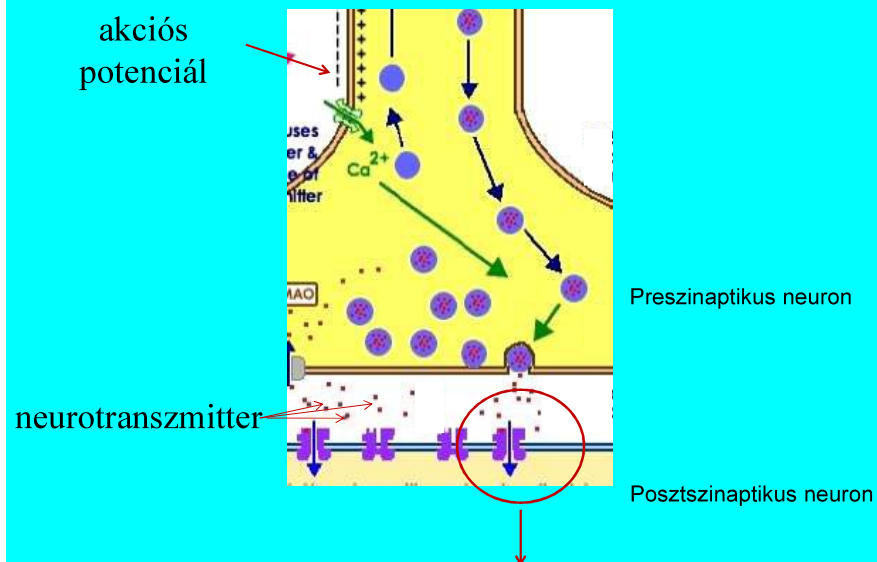
## Az átmérő és a mielinhüvely hatása a vezetés sebességére

axon típusa	axon átmérője ( $\mu\text{m}$ )	vezetés sebessége (m/s)
mielinált		
A $\alpha$	18.5	42
A $\beta$	14.0	25
A $\gamma$	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

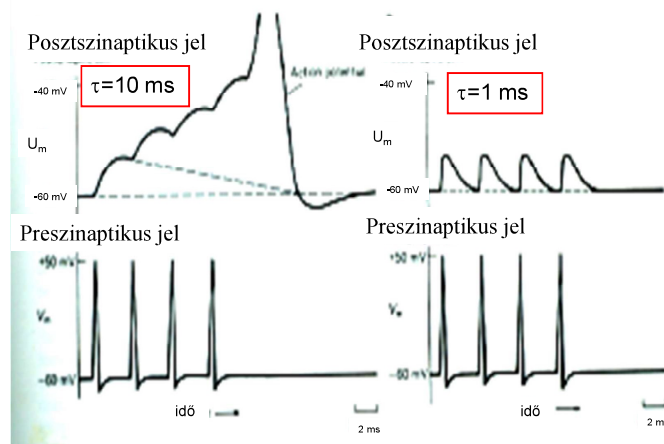


## Az elektromos jellemzők hatása a jelátadás sikerességére

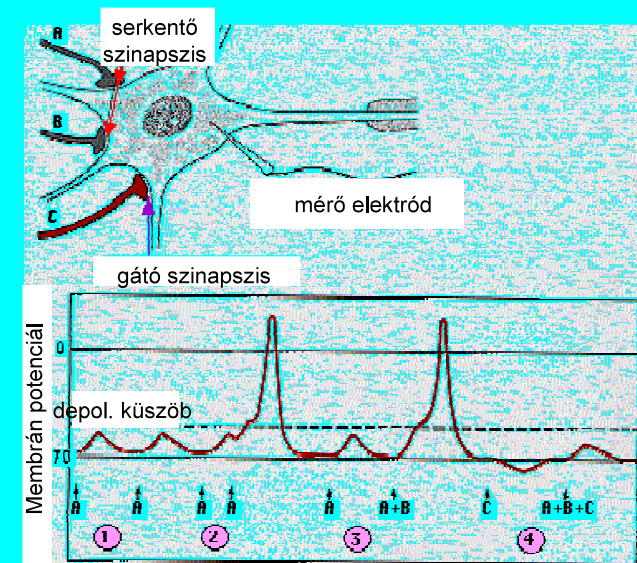
**térbeli szummáció:** egyidejűleg, több ponton érkező küszöb alatti ingerek összegződése

**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