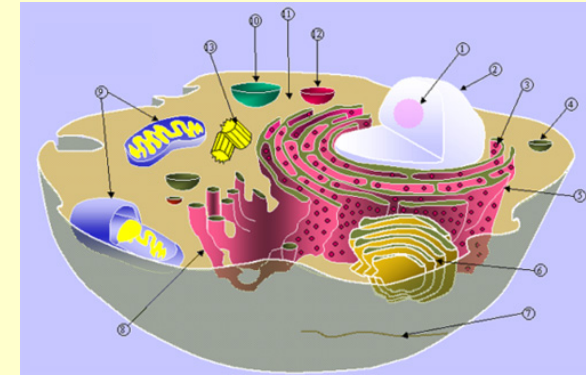


Transzportfolyamatok a biológiai rendszerekben

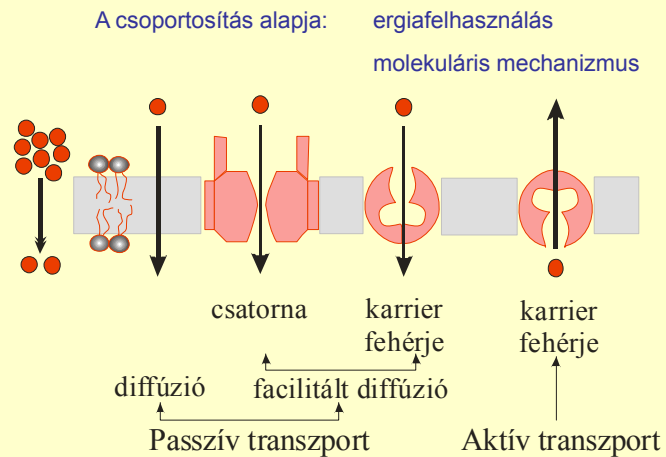
Transzportfolyamatok a sejt nyugalmi állapotában

A sejtben az anyagtranszport számára az oldattól eltérő körülmények találhatók.



- A citoplazmán belül is helyről helyre változik összetétel, viszkozitás.
- A sejtet/sejtorganelumokat **membránok** - lipid kettősréteg – határolják.

A membránon keresztül történő anyagtranszport csoportosítása



Molekulák diffúziója membránon keresztül

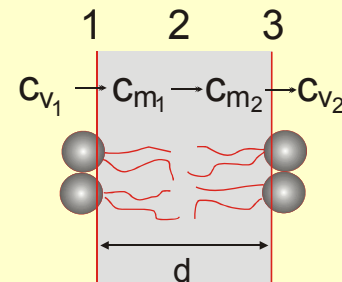
Diffúzió a lipid kettős rétegen keresztül

Fick I.

$$J_m = -D \frac{\Delta c}{\Delta x}$$

$$D_m \ll D$$

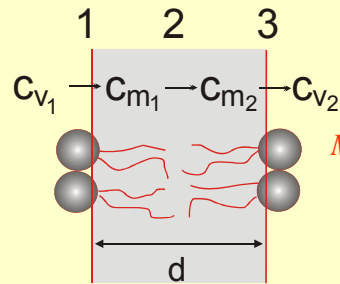
$$J_m = -D_m \frac{c_{m2} - c_{m1}}{d}$$



A koncentráció a membránon belül egyenletesen változik

Molekulák diffúziója membránon keresztül

Diffúzió a lipid kettős rétegen keresztül



$$J_m = -D_m \frac{C_{m2} - C_{m1}}{d}$$

$$J_m = -p_m(C_{m2} - C_{m1})$$

Membrán permeabilitási állandó [ms^{-1}]

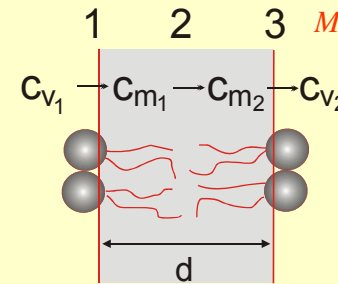
☹️ nem mérhető

$$\frac{C_{m1}}{C_{v1}} = \frac{C_{m2}}{C_{v2}} = K$$

$$C_{m1} = KC_{v1}$$

Molekulák diffúziója membránon keresztül

Diffúzió a lipid kettős rétegen keresztül



$$J_m = -p_m(C_{m2} - C_{m1})$$

Membrán permeabilitási állandó [ms^{-1}]

☹️ nem mérhető

$$\frac{C_{m1}}{C_{v1}} = \frac{C_{m2}}{C_{v2}} = K$$

$$C_{m1} = KC_{v1}$$

$$J_m = -p_m K (C_{v2} - C_{v1})$$

$$J_m = -p(C_{v2} - C_{v1})$$

$$J_m = -p(C_{v2} - C_{v1})$$

Permeabilitási állandó [ms^{-1}]

Értékét befolyásolja:

- diffúziós állandó a membránban
- membrán vastagsága
- megoszlási hányados a vizes és lipid fázis között

Permeabilitás és polaritás összefüggése

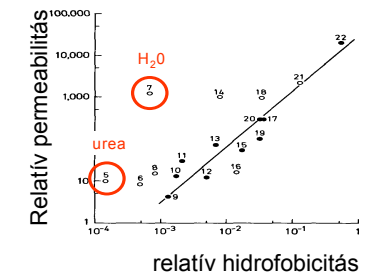
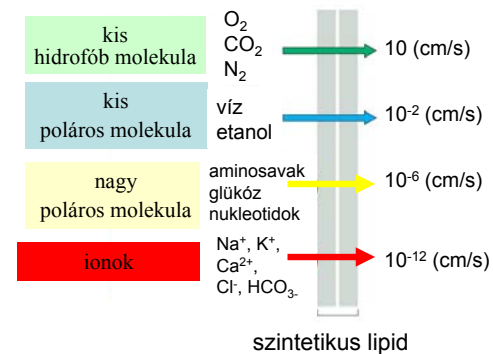


Figure 12-2 Essential Cell Biology, 2/e. (© 2004 Garland Science)

Ionok diffúziója membránon keresztül

$$\text{Fick I. } J_m = -D \frac{\Delta c}{\Delta x}$$

kémiai potenciál
és
elektromos potenciál
együttesen

$$J_k = -D_k \left(\frac{\Delta c_k}{\Delta x} + c_k \frac{z_k F}{RT} \frac{\Delta \varphi}{\Delta x} \right)$$

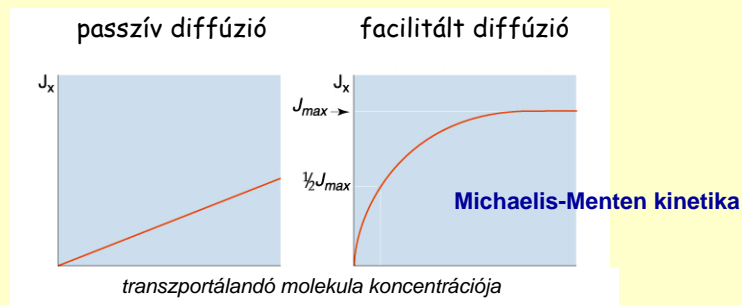
k-dik ion anyagáram-sűrűsége

Megfigyelés: számos esetben, habár a transzport nem energiatfüggő,
a kémiai/elektrokémiai potenciálnak megfelelően folyik,
**anyagáram-sűrűsége – sebessége – mégsem írható le
passzív diffúzióként a Fick törvénnyel.**

Facilitált diffúzió membránon keresztül

Fehérje természetű közvetítők – szelektív diffúziós útvonalak

- passzív diffúziónál nagyobb sebességű
- szelektív
- telíthető
- szelektíven gátlható



Aktív transzport membránon keresztül

-a transzport a kémiai/elektrokémiai **potenciáleséssel szemben**

folyik,

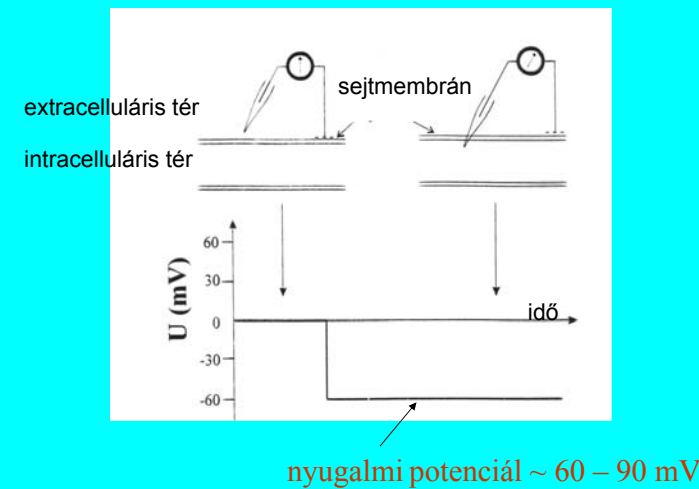
-energiafüggő

- ATP-vel működő transzporterek
- fényvel működő transzporterek
- csatolt transzporterek

Elektrofiziológiai jelenségek és a transzportfolyamatok kapcsolata

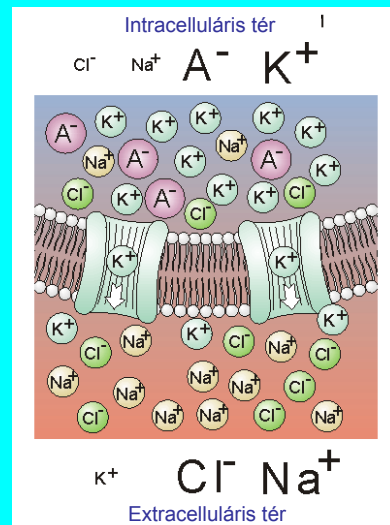
Tapasztalat 1:

A sejtmembrán két oldala között elektromos potenciálkülönbség van



Tapasztalat 2:

A sejtmembrán két oldalának sajátos az ionösszetétele



Tapasztalat 2 (folyt.):

A sejtmembrán két oldalán egyenlőtlen az ionok eloszlása

Szövet	C _{Intracelluláris} (mmol/l)			C _{Extracelluláris} (mmol/l)		
	[Na ⁺] _i	[K ⁺] _i	[Cl ⁻] _i	[Na ⁺] _e	[K ⁺] _e	[Cl ⁻] _e
Tintahal óriásaxon	72	345	61	455	10	540
békaizom	20	139	3,8	120	2,5	120
patkányizom	12	180	3,8	150	4,5	110

Lehetséges magyarázatok - modell 1

Nyugalomban nem változik az ioneloszlás



vagyis nem folyik transzport



Tételezzük fel, (1) hogy **egyensúlyban** van a rendszer

vagyis

az **elektrokémiai potenciál** egyenlő a membrán két oldalán

$$\mu_{e,i}^{II} - \mu_{e,i}^I = 0$$

$$\mu_{e,i}^{II} - \mu_{e,i}^I = 0$$



$$\mu_0 + RT \ln c_i^I + zF \varphi_i^I = \mu_0 + RT \ln c_i^{II} + zF \varphi_i^{II}$$



egyensúlyi
potenciál

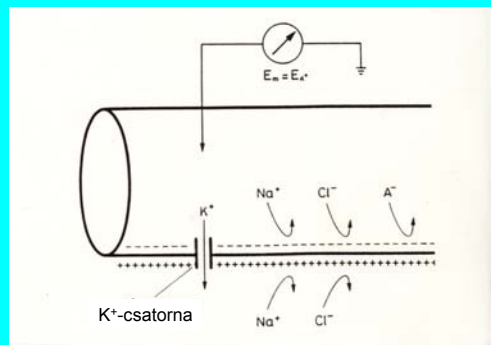
$$\rightarrow \varphi_i^I - \varphi_i^{II} = \frac{RT}{zF} \ln \frac{c_i^I}{c_i^{II}}$$

Nernst-egyenlet

Tételezzük fel, (2) hogy **K⁺**-ra nézve korlátlanul

permeábilis a membrán

(3) hogy **Na⁺** teljesen immobilis



Donnan modell – egyensúlyi modell

-az elektrokémiai potenciál egyenlő a membrán két oldalán

-a membrán csak a K⁺-ra (és Cl⁻-ra) nézve átjárható

-a sejt és környezete termodinamikailag zárt rendszer



egyensúlyi potenciál \equiv nyugalmi potenciál

$$\varphi_e - \varphi_i = \frac{RT}{F} \ln \frac{[K^+]_i}{[K^+]_e}$$

$$\varphi_e - \varphi_i = \frac{RT}{F} \ln \frac{[K^+]_i}{[K^+]_e}$$

Ellenőrizzük!

Szövet	Nyugalmi potenciál (mV)	
	számított	mért
Tintahal óriásaxon	91	62
békaizom	103	92
patkányizom	92,9	92

A többi ionféséségre is kiszámítva az egyensúlyi potenciált

potenciál (mV)	tintahal óriásaxon	békaizom
$U_{\text{mért}}$	-62	-92
U_{0K^+}	-91	-103
U_{0Na^+}	+47	+46
U_{0Cl^-}	-56	-88



Nem kapunk jó egyezést

Finomítsuk:

Lehetséges magyarázatok - modell 2

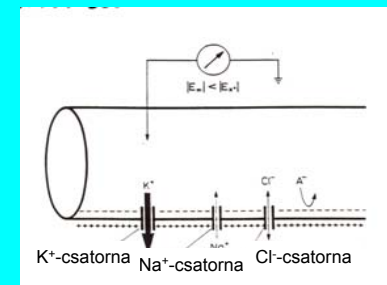
Tételezzük fel: nincs egyensúly



vagyis folyik transzport

Vegyük tekintetbe a membrán valós permeabilitását

a membrán nemcsak a K^+ -ra nézve átjárható,



de az egyes ionokra nézve a permeabilitás különböző lehet

az egyes ionok fluxusa $\neq 0$

az eredő fluxus = 0

Transzportmodell

az eredő fluxus = 0

$$\Sigma J = J_{K^+} + J_{Na^+} + J_{Cl^-} = 0$$

$$J_k = -D_k \left(\frac{\Delta c_k}{\Delta x} + c_k \frac{z_k F}{RT} \frac{\Delta \varphi}{\Delta x} \right)$$

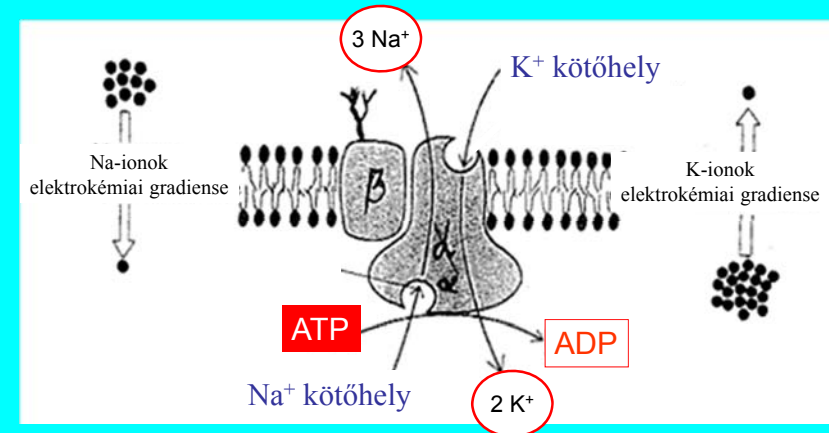
$$\varphi_e - \varphi_i = -\frac{RT}{F} \ln \frac{\Sigma p_k^+ c_{ke}^+ + \Sigma p_k^- c_{ki}^-}{\Sigma p_k^+ c_{ki}^+ + \Sigma p_k^- c_{ke}^-}$$

Goldman – Hodgkin – Katz egyenlet

Nátrium - kálium pumpa

antiporter

Ioneloszlás fenntartása aktív transzporttal

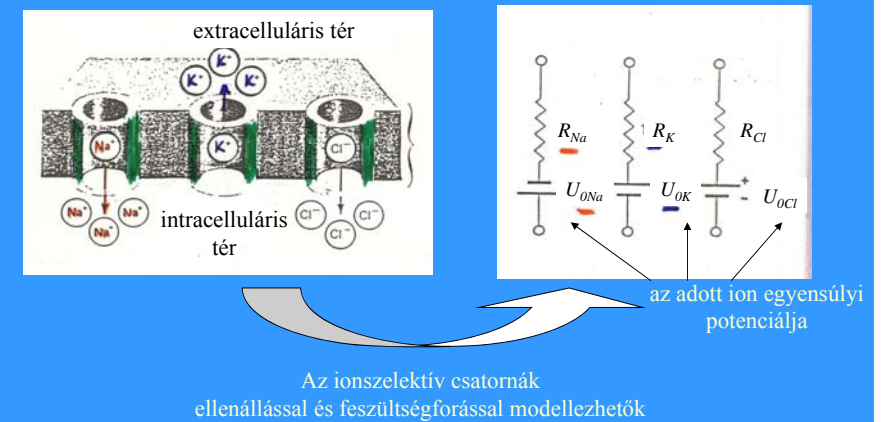


Sejtek energiafelhasználásának kb. harmada fordítódik erre

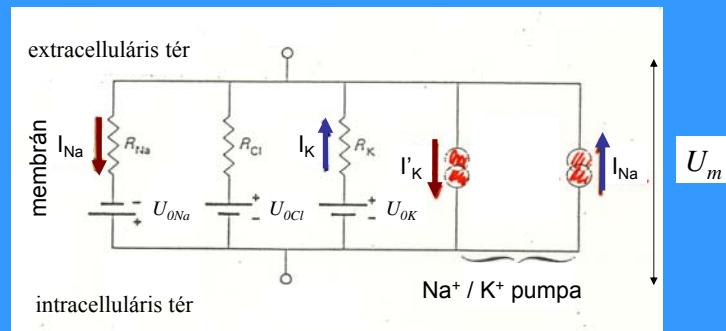
Ellenőrizzük!

	tintahal óriás axon	békaizom
$U_{mért}$	-62	-92
U_{GHK}	-61,3	-89,2
U_{0Na^+}	+47	+46
U_{0K^+}	-91	-103
U_{0Cl^-}	-56	-88

A sejtmembrán elektromos modellje



Az állandó ionkoncentráció fenntartásához szükséges
a Na^+ és K^+ pumpa működése



Ohm-törvény alapján:

$$I_j = 1/R_j(U_m - U_{0j})$$

A nyugalmi potenciál értelmezése az elektromos modell alapján

$$I_j = 1/R_j(U_m - U_{0j})$$

U_{0j} – Nernst egyenlet alapján számolható

Tudjuk, hogy

$$\Sigma I_j = I_{\text{ion}} = 0$$

$$\Sigma I_j = I_{\text{Na}} + I_{\text{K}} + I_{\text{Cl}} = 0$$

behelyettesítve:

$$g_{\text{K}}(U_m - U_{0\text{K}}) + g_{\text{Na}}(U_m - U_{0\text{Na}}) = 0$$

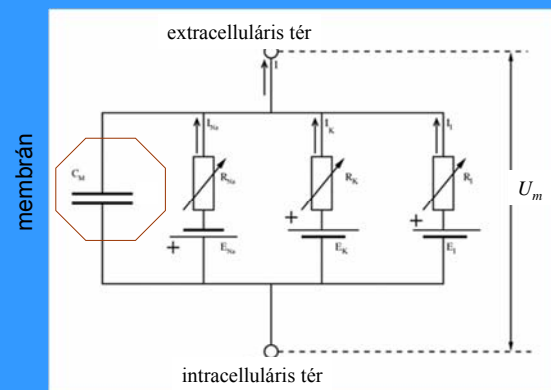
U_m -et kifejezve

$$U_m = \frac{(U_{0\text{K}} \cdot g_{\text{K}}) + (U_{0\text{Na}} \cdot g_{\text{Na}})}{g_{\text{K}} + g_{\text{Na}}}$$

Próbaszámítás:

$$U_m = \frac{(-100 \times 5) + (50 \times 1)}{5 + 1} = -75 \text{ [mV]}$$

A sejtmembrán kondenzátorként viselkedik



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

Kapacitása: $\sim 10^{-6} \text{ F/cm}^2 \rightarrow \sim 5000 \text{ pár töltés}/1\mu\text{m}^2$

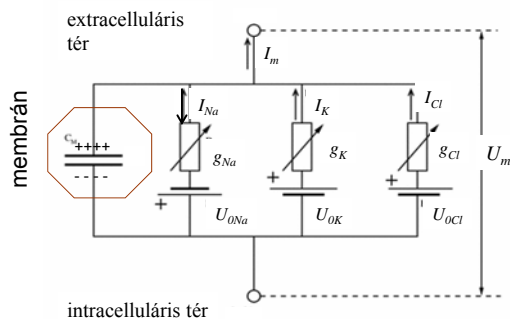
A sejtmembrán elektromos tulajdonságai

elektromotoros erő

ellenállás

kapacitás

A sejtmembrán elektromos modellje:



elektromotoros erő
vezetőképesség
kapacitás

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

Konduktív áram

Kapacitív áram

Változik, ha a csatorna
vezetőképessége potenciálfüggő

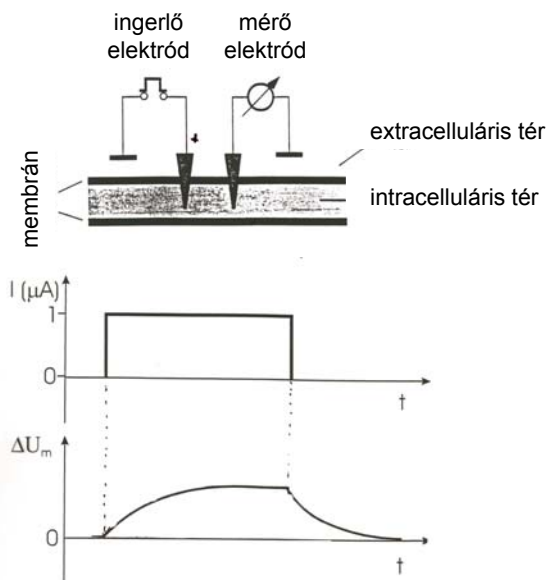
$$I_c = C_m \frac{\Delta U_m}{\Delta t}$$

A nyugalmi potenciál megváltozása

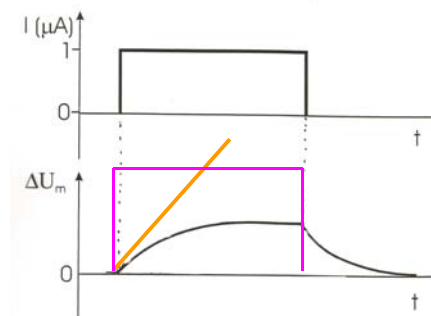
1. A membrán “passzív” elektromos tulajdonságai

Kísérlet

Áramirány :
pozitív töltések
áramlásának
iránya.



Miért éppen így?



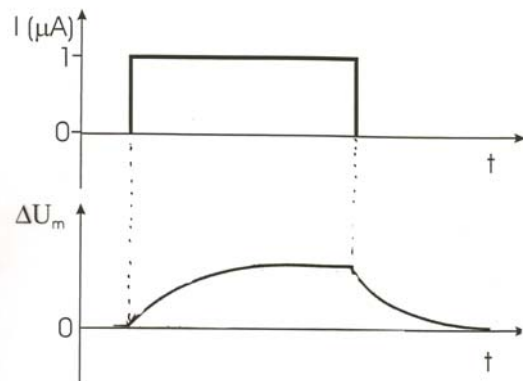
Nem így

Nem így

Miért éppen így?

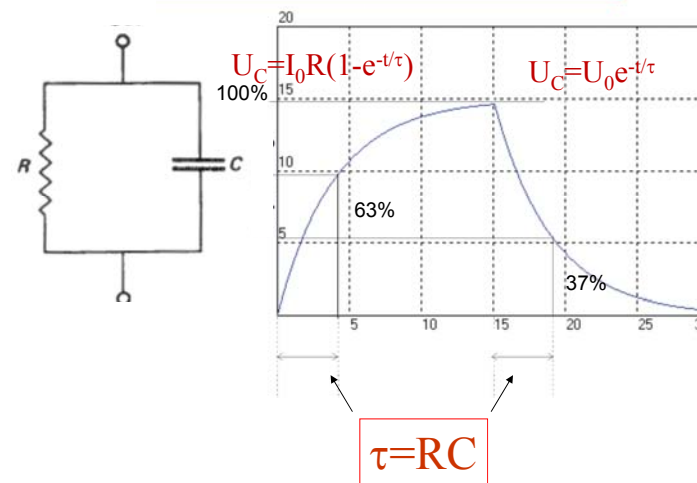
A membrán elektromos tulajdonságai miatt:

- ellenállás
- kapacitás

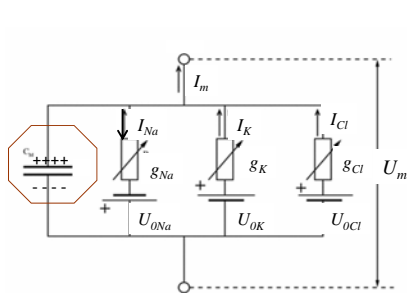


Hol is láttam már ehhez hasonlót?

Párhuzamos RC-kör töltése és kisütése



Összevetése az elektromos modellel:



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

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

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

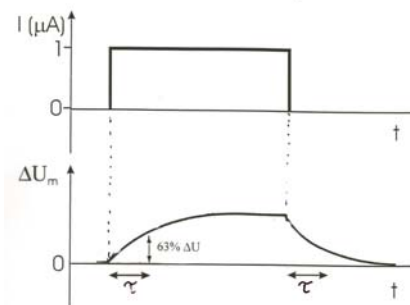
$$C_m \frac{\Delta U_m}{\Delta t} + \frac{\Delta U_m - U_0}{R_m} - I_{inger} = 0$$

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

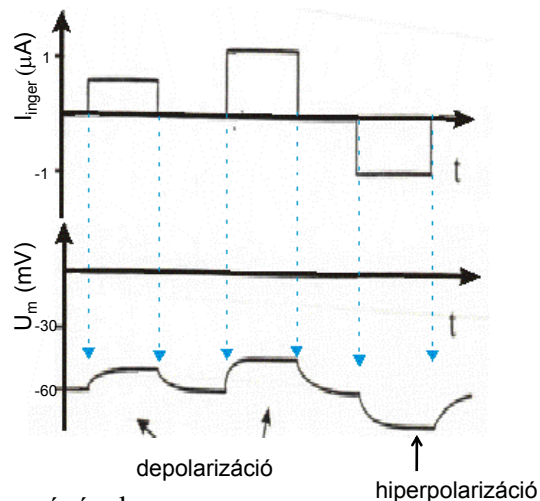
-eléri a telítési érték 63%-át vagy

-az ingerlés megszűnte után e-ed részére csökken

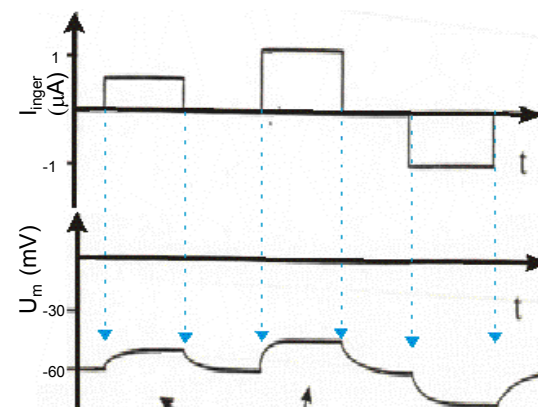
$$U_m(t) = U_t \left[1 - e^{-\frac{t}{R_m C_m}} \right]$$

U_t egyenesen arányos az ingerlő impulzus nagyságával

A változás meredeksége függ az ingerlő impulzus nagyságától



A nyugalmi potenciál helyi megváltozása

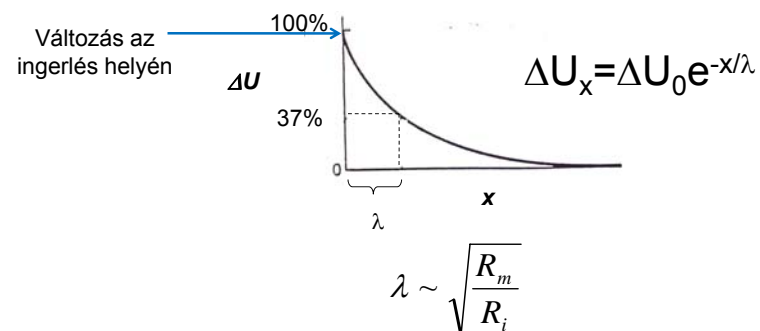
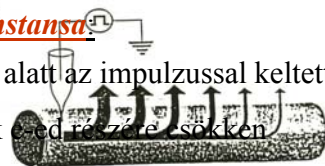


obligát
ugrásmentes
változtatható amplitúdójú
változtatható irányú
analóg
lokalizált

A nyugalmi potenciál helyi megváltozása az ingerlés helyétől távolodva

λ 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