

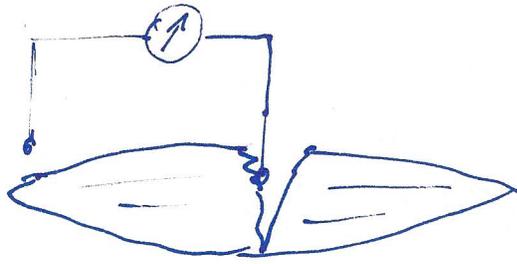
# FORZE FONDAMENTALI

- GRAVITÀ
  - ELETTROMAGNETICHE
  - NUCLEARE FORTE
  - NUCLEARE DEBOLE
- } = 0 per  $d > 10^{-13}$  cm

F DERIVATE = VISCOSITÀ, ATRITO, TENSIONE SUP, ecc.  
DERIVANO DALLE ELETTROSTATICHE

A LIVELLO CELLULARE, CONTANO SOLO LE F ELETTROSTATICHE

$$\frac{F_G}{F_{EL}} \approx 10^{-36}$$



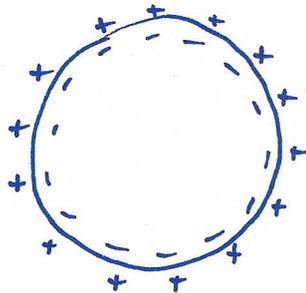
V di SEPARAZIONE

ΜΙCΡΟΕΛΕCΤΤΡΟΔΙ

$$V_m = V_i - V_o \quad V_o = 0 \text{ (a terra)}$$

-65/-85 cell. eccitabili, glia, cerv. acq. L

-40 mV non eccitabili p. es. epatocesti



Electroneutralità globale

$$Q = CV$$

$$C \approx 1 \mu\text{F}/\text{cm}^2$$

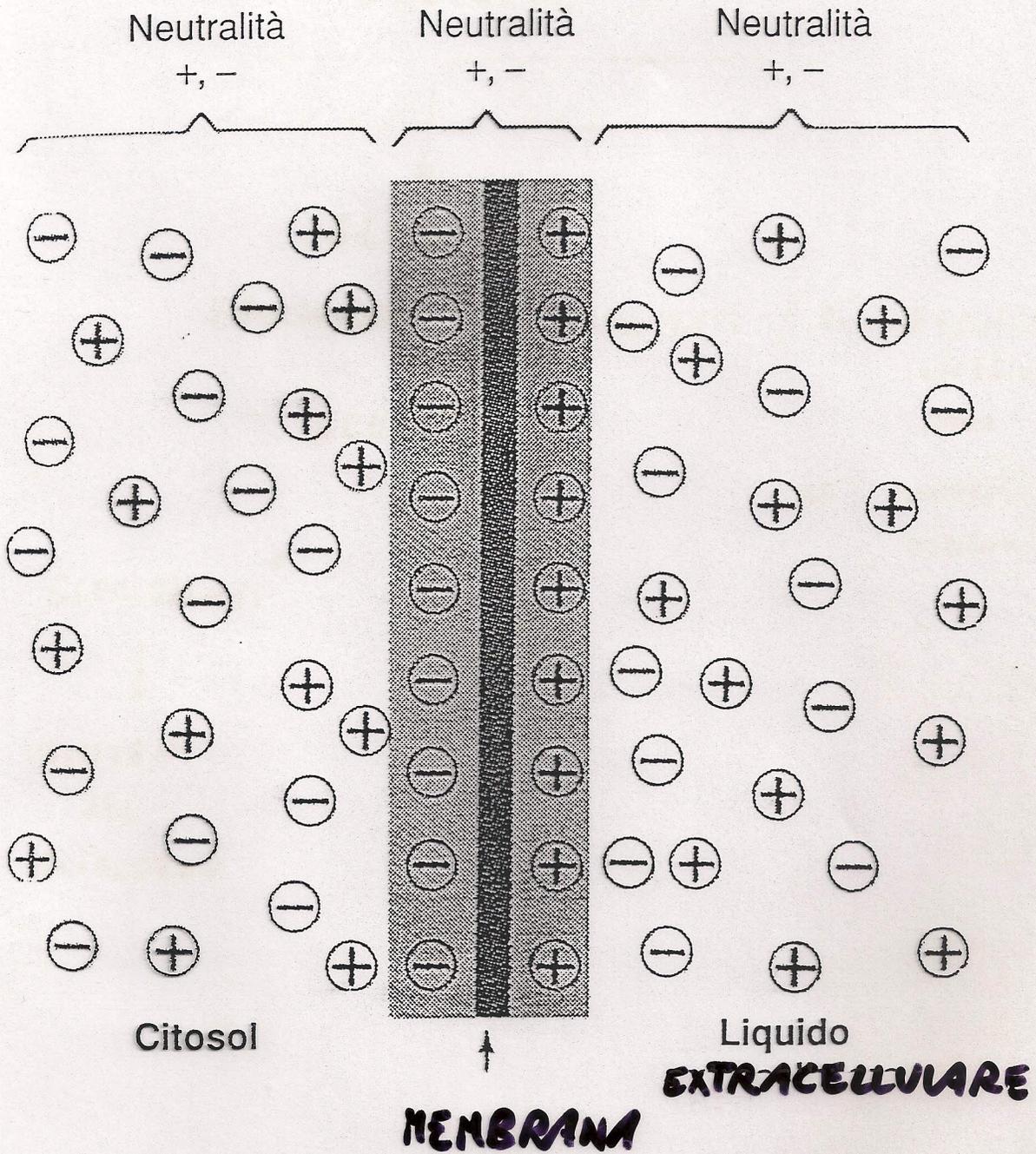
$$\left( V = \frac{J}{\text{Coul}} \right) \quad F = \frac{\text{Coul}}{\text{Volt}}$$

IPOTESI DI BERNSTEIN

$V_m$  sensibile a  $K^+$  ma non a  $Na^+$

$$V_m \approx E_K$$

Da: Randall et al., FISILOGIA ANIMALE, II ED., ZANICHELLI



$\frac{1}{10'000'000}$

### Calcolo della separazione di cariche ai capi della membrana.

Quanti ioni  $K^+$  (che lasciano altrettanti  ~~$Cl^-$~~ ) si muovono da un compartimento all'altro per generare  $E_k$ ?

$$Q = CV$$

C del doppio strato lipidico  $\approx 1 \mu F \text{ cm}^{-2}$ .

$$V = V_m = E_k = -100 \text{ mV}$$

Per  $1 \text{ cm}^2$  di membrana:

$$Q = (10^{-6} \text{ farad cm}^{-2})(10^{-1} \text{ V}) = 10^{-7} \text{ C cm}^{-2}$$

$$F = 96500 \text{ C mol}^{-1}.$$

Quante moli di  $K^+$  sono?

$$\frac{10^{-7} \text{ C} \cdot \text{cm}^{-2}}{10^{+5} \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}} = 10^{-12} \text{ mol K}^+ \text{ cm}^{-2}.$$

Quanti ioni sono?

$$(10^{-12} \text{ mol K}^+) (6 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}) = 6 \cdot 10^{10} \text{ K}^+ \text{ cm}^{-2}$$

In un  $\text{cm}^3$  di soluzione di KCl 100 mM ci sono circa  $6 \cdot 10^{19}$  ioni  $K^+$ , quindi il rapporto tra il numero di ioni necessari a caricare la capacità della membrana ed il numero di ioni in un volume di soluzione corrispondente è dell'ordine di  $10^{-9}$ .

## IPOTESI DI BERNSTEIN

$V_m$  SENSIBILE A  $[K^+]_o$ , ma non a  $[Na^+]_o$

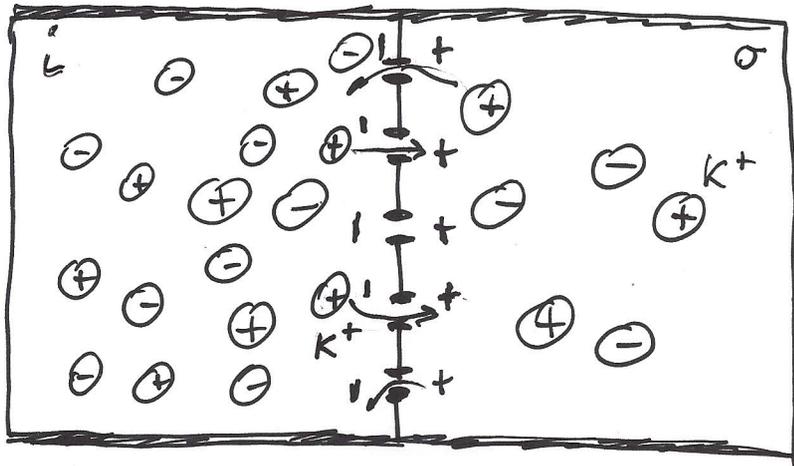
$$V_R \approx E_K$$

( $V_R =$  POTENZIALE ( $V_m$ ) DI RIPOSO)



Membrana come "ELETTRODO AL POTASSIO"

# POTENZIALE DI EQUILIBRIO (NERNST) PER UNO IONE $i$



"CELLE DI CONCENTRAZIONE"

$$V_m = V_i - V_o (=0)$$

ALL'EQUILIBRIO IL FLUSSO DI  $K^+$  VERSO DESTRA ( $\Delta C$ ) È UGUALE A QUELLO VERSO SINISTRA ( $\Delta V$ ).

$\Delta G$  / flusso  $o \rightarrow i$

$\Delta G$  / flusso  $i \rightarrow o$

$$zF V_m = RT \ln \frac{[K^+]_o}{[K^+]_i} \quad (\text{per mole})$$

$$V_m = V_{EQ} = E_K = \frac{RT}{zF} \ln \frac{[K^+]_o}{[K^+]_i}$$

$E_K = \frac{RT}{zF} \ln \frac{[K^+]_o}{[K^+]_i}$

COST. del GAS ( $8.31 \frac{J}{K \cdot mol}$ )  $\rightarrow$   $37^\circ C \approx 310 K$

VALENZA (per  $K^+$ ,  $z=1$ )  $\rightarrow$  costante di Faraday  $\downarrow$   $\approx 100'000 \frac{C}{mole}$

$E_K = \left( \frac{RT}{zF} \cdot 2.303 \right) \log \frac{[K^+]_o}{[K^+]_i}$

$\approx 61.5 \log \frac{[4]}{[130]} = -92 mV$

$E_K = 61.5 \log [K^+]_o - 61.5 \log [K^+]_i$

$y = m x - q$

	Extracellulare (mM)	Intracellulare (mM)	Potenziale di Nernst (mV)
Mammiferi	(plasma umano)	(musc. schel. umano)	
Na <sup>+</sup>	142	10	+67
K <sup>+</sup>	4	156	-92
Ca <sup>2+</sup>	5 †	<10 <sup>-5</sup>	> +120
Cl <sup>-</sup>	104	2	N-100
Anfibi <sup>1</sup>	(plasma rana)	(musc. sartorio rana)	
Na <sup>+</sup>	109	10	+59
K <sup>+</sup>	2.25	124	-101
Ca <sup>2+</sup>	2.1	<10 <sup>-5</sup>	> +120
Cl <sup>-</sup>	77.5	1.5	-99
Molluschi <sup>2</sup>	(sangue calamaro)	(assone di calamaro)	
Na <sup>+</sup>	440	50	+55
K <sup>+</sup>	20	400	-75
Ca <sup>2+</sup>	10	<10 <sup>-5</sup>	> +120
Cl <sup>-</sup>	560	108	-41

<sup>1</sup> Da Conway (1957)

<sup>2</sup> Da Hodgkin (1958)

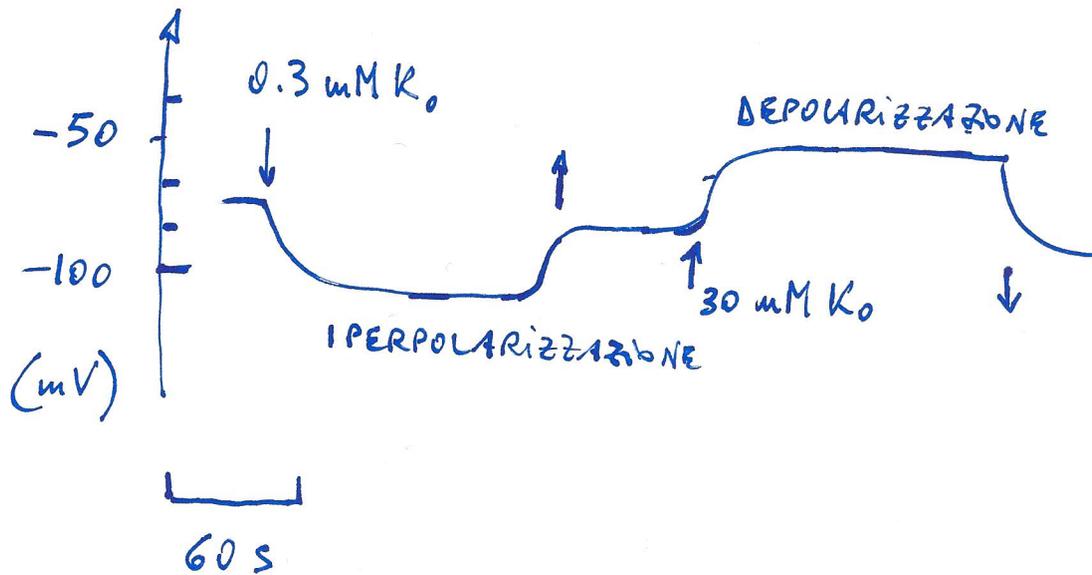
† 1-2 mM conc Ca<sup>2+</sup> libero

E<sub>K</sub> molto negativo

E<sub>Na</sub> (p. es. specie umana) = 61.5 mV  
 ~ +50 / +70 mV

E<sub>Ca</sub> molto positivo

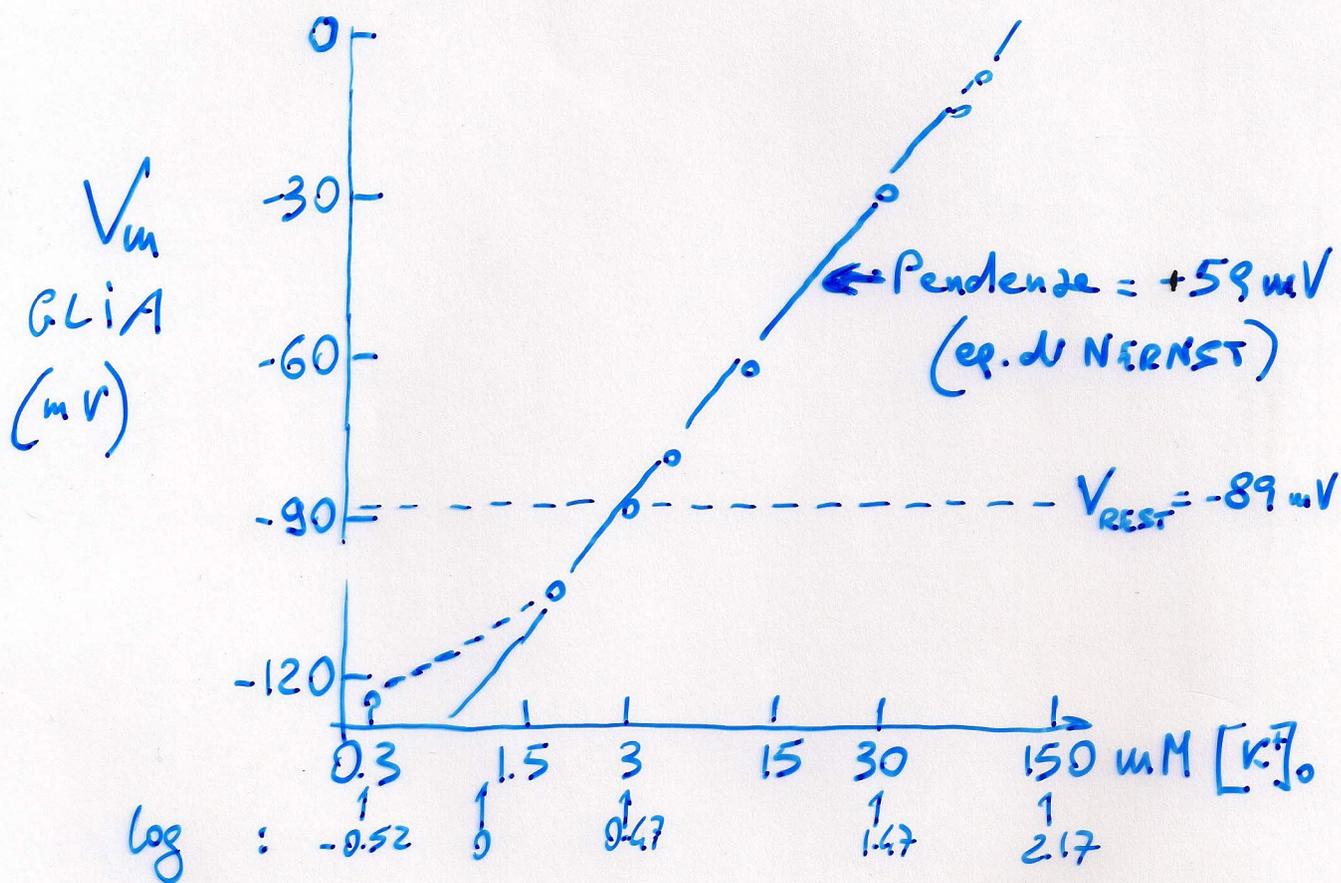
Cellule gliali di Necturus (NERVO OTTICO)



Kuffler et al. J. Neurophysiol. 1966

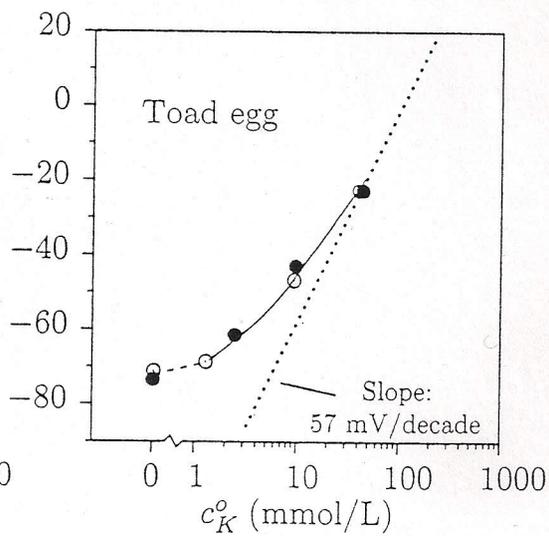
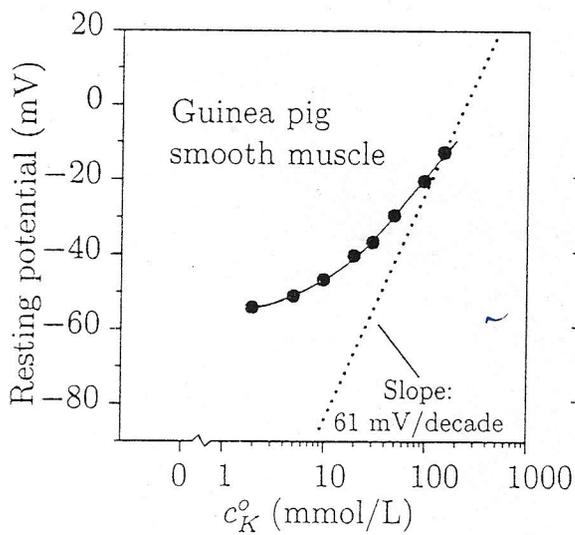
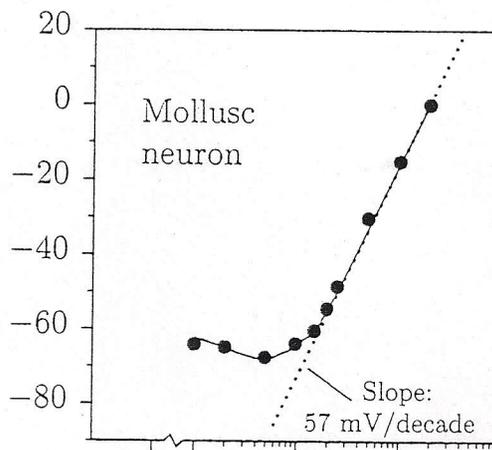
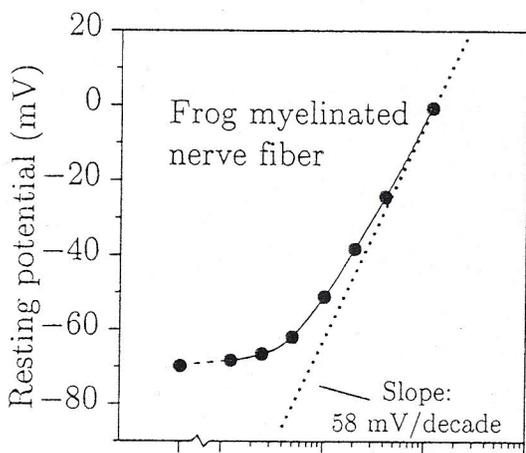
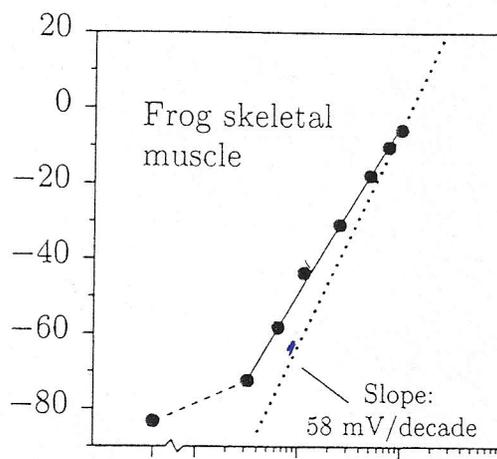
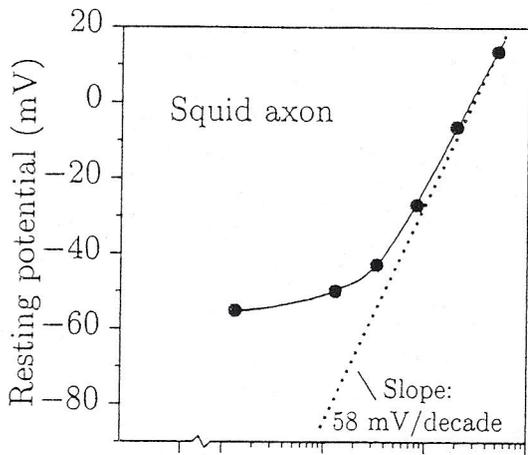
$$V_m = E_K = 58 \log [K^+]_o - 58 \log [K^+]_i$$

MISURE IN CELLULA GLIACA di Necturus (NERVO OPTICO)  
a diverse conc. extracellulari di  $K^+$



da: Kuffler, Nicholls, Orskov.

J Neurophysiology 29: 768-787, 1966



De: WEISS T. MIT PRESS 1996

CELLULAR BIOPHYSICS