


# Potenciálok

## Elektrokémiai egyensúly

2/14

- edény szemipermeábilis hártyával elválasztva
- KCl oldat, negatív ion nem tud átlépni 
- kvantitatív jellemzés: elektrokémiai potenciál

$$\mu = \mu^{\circ} + RT \ln c + zFE$$

- ha ez egyenlő a két oldalon, akkor egyensúly van

$$\Delta\mu = \mu_A - \mu_B = RT \ln(c_A/c_B) + zF(E_A - E_B) = 0$$

- átrendezve kapjuk a Nernst egyenletet:

$$E_A - E_B = -RT/zF * \ln(c_A/c_B)$$

- az "A" oldal felel meg a sejt belsejének: pozitív ion itt nagyobb koncentrációban: potenciál negatív
- mindig a sejt belsejét nézzük a kívülálgal szemben; az 0 potenciálon van

3/14

## Az egyensúlyi potenciál értéke

- ha  $z = 1$ ,  $T = 273,15 + 29,2$  K és áttérünk  $lg$ -re:

$$E_A - E_B = -60 \text{ mV} * \log(c_A/c_B)$$

- vagyis belső oldalon pl.  $K^+$  10-szeres koncentrációban - egyensúlyi (ekvilibrium) potenciál  $-60$  mV
- ionok mozgásai:
  - $|MP| = |\text{ekvilibrium potenciál}|$  - ion nem mozog
  - $|MP| > |\text{ekvilibrium potenciál}|$ , de azonos előjelű - elektromos gradiens szerint mozog
  - $|MP| < |\text{ekvilibrium potenciál}|$ , de azonos előjelű - kémiai gradiens szerint mozog
  - ellenkező előjelű: mindkettő egy irányban mozgatja

4/14

## Donnan egyensúly I.

- sejt belsejében semleges pH-n nem diffundáló nagy negatív ionok: fehérjék, polifoszfátok
- ezzel próbálták magyarázni a nyugalmi potenciált
- szemipermeábilis hártya, KY és KCl oldatok,  $0,1$  M koncentrációban
- $Y^-$  nem jut át a membránon,  $Cl^-$  bemegeg (koncentráció),  $K^+$  követi
- kicsivel több klorid ion;  $6000$  ion többlet  $1$  négyzetmikronon:  $-100$  mV (lásd később)
- egyensúly esetén elektrokémiai potenciál azonos, ezért

$$RT \ln(K_A/K_B) + F(E_A - E_B) = 0$$

$$RT \ln(Cl_A/Cl_B) - F(E_A - E_B) = 0$$

- összeadás és rendezés után:

$$K_A Cl_A = K_B Cl_B$$

## Donnan egyensúly II.

5/14

- ha 0,1 M-ból indultunk ki, és az átlépő ionok  $x$  mól változást idéztek elő az A és B oldalon, akkor

$$K_A = 0,1+x; \quad Cl_A = x; \quad K_B = Cl_B = 0,1-x$$

- ezt behelyettesítve a diffúzibilis ionokra vonatkozó egyenletbe:
- $(0,1+x)*x = (0,1-x)*(0,1-x)$  amiből
- $0,1x+x^2 = 0,01-0,2x+x^2$  és
- $x = 0,01/0,3 = 0,033$
- vagyis:
- $K_A = 0,133; \quad Cl_A = 0,033; \quad K_B = Cl_B = 0,066$
- ezt beírva pl. a K-ra felírt Nernst egyenletbe :

$$E_A - E_B = -60 \text{ mV} * \log(0,133/0,066) = -60 \text{ mV} * 0,3010 = -18 \text{ mV}$$

## Donnan egyensúly III.

6/14

- nem igazi sejtre számoltunk, de a koncentrációk nagyságrendje helytálló volt
- ozmótikusan viszont nincs egyensúly, mert az Y iont is figyelembe kell venni ebből a szempontból
- $K_A = 0,133; \quad Y_A = 0,1; \quad Cl_A = 0,033$
- $K_B = 0,066; \quad Y_B = 0,0; \quad Cl_B = 0,066$

- az ozmózisnyomás különbsége a részecskék számának különbségéből számolható

$$\begin{aligned} \Delta\pi &= RT * (\Delta[K] + \Delta[Y] + \Delta[Cl]) = \\ &RT * (0,067 + 0,1 - 0,033) = \\ &24 * 0,133.. = \underline{3,2 \text{ atm !!!!}} \end{aligned}$$

- ez 32 méter magas vízoszlop nyomásának felel meg, ami állati sejt esetében elképzelhetetlen
- figyelmen kívül hagytuk viszont, hogy a sejten belül az Y-nak megfelelő ionok többértékűek, a részecskeszám különbség így kisebb
- az Y iont kihagyva is 0,8 atm a különbség, ezért pumpál a Na-K pumpa 3:2 arányban

## Nyugalmi potenciál I.

7/14

- régen a Donnan egyensúllyal magyarázták az ún. "sértési potenciált"
- pontosabb mérési lehetőség: -60 és -90 mV közt
- okok: Donnan egyensúly, K/Na-pumpa, szelektív permeabilitás, egyenlőtlen ioneloszlás
- Donnan egyensúly esetén cseréljük le Na<sup>+</sup> felét K<sup>+</sup>-ra, majd indítsuk be a pumpát 1:1 arányban - a potenciál nem változik
- csökkentjük le a Na<sup>+</sup> konduktanciáját: Na<sup>+</sup> nehezen szivárog vissza, K<sup>+</sup> ki tud szökni - negatív membránpotenciál

$$I_{Na} = g_{Na}(V_m - E_{Na}) \quad \text{és}$$

$$I_K = g_K(V_m - E_K)$$

- ha a pompa 1:1 arányban dolgozik: akkor a spontán áramok is egyenlőek, bár ellenkező irányúak

$$g_{Na}(V_m - E_{Na}) = -g_K(V_m - E_K)$$

## Nyugalmi potenciál II.

8/14

- $g_K : g_{Na} : g_{Cl} = 1 : 0,05 : 0,45$   
nyugalomban
- a membránpotenciál közel kell, hogy legyen a K<sup>+</sup> ekvilibrium potenciáljához: K<sup>+</sup>-potenciál
- hipo-, hiper-, de-, és repolarizáció fogalma
- áramok viszonyából minden levezethető:
  - külső K<sup>+</sup> növekedése
    - hipopolarizáció ("tökéletes gyilkosság")
  - K<sup>+</sup> konduktancia növekedése
    - hiperpolarizáció (GABA, ACh)
  - K<sup>+</sup> konduktancia csökkenése
    - hipopolarizáció (ACh)
  - Na<sup>+</sup> konduktancia növekedése
    - hipopolarizáció (ACh, glutamát)
  - pompa 3:2 arányú működése
    - hiperpolarizáció (elektrogén pompa)

9/14




## A GHK egyenlet

- nem vettük figyelembe a  $\text{Cl}^-$  iont
- problematikus: egyensúly, vagy gradiens befelé
- ha van gradiens, kell pumpa is - valószínűleg így is van
- minden ion szerepét figyelembe veszi a Goldman - Hodgkin -Katz egyenlet
- nem igazán egzakt levezetésen alapul, de jól egyezik a valósággal

$$V_m = \frac{RT}{F} \ln \left( \frac{p_K K_o + p_{Na} Na_o + p_{Cl} Cl_i}{p_K K_i + p_{Na} Na_i + p_{Cl} Cl_o} \right)$$


10/14

## Akciós potenciál (AP)

- a vázolt összefüggések nyugalomban érvényesek - MP változással csatornák is változnak
- ingerület hatására gyors potenciálváltozás, ami végigfut - a kalmáron axonján vizsgálták először
- négyszögimpulzussal ingerlünk elektrotónusos (passzív) majd helyi (aktív) válasz, végül a küszöb elérésekor akciós potenciál 
- membrán kapacitása  $1 \mu\text{F}/\text{cm}^2$  - először át kell polarizálni a kondenzátort
 
$$V_t = V_{max} * (1 - e^{-t/RC}) \quad V_t = V_{max} * e^{-t/RC}$$
- térállandó ( $\lambda$ ) és időállandó ( $\tau$ ):  $1/e$ -re csökken a jel (kb. 37%) , 
- emlős ideg-, és izomsejten 1-3 mm a térállandó, vékony nyúlványokon lényegesen kisebb

11/14

## Az AP mechanizmusa

- feszültségzár (voltage-clamp) vizsgálatok alapján
- hipopolarizáció - feszültségfüggő Na-csatornák
- Na<sup>+</sup> belép (6000 ion 1 μ<sup>2</sup>-on - 100 mV) - további hipopolarizáció - láncreakció alakulhat ki
- Na<sup>+</sup>-konduktancia 400-szorosára nő, de gyors inaktiváció
- K<sup>+</sup> kilép (szivárgási + késleltetett csatorna) - repolarizáció, sőt utóhiperpolarizáció 
- amplitúdót ekvilibrum potenciálok határolják
- ingerlés erősségével a frekvencia arányos
- abszolút és relatív refrakter - max. 1 kHz
- energiaigény, és a koncentrációk változása igen kicsi - kalmár axonban pumpa ouabainnal bénítva - még 10.000 kisülés
- helyi érzéstelenítők (kokain származékok) - gyors Na<sup>+</sup> csatorna bénítása

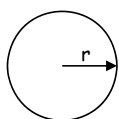
12/14

## Ionmozgások AP alatt I.

- a sejtmembrán kondenzátornak tekinthető, fajlagos kapacitása  $C = 1 \mu\text{F}/\text{cm}^2 = 10^{-14} \text{ F}/\mu^2$
- a kondenzátorokra érvényes, hogy  $Q = U \cdot C$ , ahol Q a töltésszám (Coulomb), U a feszültség, C=kapacitás (Farad)
- 100mV membránpotenciál változáshoz tehát:  $Q = 10^{-1} \cdot 10^{-14} = 10^{-15} \text{ C}$  töltés átlépésére van szükség 1 μ<sup>2</sup>-on
- 1 mólnyi ion,  $6 \cdot 10^{23}$  db (Avogadro szám) töltése 96500 C (Faraday állandó)
- $6 \cdot 10^{23} : 96500 = x : 10^{-15}$ , amiből
- $6 \cdot 10^{23} \cdot 10^{-15} / 96500 = 6 / 0,965 \cdot 10^3 \approx 6000$  ion átlépése kell 1 μ<sup>2</sup>-on, 100 mV membránpotenciál változáshoz

## Ionmozgások AP alatt II.




13/14

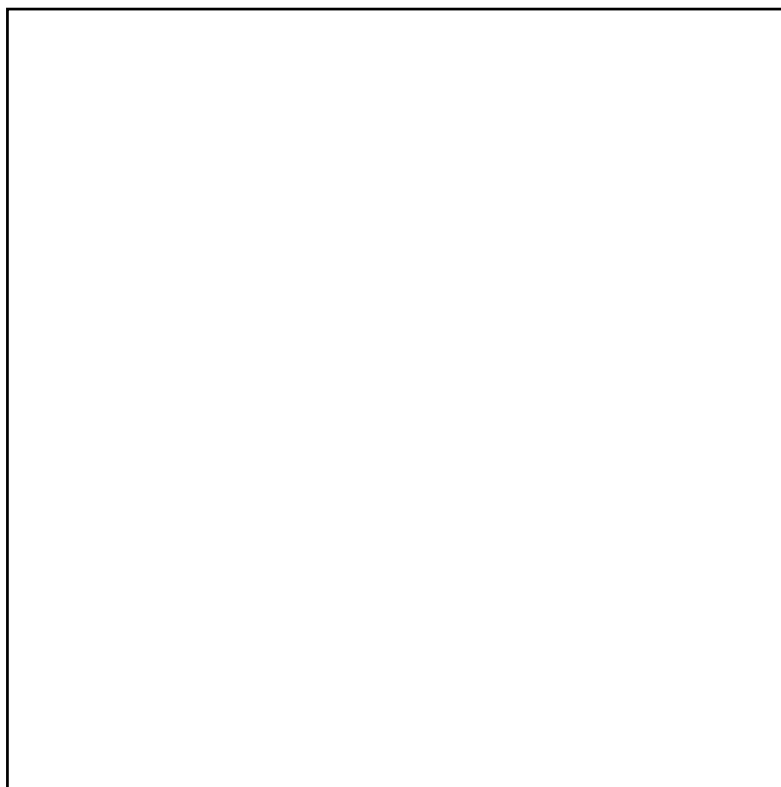


- ha  $r=10\mu$
- $F= 4r^2\pi \approx 1200\mu^2$
- $V= 4r^3\pi/3 \approx 4000\mu^3$
- mivel a sejt felülete  $1200\mu^2$ , az egész sejtbe  $6000 \cdot 1200 = 7,2 \cdot 10^6$   $\text{Na}^+$ -ion lép be 100 mV membránpotenciál változáskor
- a sejt belsejében a  $\text{Na}^+$ -ion koncentráció 10mM, vagyis  $10^{-2} \cdot 6 \cdot 10^{23} \cdot 4 \cdot 10^{-12} = 2,4 \cdot 10^{10}$  darab  $\text{Na}^+$  ion van
- a  $\text{Na}^+$ -ion koncentráció változása tehát:
- $7,2 \cdot 10^6 / 2,4 \cdot 10^{10} \cdot 100 = 3 \cdot 10^{-2}$ , vagyis 0,03%
- ez elhanyagolható a membránpotenciál értéke szempontjából
- a neuronok és gliasejtek közötti intersticiális tér azonban sokkal kisebb, és a kilépő K-ionok nagyobb hatást váltanak ki - glia sejtek szerepe

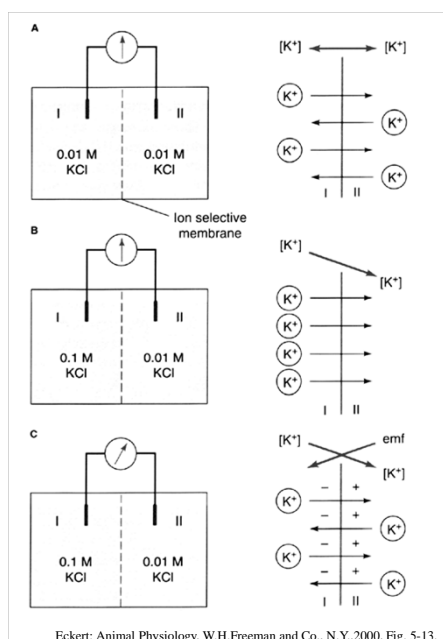
## Az akciós potenciál terjedése

14/14

- AP hatására helyi áramkörök
- szomszédos területen is AP alakul ki
- változatlan amplitúdóval tovaterjed (nem dekremenssel), minden-vagy-semmi
- a vezetési sebesség a keresztmetszettel nő
- velőshüvely - óriási sebességnövekedés
- Schwann sejt a periférián, oligodendroglia a központban - mielin-hüvely 
- szaltatórikus vezetés - AP regeneráció csak a befűződéseknél  
- internódium vezetékként viselkedik
- kalmár:  $500 \mu$  átmérő, 25 m/s sebesség
- ember: átl.  $10 \mu$  átmérő, 0,5 m/s sebesség lenne, de helyett 50 m/s
- 3 mm helyett 30 cm vastag idegek kellenének!

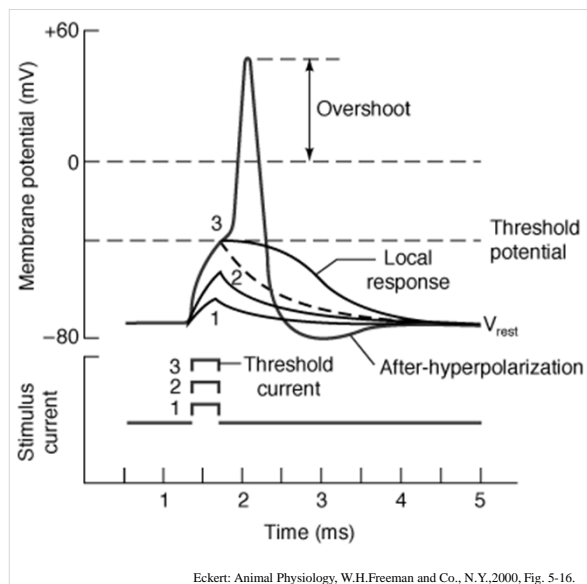


## Elektromos és kémiai gradiens

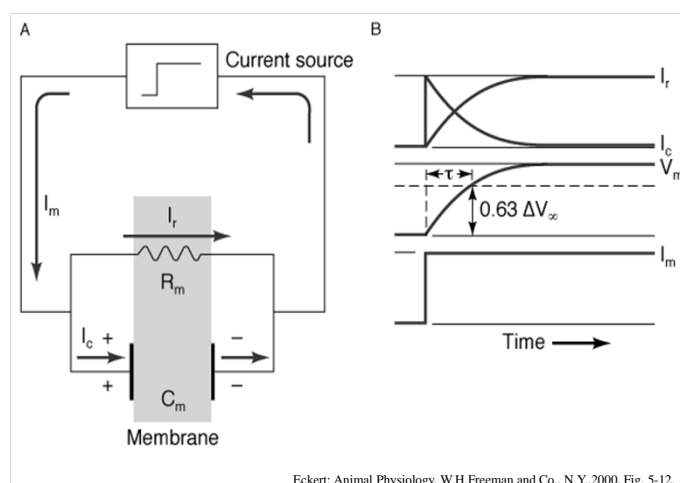




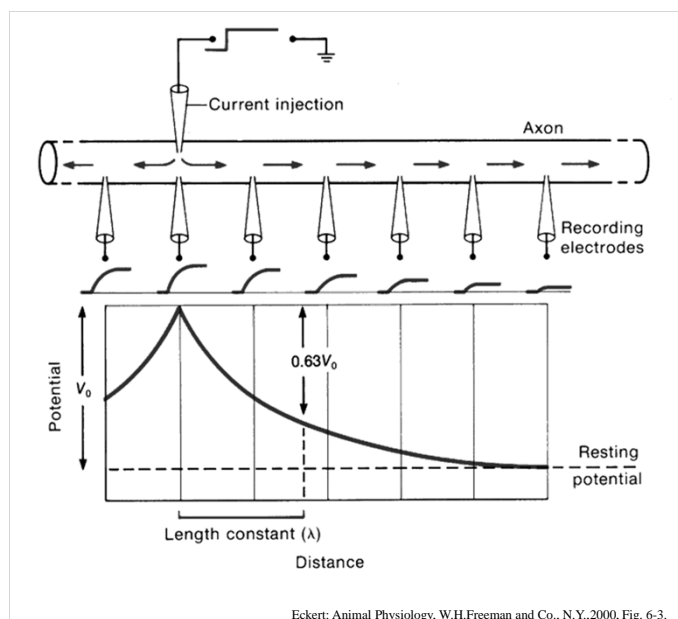
## Az akciós potenciál kialakulása



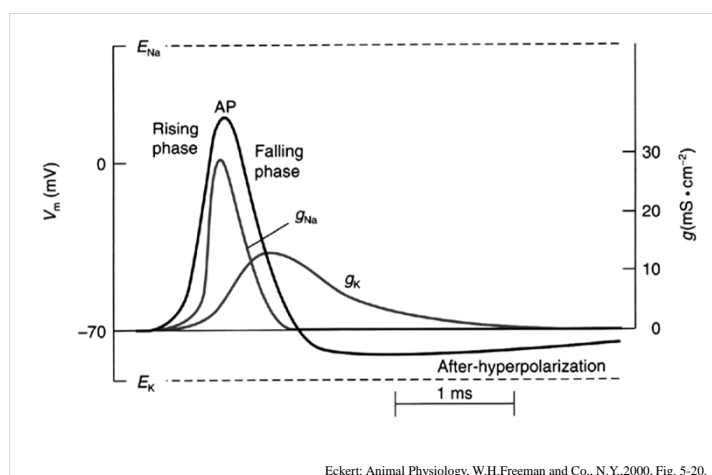
## Passzív elektromos tulajdonságok



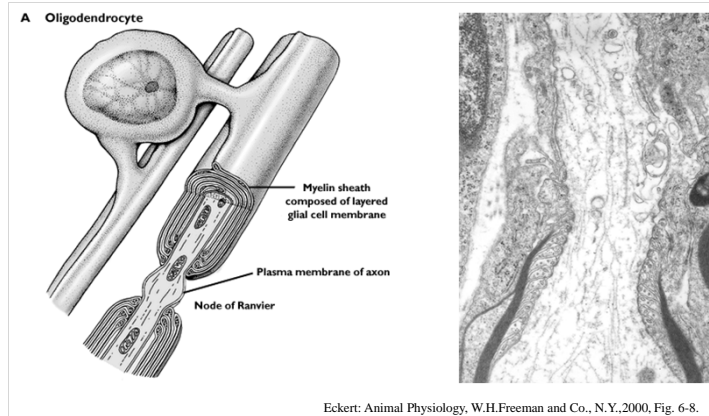
## Elektrotónusos terjedés axonon



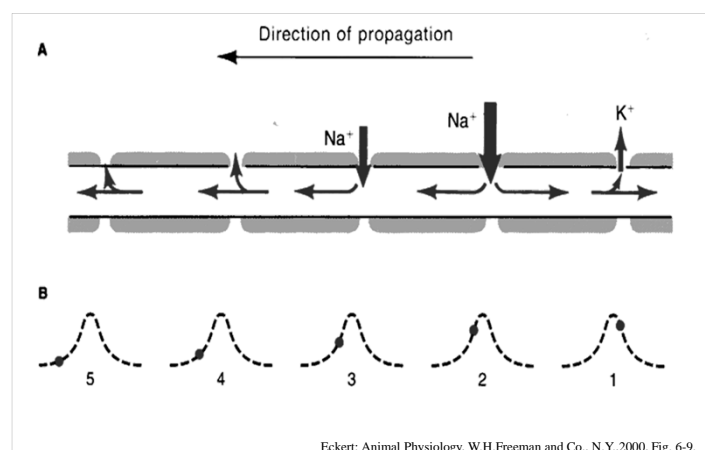
## Konduktancia változások AP alatt



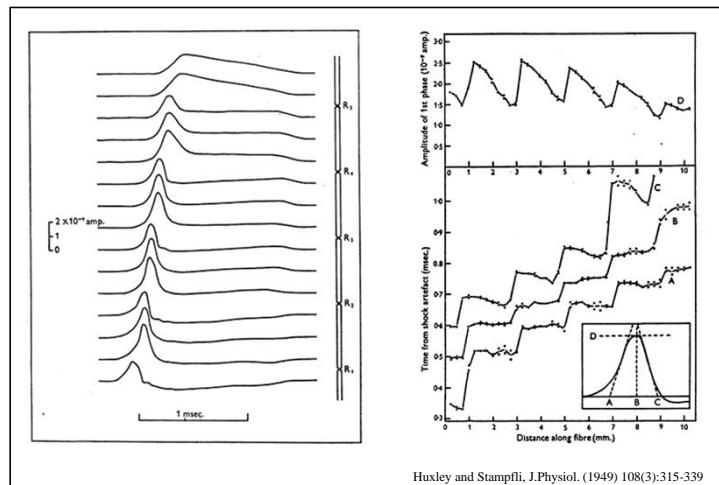
## Velőshüvely a KIR-ben



## Szaltatórikus vezetés I.



## Szaltatórikus vezetés II.



Bal: mielinizált béka idegen terjedő akciós potenciál az internódiumok különböző pontjain regisztrálva

Jobb: a felszálló szár (A), a csúcs (B) és a leszálló szár (C) megjelenésének időpontja az axon mentén (a jelölést lásd a beszűrt ábrán. (D) a csúcs amplitúdója az axon mentén