

## La comunicazione rapida:

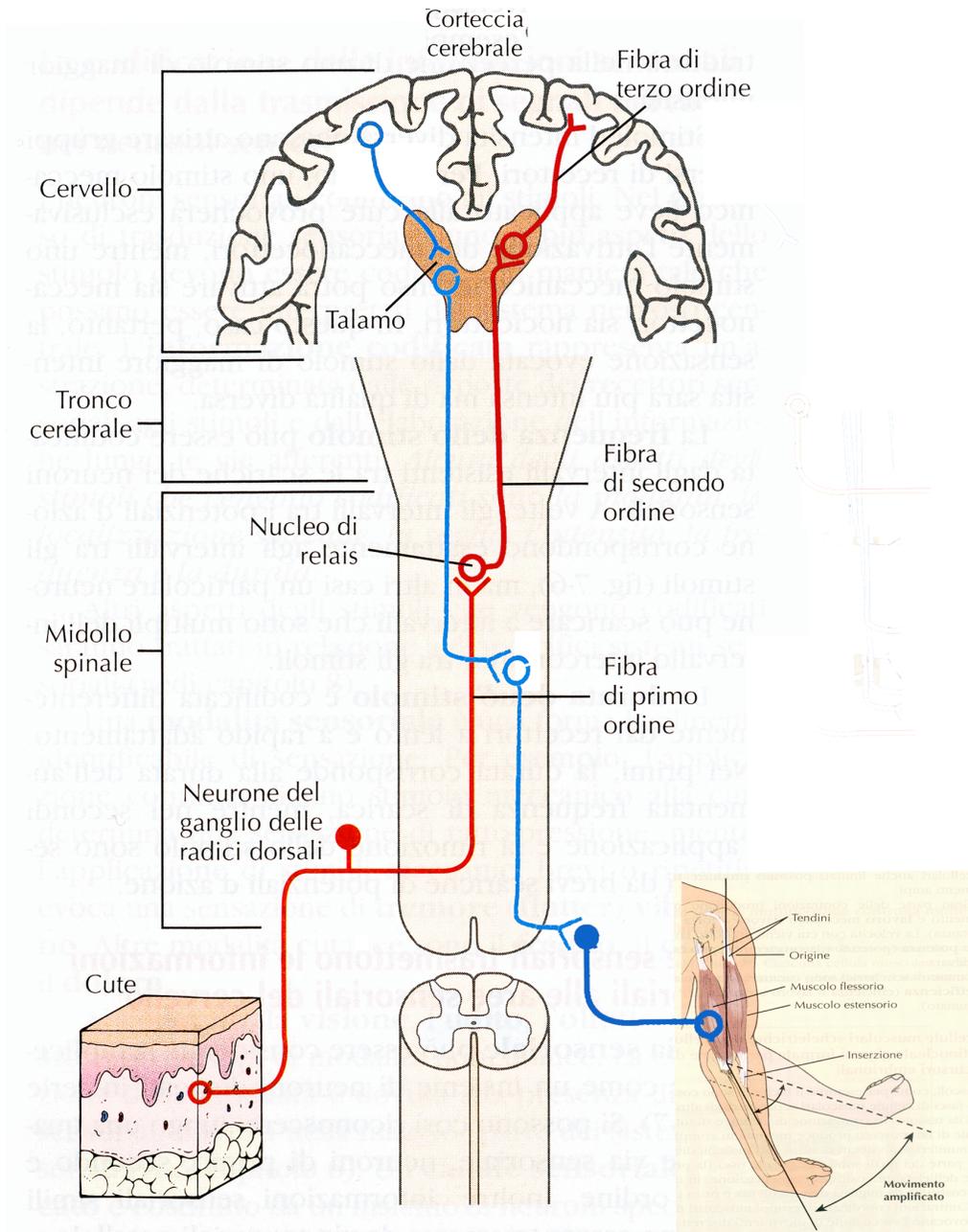
### le vie nervose

- afferenti
- efferenti

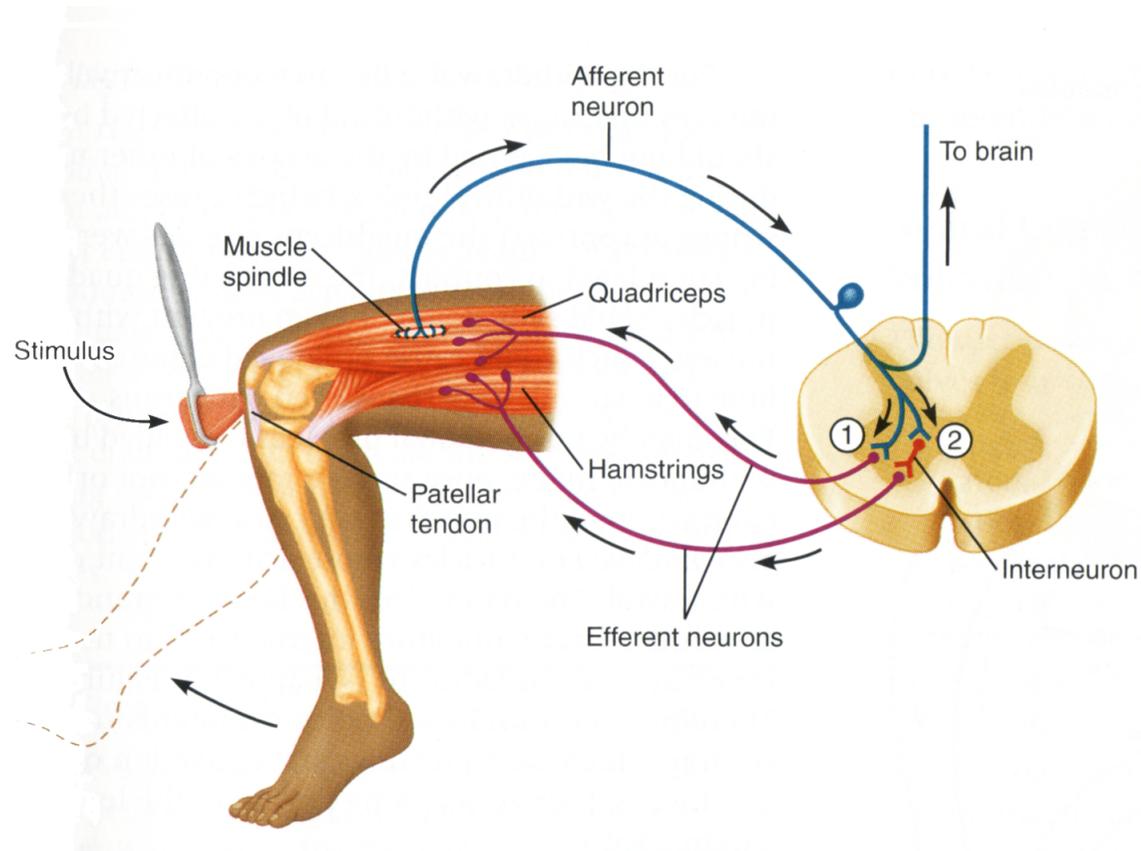
### il centro integratore

#### Sistema Nervoso Centrale (SNC)

- cervello  
(comportamenti complessi)
- midollo spinale  
(comportamenti stereotipati)



# Il riflesso da stiramento



**FIGURE 8.18 The muscle spindle stretch reflex.** The knee jerk reflex, an example of the monosynaptic muscle spindle stretch reflex, by which a tap on the patellar tendon causes contraction of the quadriceps muscle. Muscle spindle afferent neurons make two synaptic communications in the spinal cord: (1) excitatory synapses with efferent neurons to the quadriceps muscle, and (2) inhibitory synapses with interneurons that communicate with efferent neurons to the hamstring muscles in the same leg. The afferent neurons also have collaterals that travel in the white matter of the spinal cord to the brainstem, where they form synapses with interneurons that transmit information about muscle length to various areas of the brain.

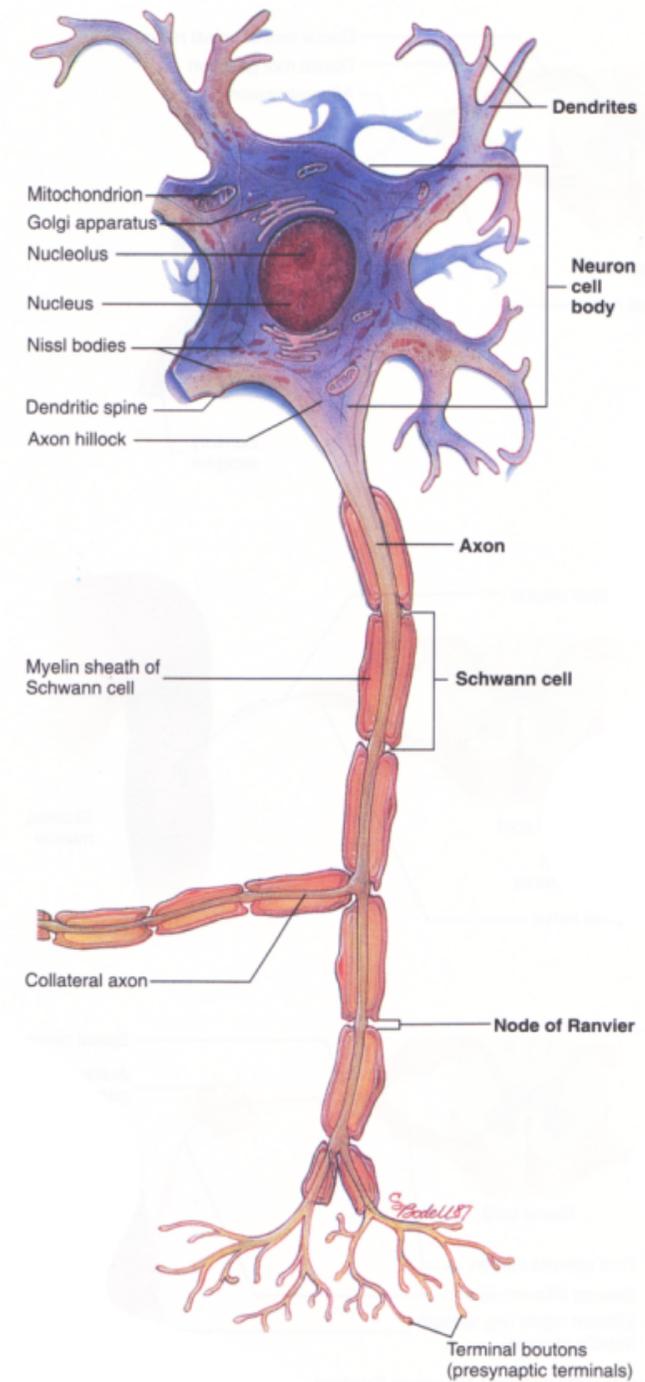
Tempo di latenza ~ 3.5 ms

Le cellule “chiave”:

**i neuroni**

I messaggi “chiave”:

**i segnali elettrici**



# La membrana cellulare

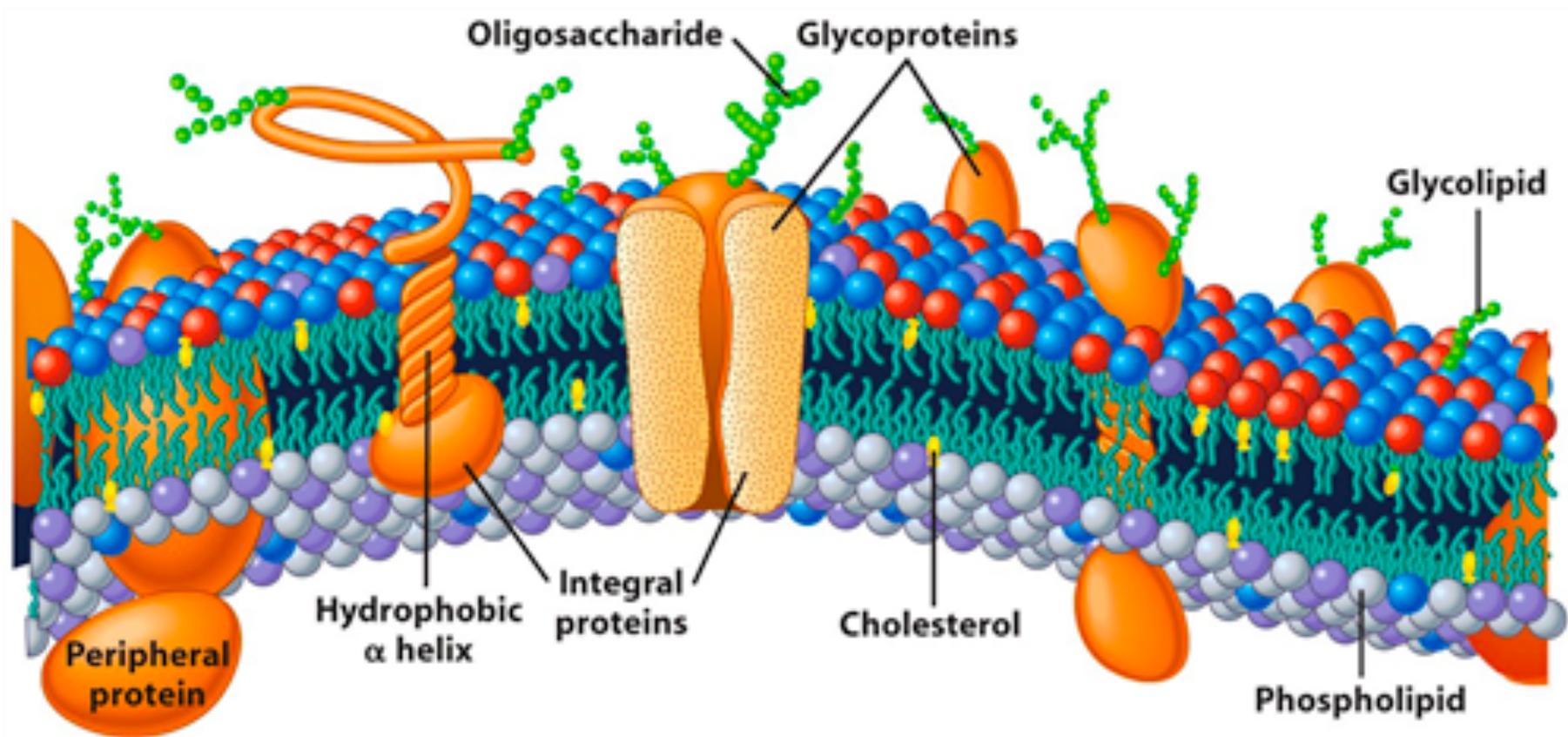


Figure 4-4c Cell and Molecular Biology, 5/e (© 2008 John Wiley & Sons)

**I segnali elettrici sfruttano  
le proprietà elettriche di membrana**

**i canali ionici**

**il potenziale di membrana**

## I trasporti attraverso la membrana cellulare

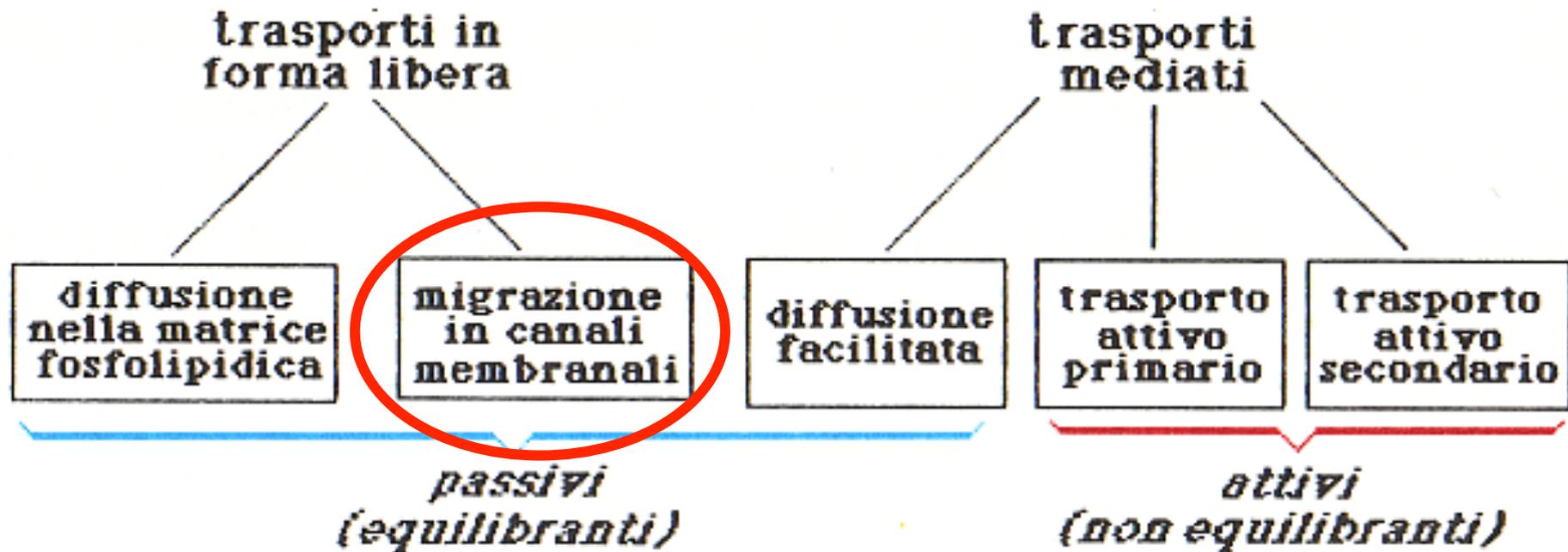
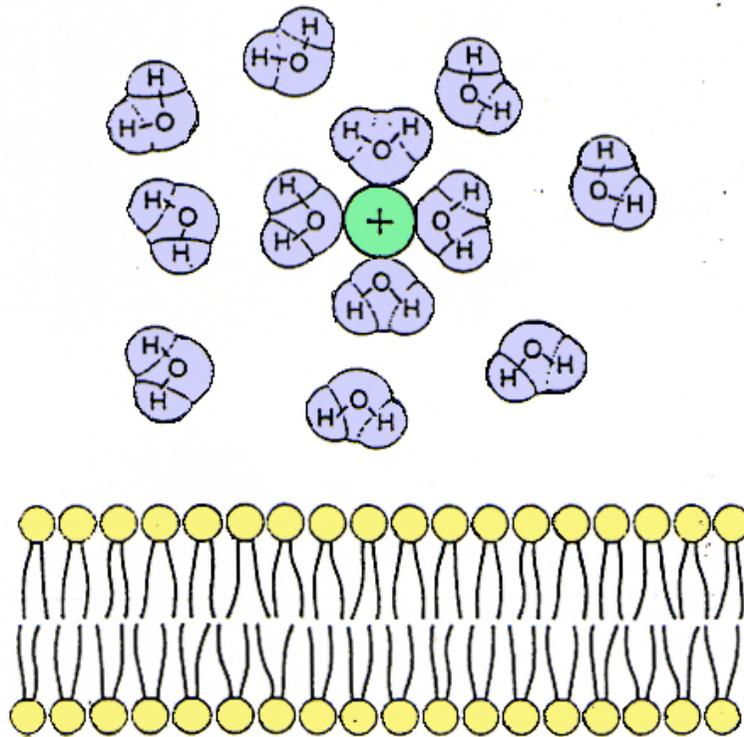


Fig. 5.13 - Classificazione delle diverse modalità di trasporto delle sostanze attraverso la membrana plasmatica delle cellule.

A causa della natura idrofila  
gli ioni non possono attraversare la membrana plasmatica

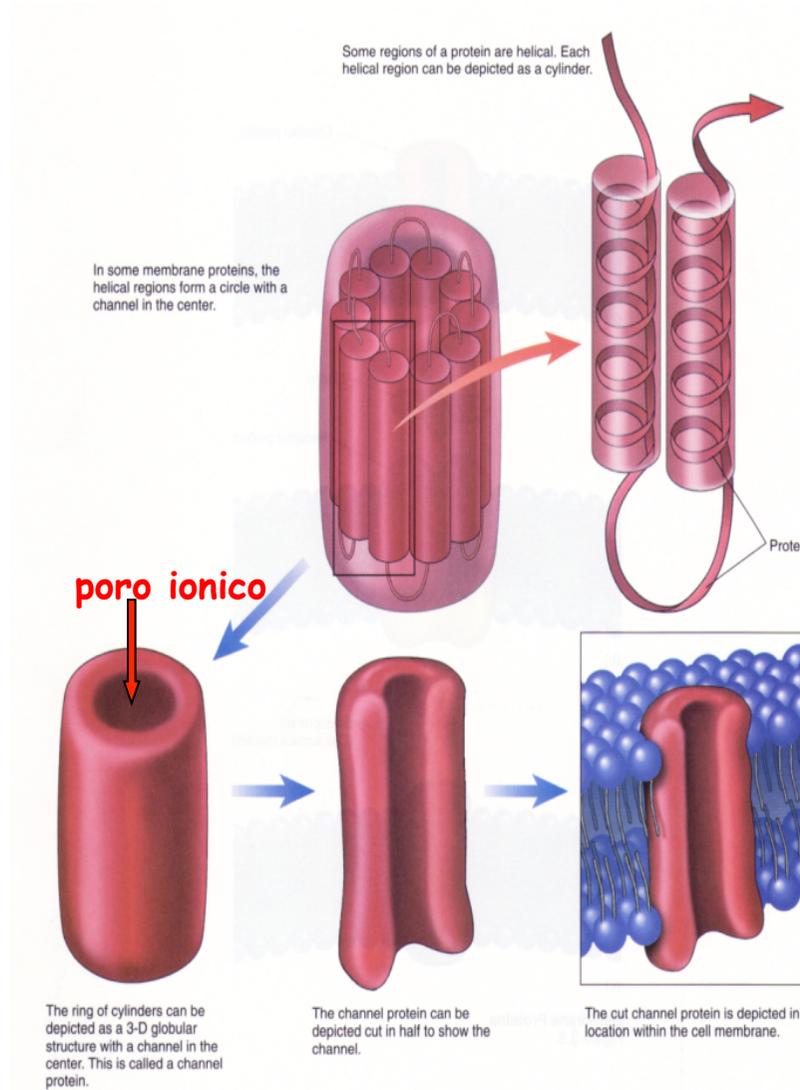


**FIGURA 5-1**

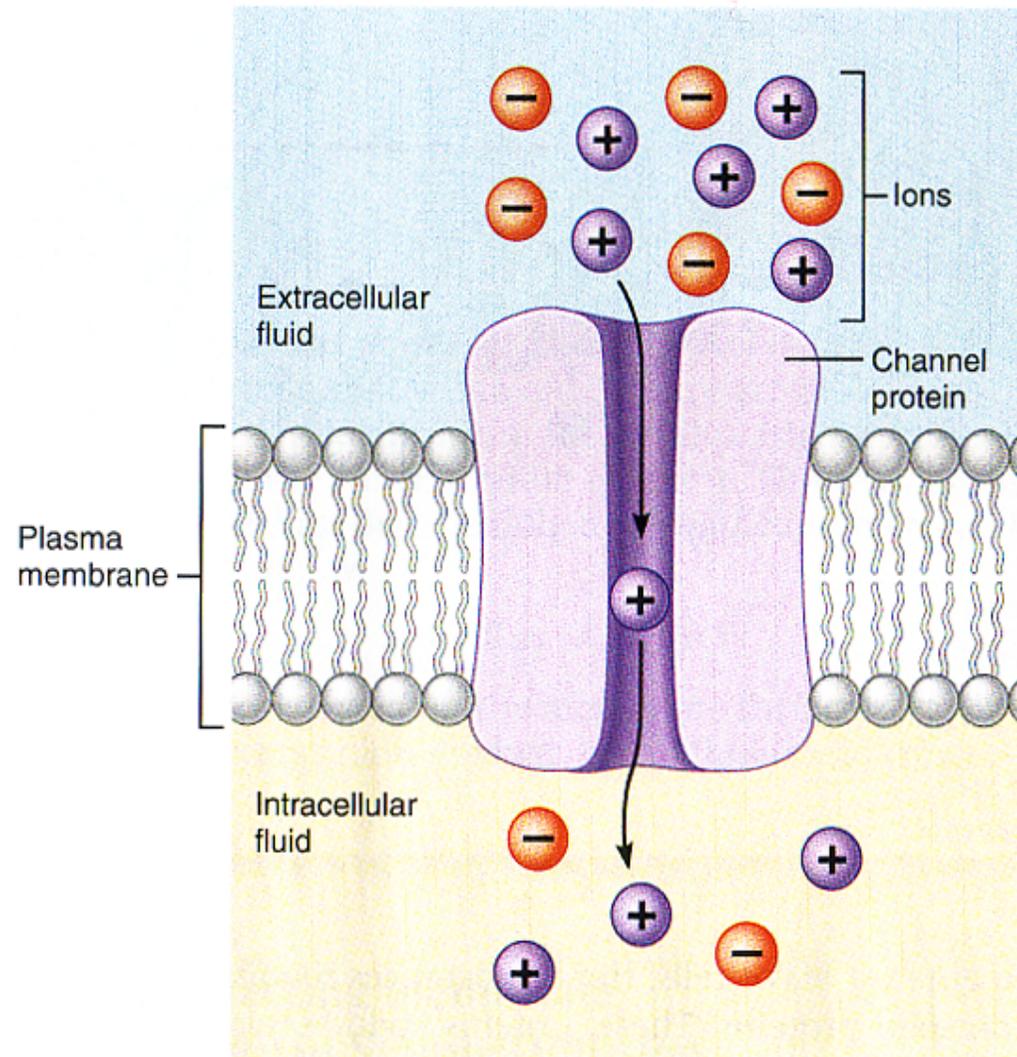
Gli ioni in soluzione sono circondati da una nuvola di molecole d'acqua (acqua di idratazione) che sono attratte dalla carica elettrica netta degli ioni stessi. Questa nuvola di molecole accompagna in permanenza gli ioni nei loro processi di diffusione nelle soluzioni aumentandone le dimensioni effettive. Dal punto di vista energetico, per uno ione, l'abbandonare l'ambiente polare rappresentato dalle molecole d'acqua per entrare in quello non polare costituito dal doppio strato lipidico delle membrane, costituisce un evento fortemente sfavorevole e perciò improbabile.

# I canali ionici

## proteine transmembrana



## Il flusso di ioni attraverso un canale ionico



# Come studiare i canali ionici: la **Tecnica del *Patch Clamp***

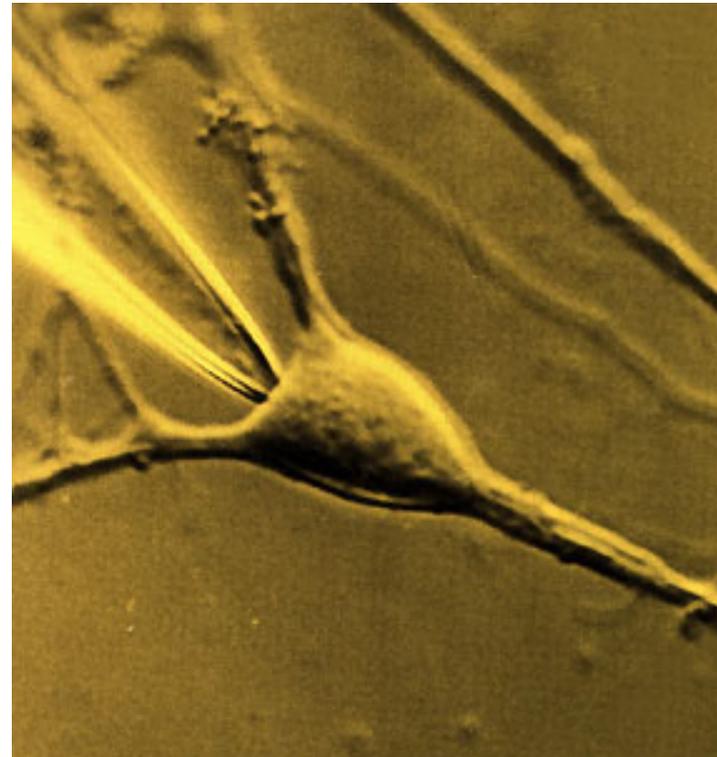
**The Nobel Prize in Physiology  
or Medicine 1991**



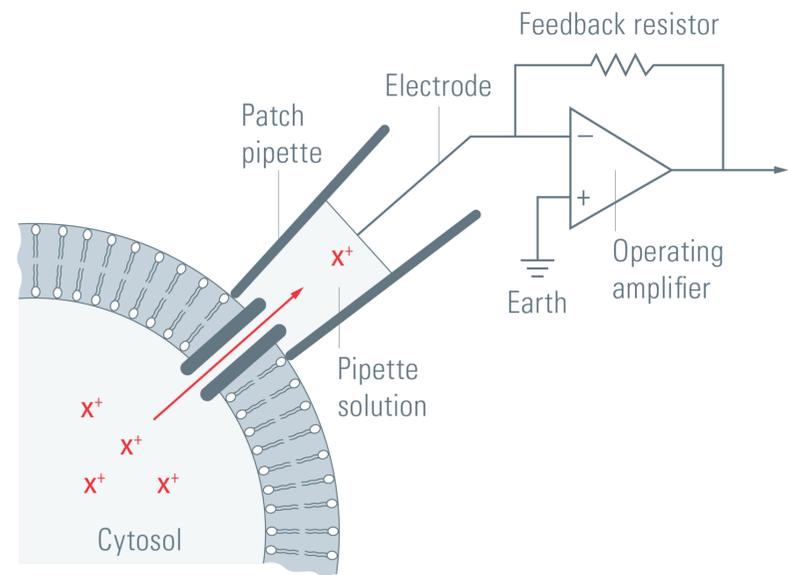
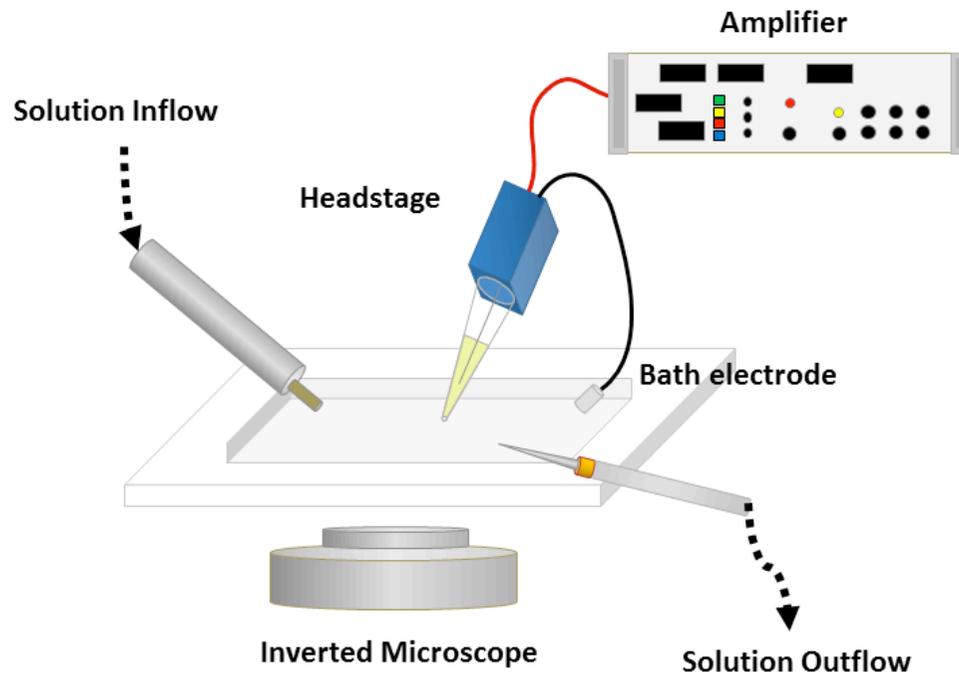
**Bert Sakmann**



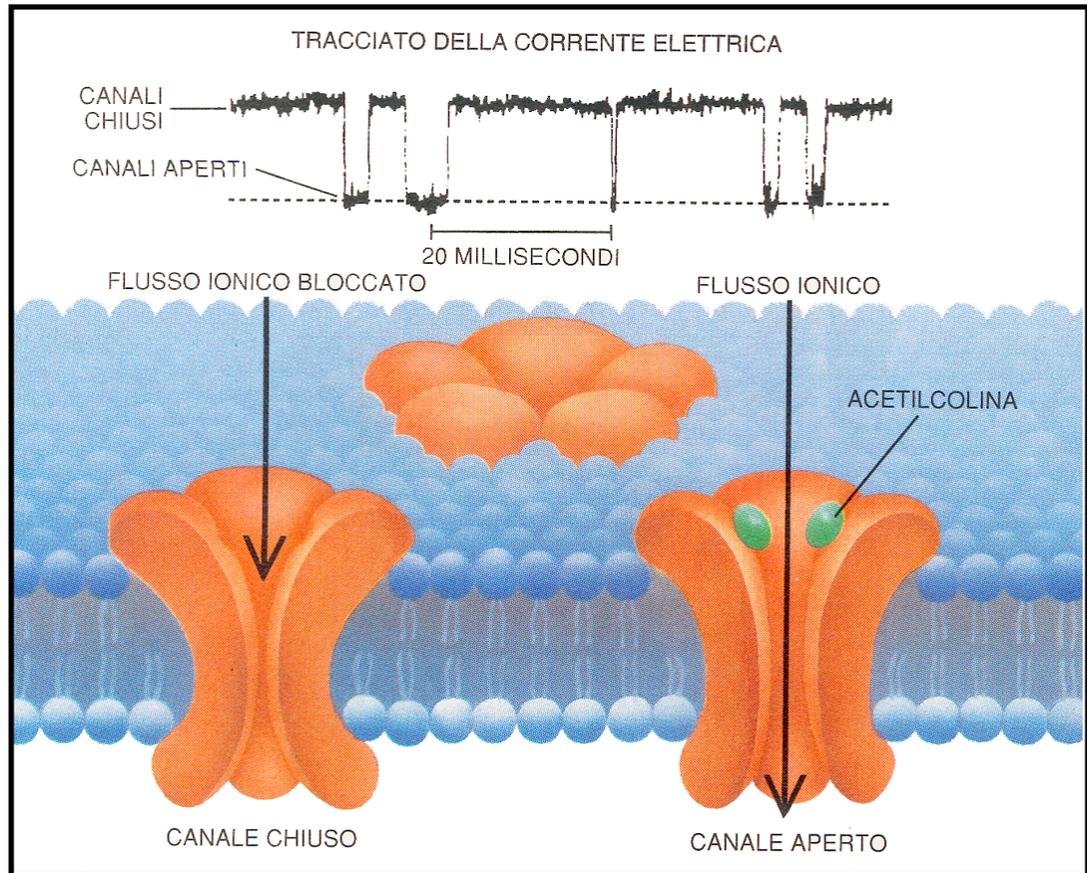
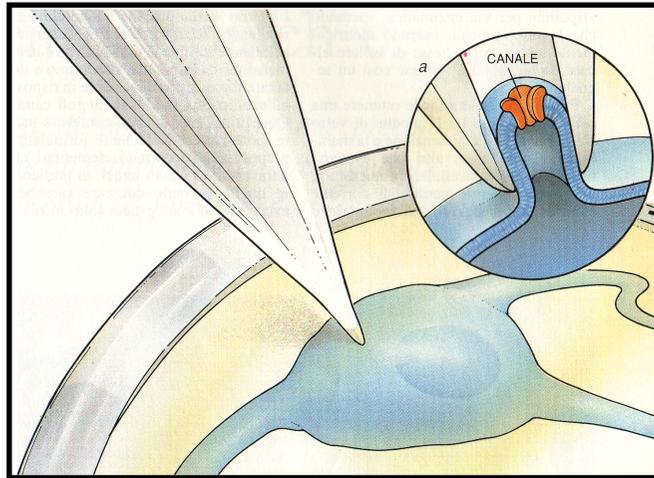
**Erwin Neher**



# Il set up di elettrofisiologia

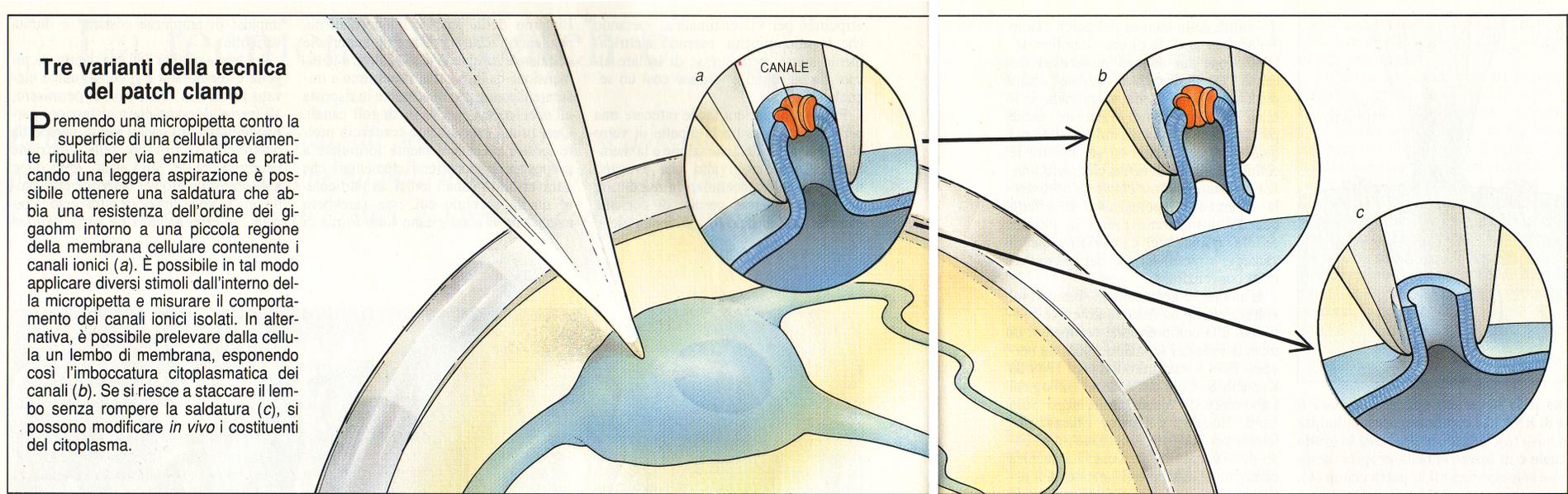


# Le singole aperture del canale ionico



# Le tre configurazioni del *patch clamp*

- a) cell-attached
- b) excised-patch (outside out; inside out)
- c) whole-cell



# Le proprietà dei canali ionici

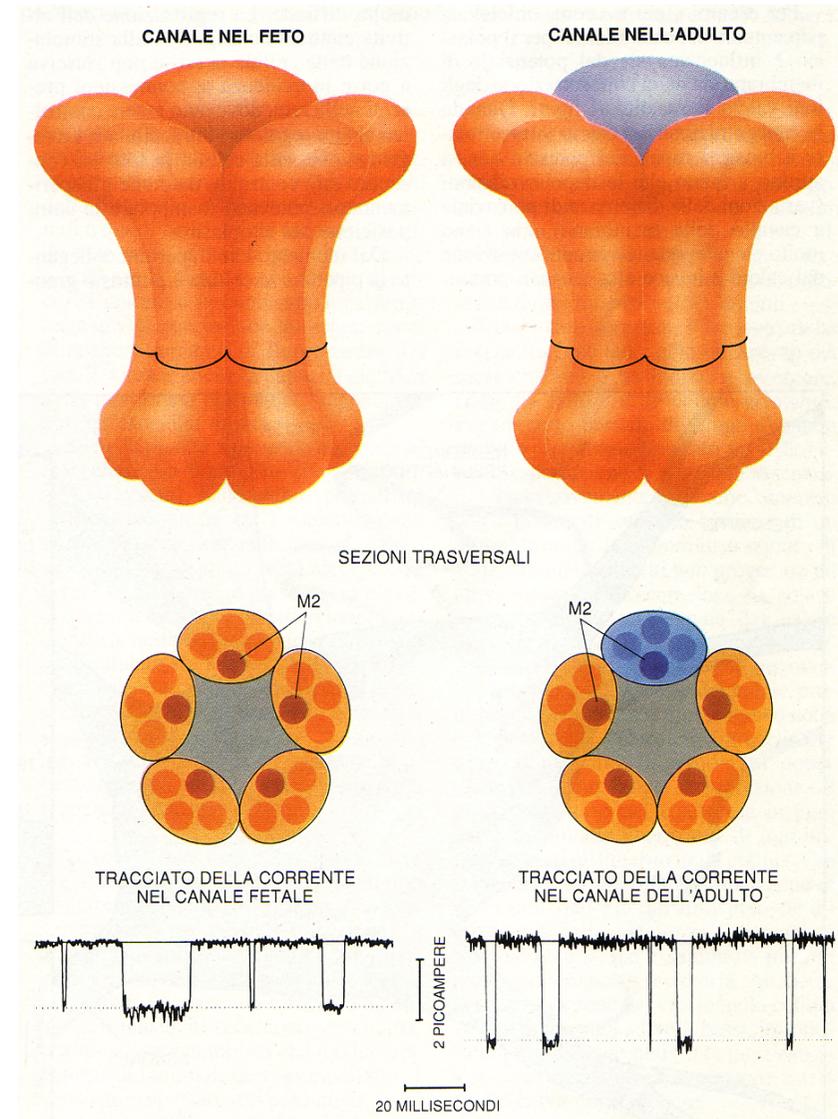
**Cinetica e conduttanza**

**Permeabilità (selettività)**

**Meccanismo di apertura**

## Conduttanza e cinetica:

- tempo medio di apertura
- ampiezza della corrente



## La permeabilità: il canale ionico è un filtro meccanico

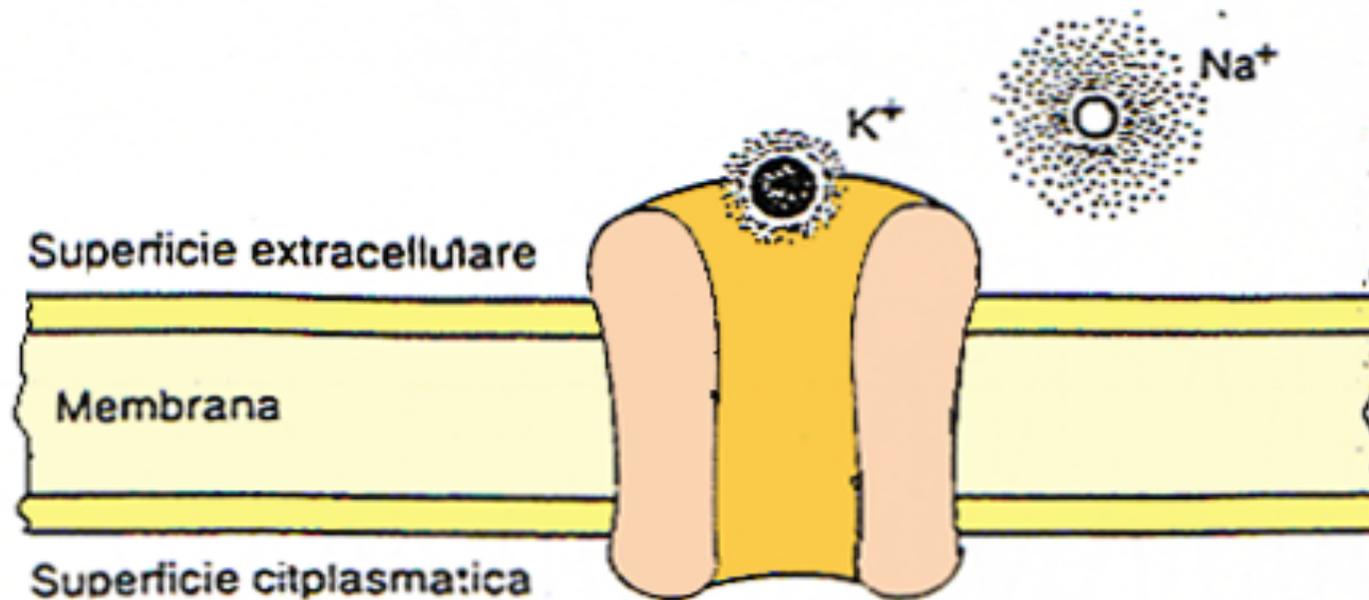


FIGURA 5-2

Modello di selettività per uno ione  $K^+$  basato sulla sua diffusione attraverso un poro-canalico riempito di un mezzo acquoso. Sebbene gli ioni  $Na^+$  siano di per sé più piccoli degli ioni  $K^+$ , il loro diametro effettivo, in soluzione, è maggiore in quanto il loro campo elettrico è localmente più intenso e fa sì che esso finisca con l'attrarre un numero più elevato di molecole d'acqua. Perciò, in teoria, un canale selettivo per i  $K^+$  può favorire l'ingresso dei  $K^+$  rispetto a quello degli  $Na^+$ , in quanto non permette il passaggio di ioni, allo stato idrato, di dimensioni maggiori di un determinato diametro (prefissato dal diametro del poro stesso).

Ione	Raggio anidro Å	Raggio idrato Å
$Na^+$	0,98	2,91
$K^+$	1,33	1,88
$NH_4^+$	1,45	1,89
$Cl^-$	1,80	1,92

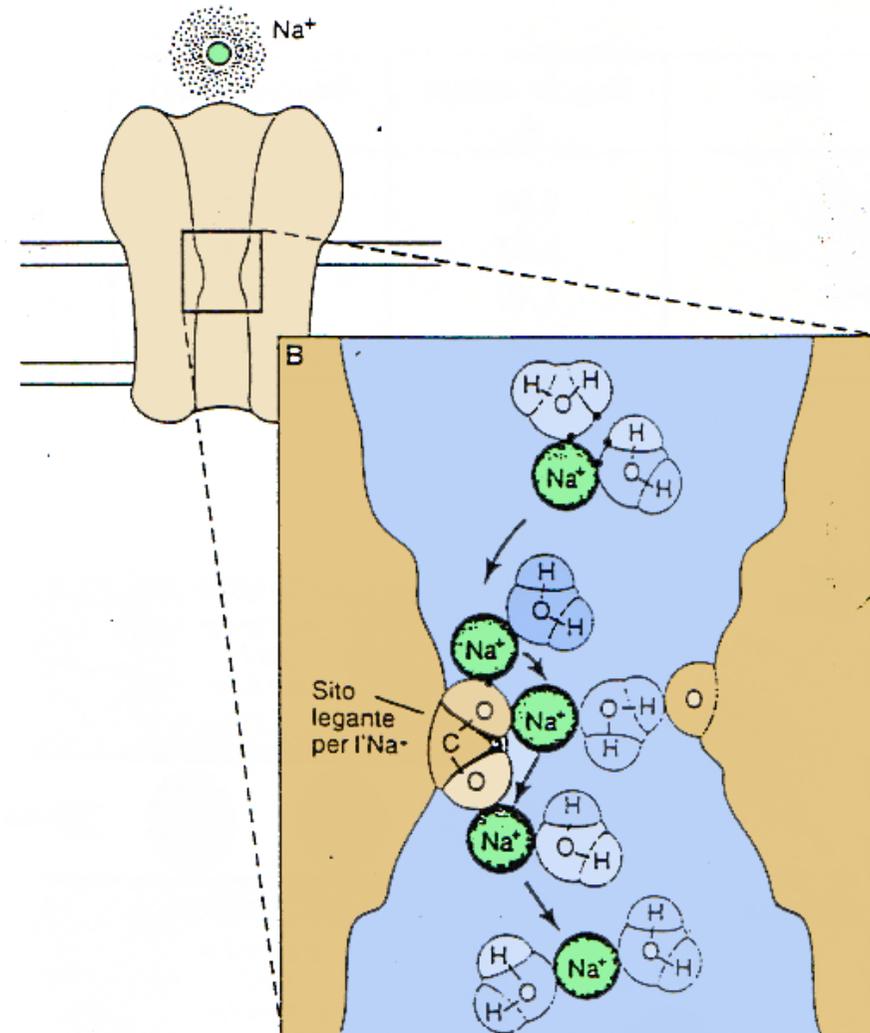
# La permeabilità: il canale ionico è un filtro chimico

FIGURA 5-3

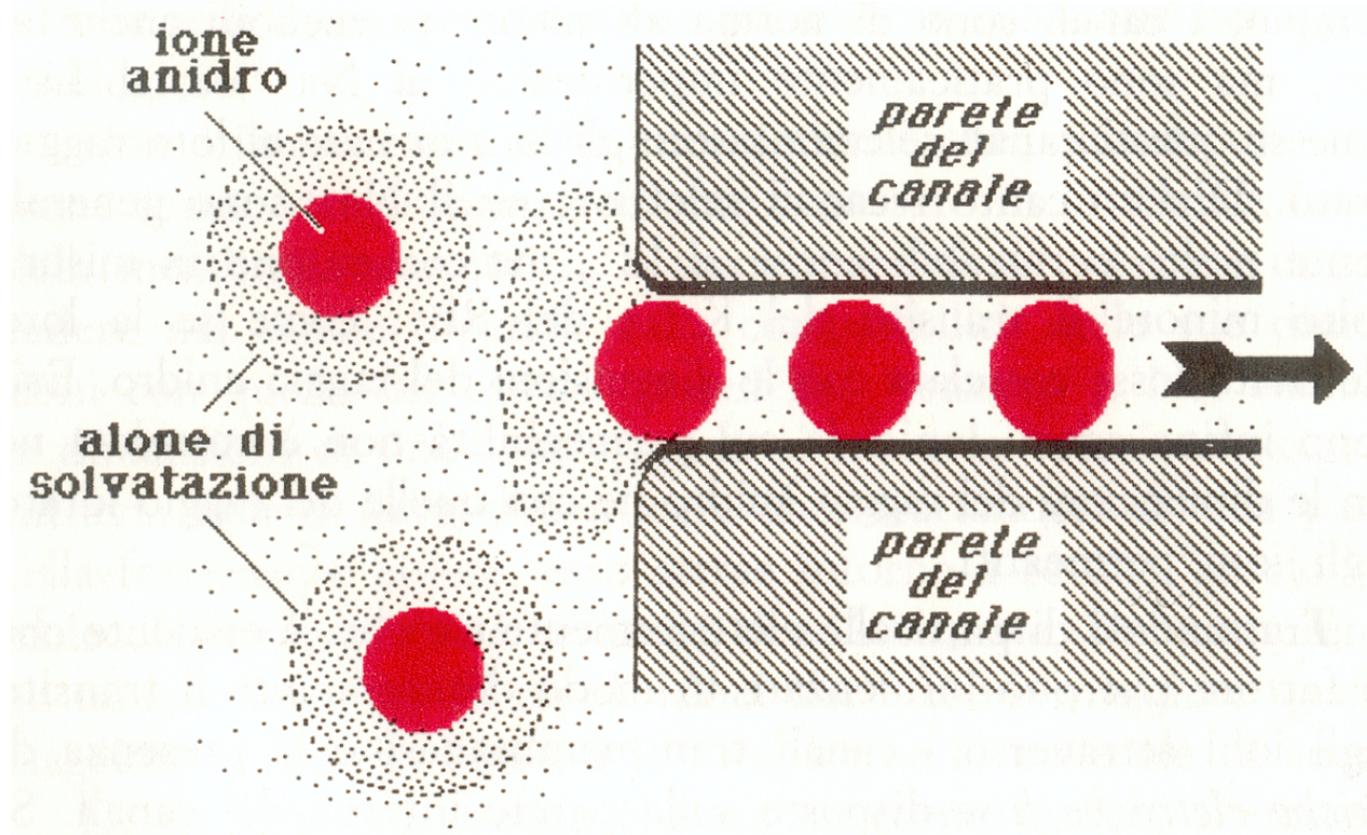
I canali per gli  $\text{Na}^+$  posseggono un filtro di selettività situato lungo la parete interna del canale stesso e caratterizzato dalla presenza di un sito specifico che lega blandamente gli  $\text{Na}^+$ .

A. Diagramma schematico del canale  $\text{Na}^+$ .

B. Diagramma schematico del sito specifico del canale che seleziona i tipi di ioni che possono attraversarlo. Secondo l'ipotesi formulata da Bertil Hille e coll., quando un  $\text{Na}^+$  si muove nella zona ove è collocato il filtro selettivo, si lega ad esso in maniera reversibile. La carica positiva dello ione viene quindi stabilizzata dal residuo di un aminoacido idrofilo (polare) che costituisce una delle pareti del canale in quel punto, e da una molecola d'acqua che viene invece attratta dal residuo di un secondo aminoacido polare che sta sull'altro lato della parete del canale. Si ritiene che un  $\text{K}^+$ , cui sia associata una molecola d'acqua, non possa venir stabilizzato con la stessa facilità per ragioni steriche e che venga perciò escluso dal filtro. (Da Hille, 1984).

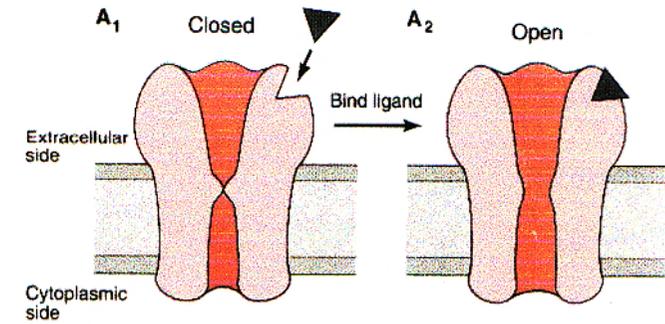


Il passaggio dello ione attraverso il poro:  
la disidratazione

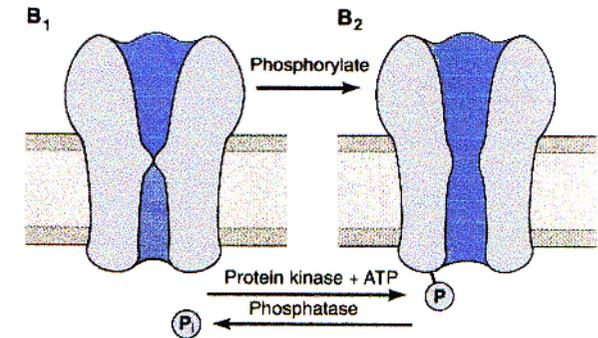


# I meccanismi di apertura: identificano le categorie dei canali ionici

## 1. Ligando-dipendenti



## 2. Attivati da fosforilazione



**FIGURE 5-12**

Channel gating is controlled by several types of stimuli.

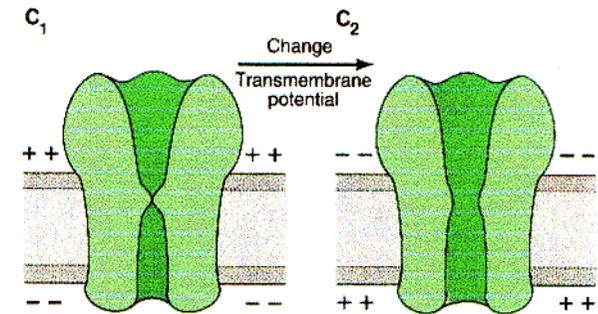
**A.** Ligand-gated channels open in response to binding of the ligand to its receptor. The energy from ligand binding drives channel gating toward an open state.

**B.** Protein phosphorylation and dephosphorylation regulate the opening and closing of some channels. The energy for channel opening comes from the transfer of the high-energy phosphate, P.

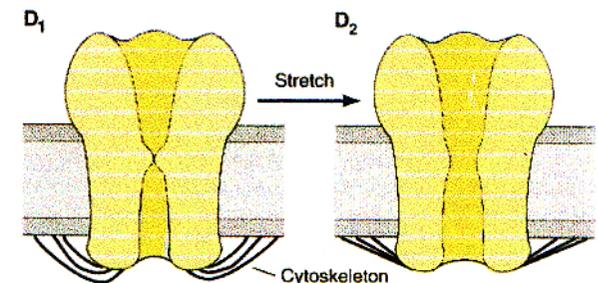
**C.** Changes in membrane voltage can open and close some channels. The energy for channel gating comes from changes in the electrical potential difference across the membrane.

**D.** Other channels are activated by stretch or pressure. The energy for gating may come from mechanical forces due to channel-cytoskeleton interactions.

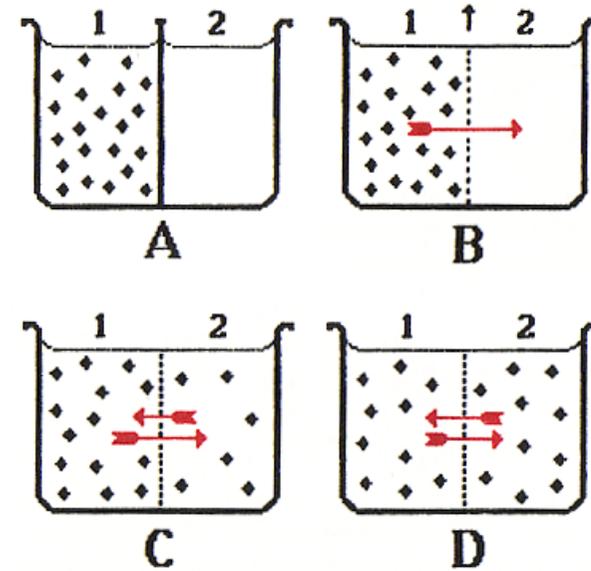
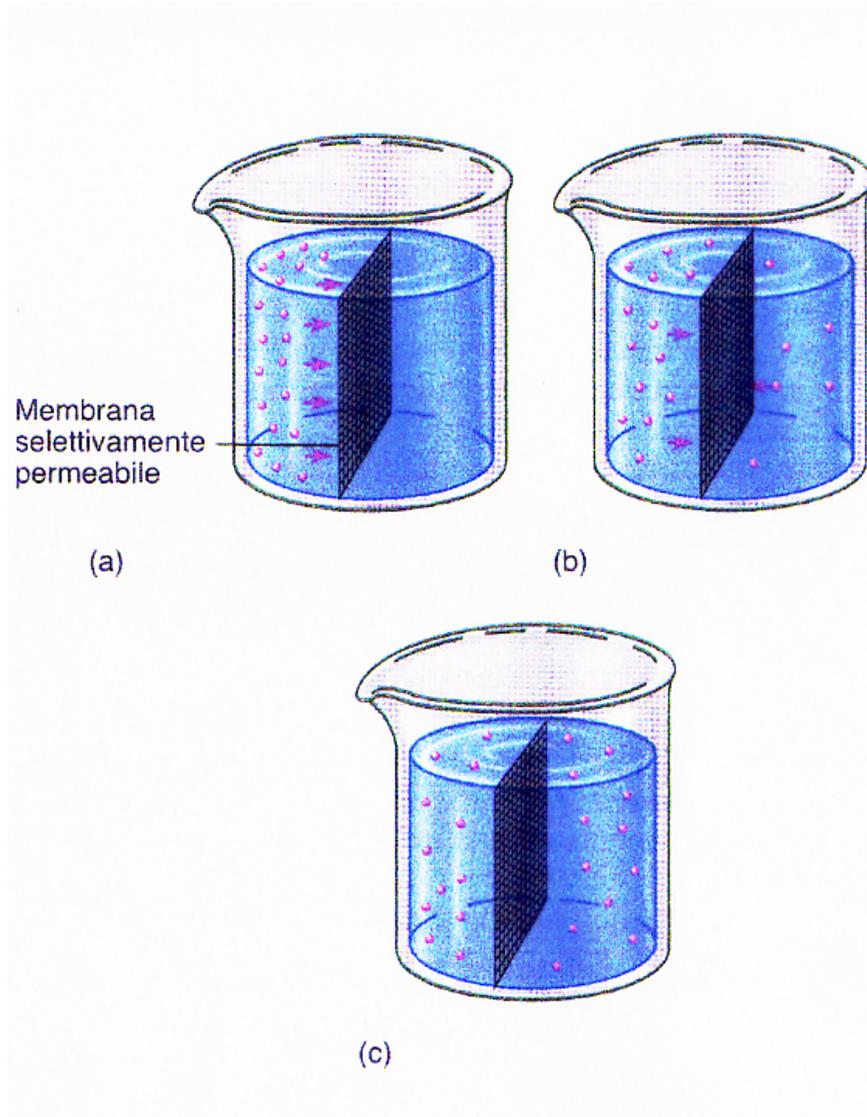
## 3. Voltaggio-dipendenti



## 4. Attivati da stiramento



# La diffusione ionica in una soluzione acquosa



Prima legge di Fick:

$$F_d = K_d (c_1 - c_2)$$

$F_d$  = flusso diffusionale netto

$K_d$  = coeff. di diffusione libera

$c_1 - c_2$  = diff. di concentrazione del soluto

## La diffusione ionica in un campo elettrico

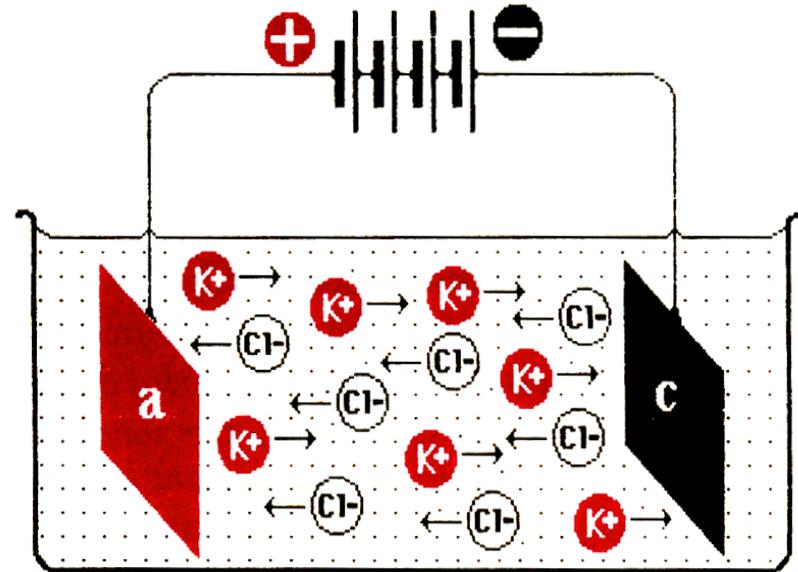


Fig. 5.7 - Migrazione dei cationi (K<sup>+</sup>) e degli anioni (Cl<sup>-</sup>) nella elettrolisi. **a** anodo; **c** catodo.

Legge di Ohm:  $I = V/R$

$$F_e = zK_e (V_a - V_c)$$

$F_e$  = flusso di cariche netto (anche I)

$zK_e$  = conduttività della soluzione

$V_a - V_c$  = differenza di potenziale

# La forza che guida gli ioni:

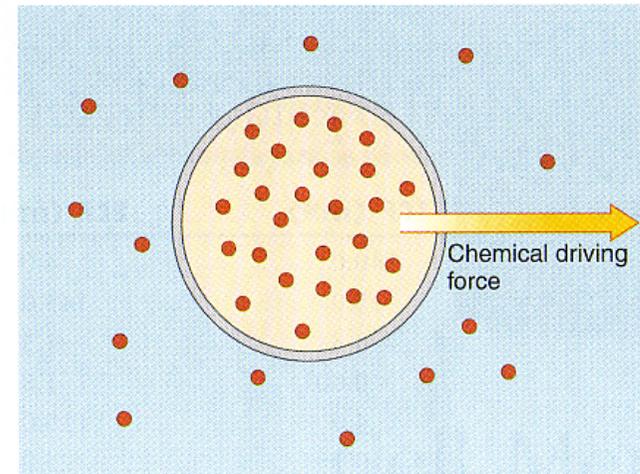
## 1) il gradiente chimico

**Prima legge di Fick:  $F_d = K_d (C_1 - C_2)$**

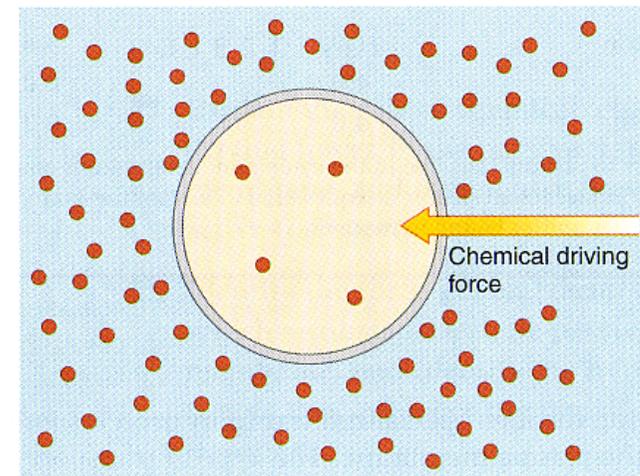
**TABLE 4.1** MILLIMOLAR CONCENTRATIONS OF SELECTED SOLUTES IN INTRACELLULAR FLUID (ICF) AND EXTRACELLULAR FLUID (ECF)

SOLUTE	ICF (mM)	ECF (mM)
K <sup>+</sup>	140.0	4.0
Na <sup>+</sup>	15.0	145.0
Mg <sup>2+</sup>	0.8	1.5
Ca <sup>2+</sup>	<0.001*	1.8
Cl <sup>-</sup>	4.0	115.0
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	10.0	25.0
P <sub>i</sub>	40.0	2.0
Amino acids	8.0	2.0
Glucose	1.0	5.6
ATP	4.0	0.0
Protein	4.0	0.2

\*Refers to calcium ions free in the cytoplasm. A significant quantity of intracellular calcium is sequestered in membrane-bounded organelles and/or bound to proteins.



(a)



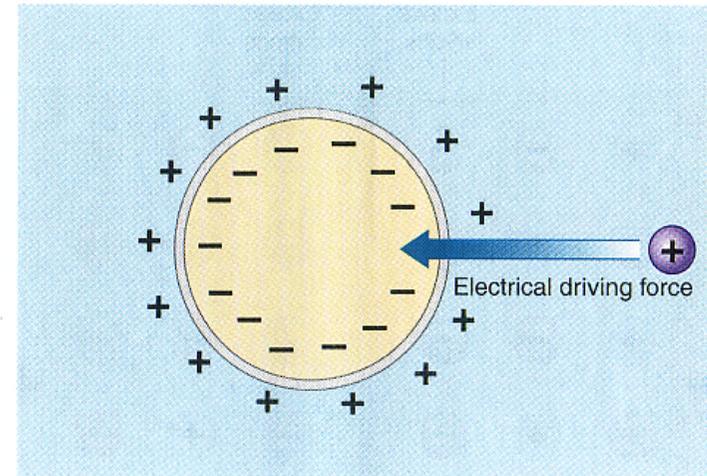
(b)

**FIGURE 4.1** Chemical driving forces. (a) When the concentration of molecules (dots) is higher inside a cell than in extracellular fluid, the direction of the chemical driving force (arrow) is outward. (b) When the concentration of molecules is higher in extracellular fluid, the direction of the chemical driving force is inward. In both cases, molecules will move passively in the direction of the driving force, or down the concentration gradient.

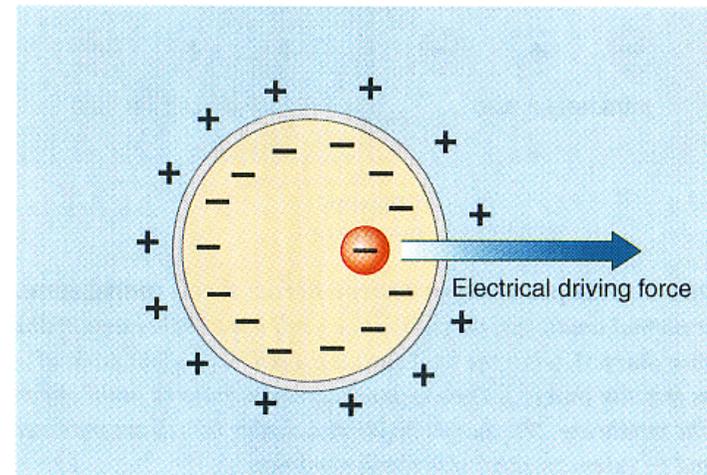
La forza che guida gli ioni:

2) il gradiente elettrico

$$\text{Legge di Ohm: } F_e = zK_e (V_a - V_c)$$



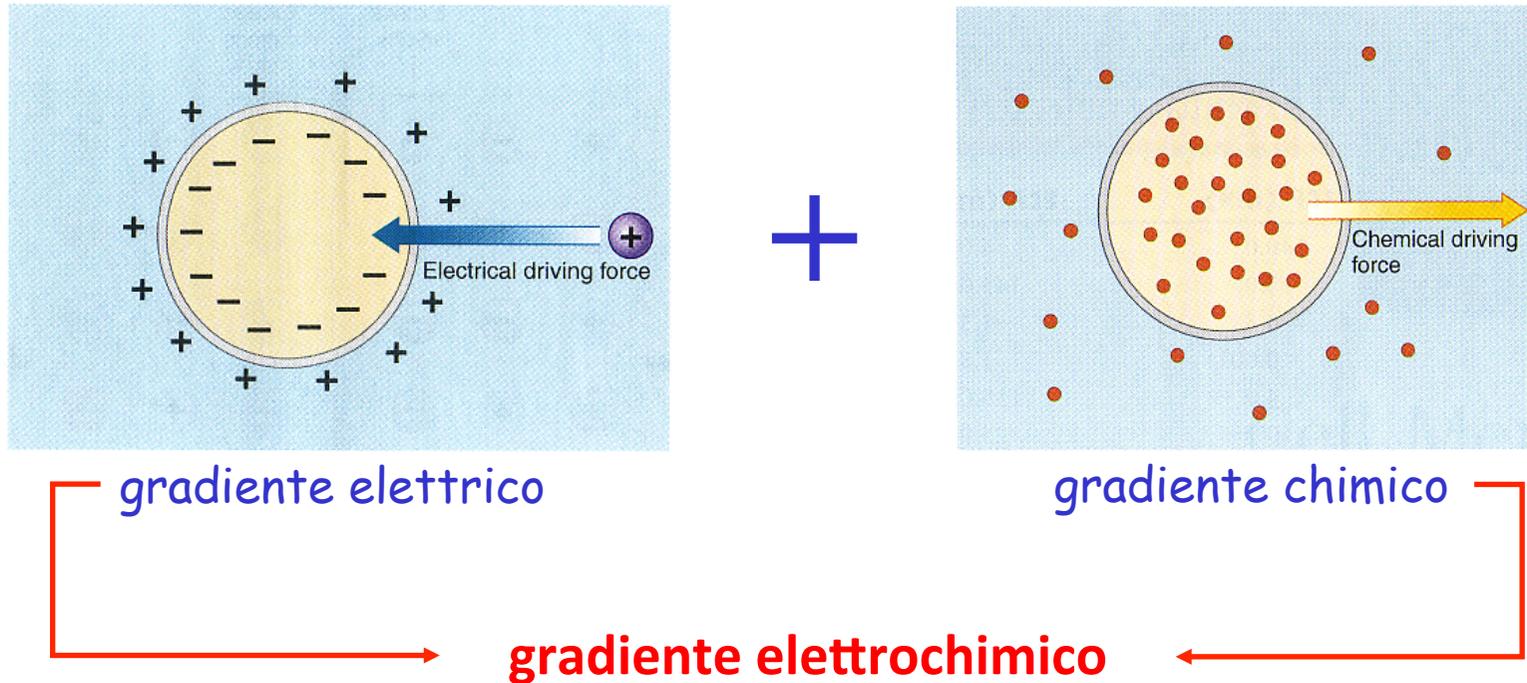
(a)



(b)

**FIGURE 4.3** Electrical driving forces. (a) When a positively charged ion crosses a cell membrane, the direction of the electrical driving force (arrow) is inward. (b) When a negatively charged ion crosses the membrane, the direction of the electrical driving force is outward. In both cases, it is assumed that the membrane potential is negative, as indicated by (+) and (-) signs on either side of the membrane.

## La forza che guida gli ioni: il gradiente elettrochimico



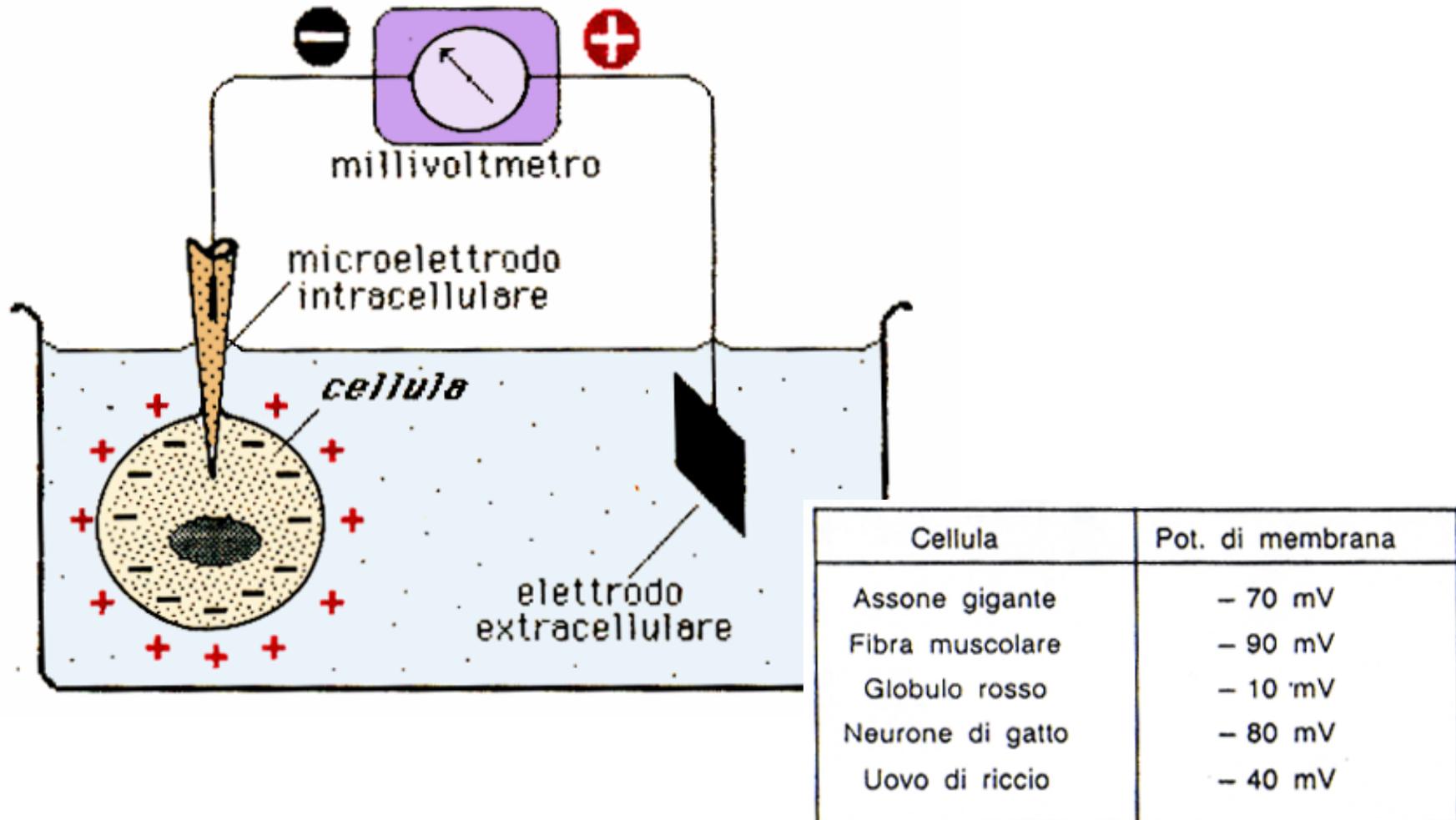
Legge di Nernst-Planck:

$$F_{ed} = K_d (c_1 - c_2) + zK_e (V_1 - V_2)$$

$F_{ed}$  = flusso di cariche netto

# Il potenziale di membrana

Misura del potenziale di membrana mediante microelettrodo.



## Il potenziale di equilibrio

### Equazione di Nernst

$$V_m = E_i = \frac{RT}{z_i F} \ln \frac{[i]_2}{[i]_1}$$

R è la costante dei gas

T la temperatura assoluta,

$z_i$  è la valenza dello ione (i)

F la costante di Faraday.

$[i]_1$ ,  $[i]_2$  sono le concentrazioni dello ione (i) ai due lati della membrana

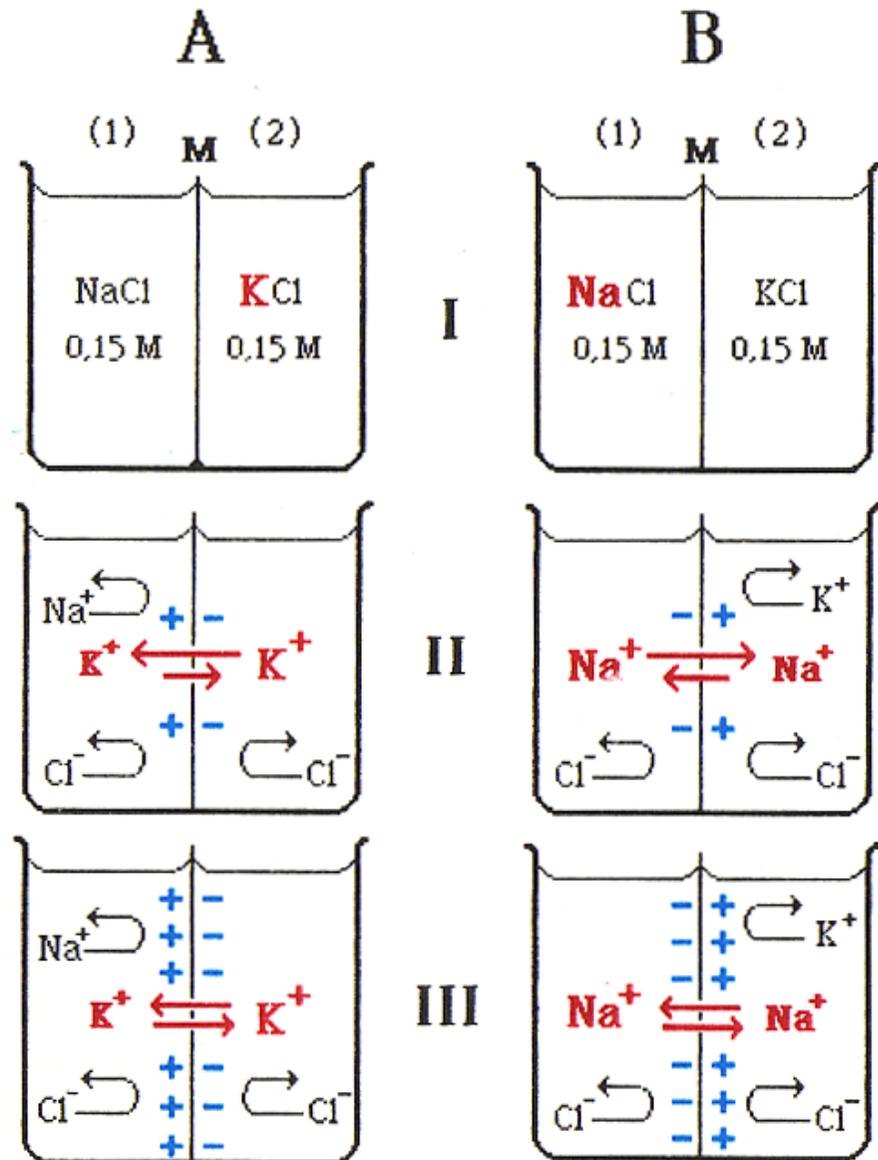


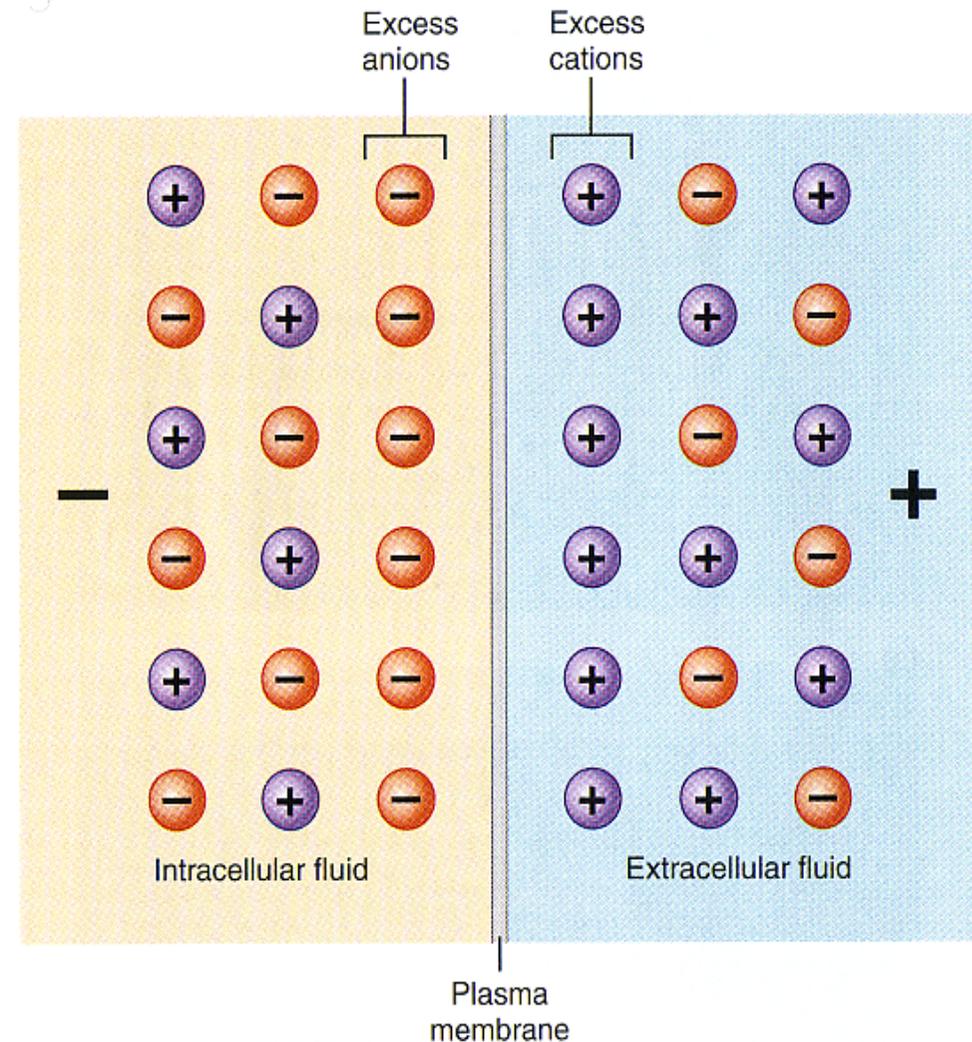
Fig. 6.1 - Due esempi (A e B) di potenziale di equilibrio. I, II, III: istanti successivi del processo con cui si stabilisce l'equilibrio. In rosso sono indicati gli ioni permeanti. Il corpo più grande vuole indicare una concentrazione più elevata.

## Il potenziale di membrana:

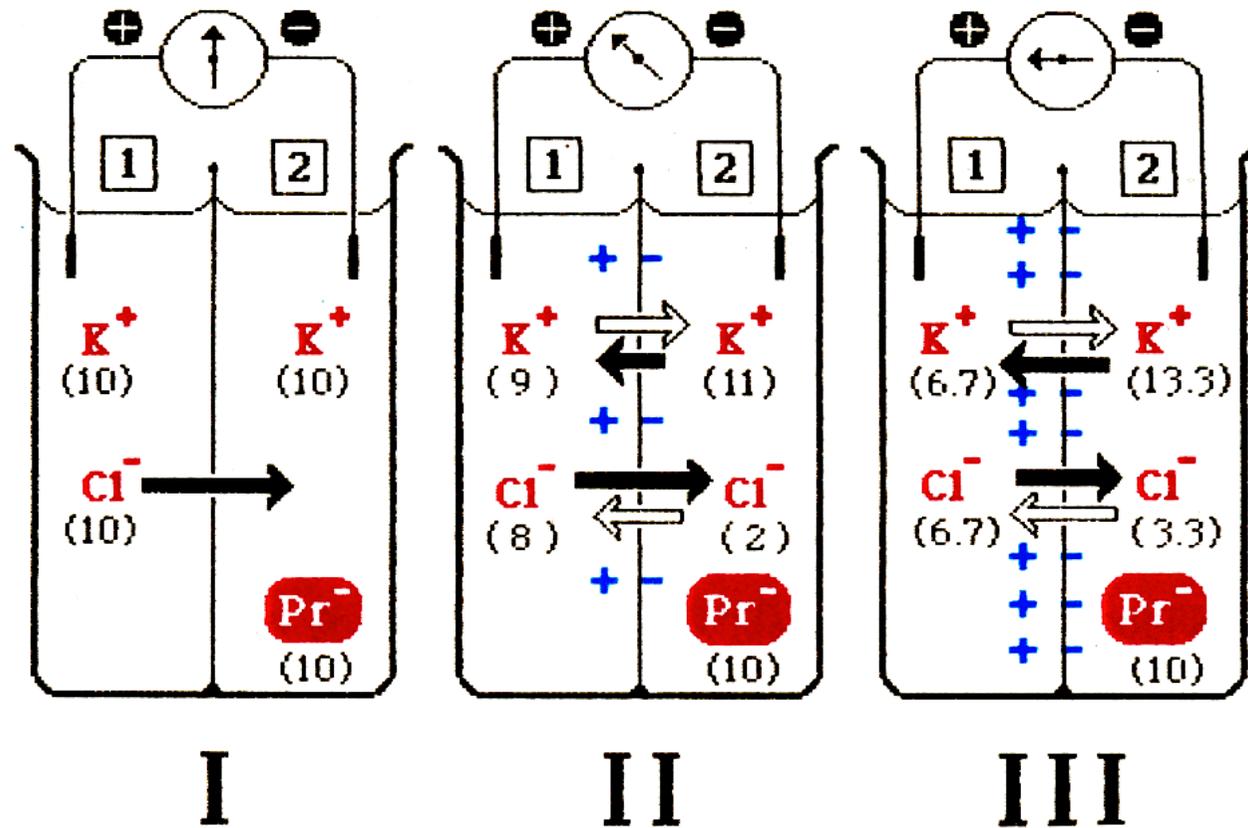
la distribuzione asimmetrica degli ioni

Nel caso reale delle membrane biologiche, che di regola non sono permeabili o sono pochissimo permeabili alle proteine, lo stabilirsi di un equilibrio di Donnan è praticamente una regola, e ciò ha molteplici conseguenze di notevole interesse funzionale.

Anzitutto, per solo “effetto Donnan” a cavallo di una membrana si produce costantemente una *differenza di potenziale* (negativo al lato dove si trovano le proteine). Inoltre la concentrazione degli ioni diffusibili è aumentata al lato dove si trovano le proteine, e ciò *aumenta la pressione osmotica* del liquido ove esse sono presenti a valori molto più elevati di quanto non comporti la sola presenza delle molecole proteiche. Questo incremento di pressione osmotica esplicito dalle proteine per “effetto Donnan” è noto come *pressione colloid-osmotica* ed è una delle cause principali che, assicurando alle cellule il loro caratteristico “turgore” osmotico, mantiene la loro forma e la normale distensione della loro membrana.



## L'equilibrio di Donnan: il ruolo delle proteine



**Fig. 6.2** - Esempio di equilibrio di Donnan. I, II, III indicano tre istanti successivi del processo. Le frecce vuote indicano la direzione dei flussi secondo gradiente elettrico, le frecce piene la direzione dei flussi secondo gradiente di concentrazione. La lunghezza delle frecce indica l'intensità dei flussi corrispondenti.

**La formula del  
potenziale di membrana:**  
l'equazione  
di Goldman-Hodgkin-Katz  
(o equazione GHK)

**Tab. 6.2** - Concentrazioni dei tre più importanti ioni inorganici nei liquidi intra- ed extracellulare, espresse in mM/litro.

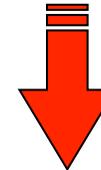
	Concentrazione nel liquido intracellulare (mM/litro)		Concentrazioni nel liquido extracellulare (mM/litro)	
	anfibo	mammifero	anfibo	mammifero
Na <sup>+</sup>	20	15	120	150
K <sup>+</sup>	139	150	2.5	5
Cl <sup>-</sup>	3.8	10	120	125

$$E_{Na} = (0,058 \cdot \text{Log} \frac{120}{20}) \text{ Volt} = 45 \text{ mV}$$

$$E_K = (0,058 \cdot \text{Log} \frac{2,5}{139}) \text{ Volt} = -102 \text{ mV}$$

$$E_{Cl} = (0,058 \cdot \text{Log} \frac{3,8}{120}) \text{ Volt} = -88 \text{ mV}$$

$$V_m = 0.058 \text{ Log} \frac{2,5 \cdot (2 \cdot 10^{-6}) + 120 \cdot (2 \cdot 10^{-8}) + 3,8 \cdot (4 \cdot 10^{-6})}{139 \cdot (2 \cdot 10^{-6}) + 20 \cdot (2 \cdot 10^{-8}) + 120 \cdot (4 \cdot 10^{-6})} = 0,088 \text{ V}$$



$$V_m = \frac{RT}{F} \ln \frac{[K^+]_e \cdot P_K + [Na^+]_e \cdot P_{Na} + [Cl^-]_i \cdot P_{Cl}}{[K^+]_i \cdot P_K + [Na^+]_i \cdot P_{Na} + [Cl^-]_e \cdot P_{Cl}}$$

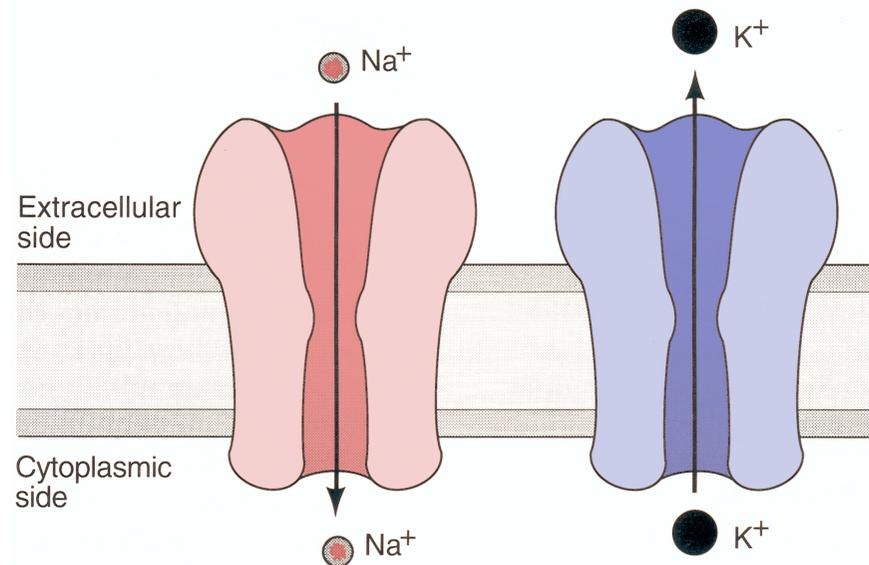
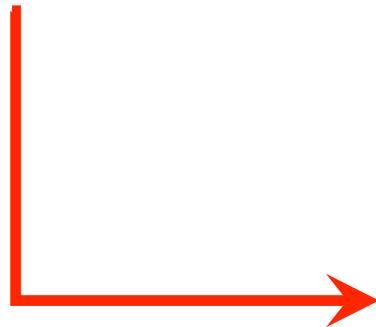
## Le correnti ioniche passive o di fondo

$$V_m = 0.058 \text{ Log} \frac{2,5 \cdot (2 \cdot 10^{-6}) + 120 \cdot (2 \cdot 10^{-8}) + 3,8 \cdot (4 \cdot 10^{-6})}{139 \cdot (2 \cdot 10^{-6}) + 20 \cdot (2 \cdot 10^{-8}) + 120 \cdot (4 \cdot 10^{-6})} = 0,088 \text{ V}$$

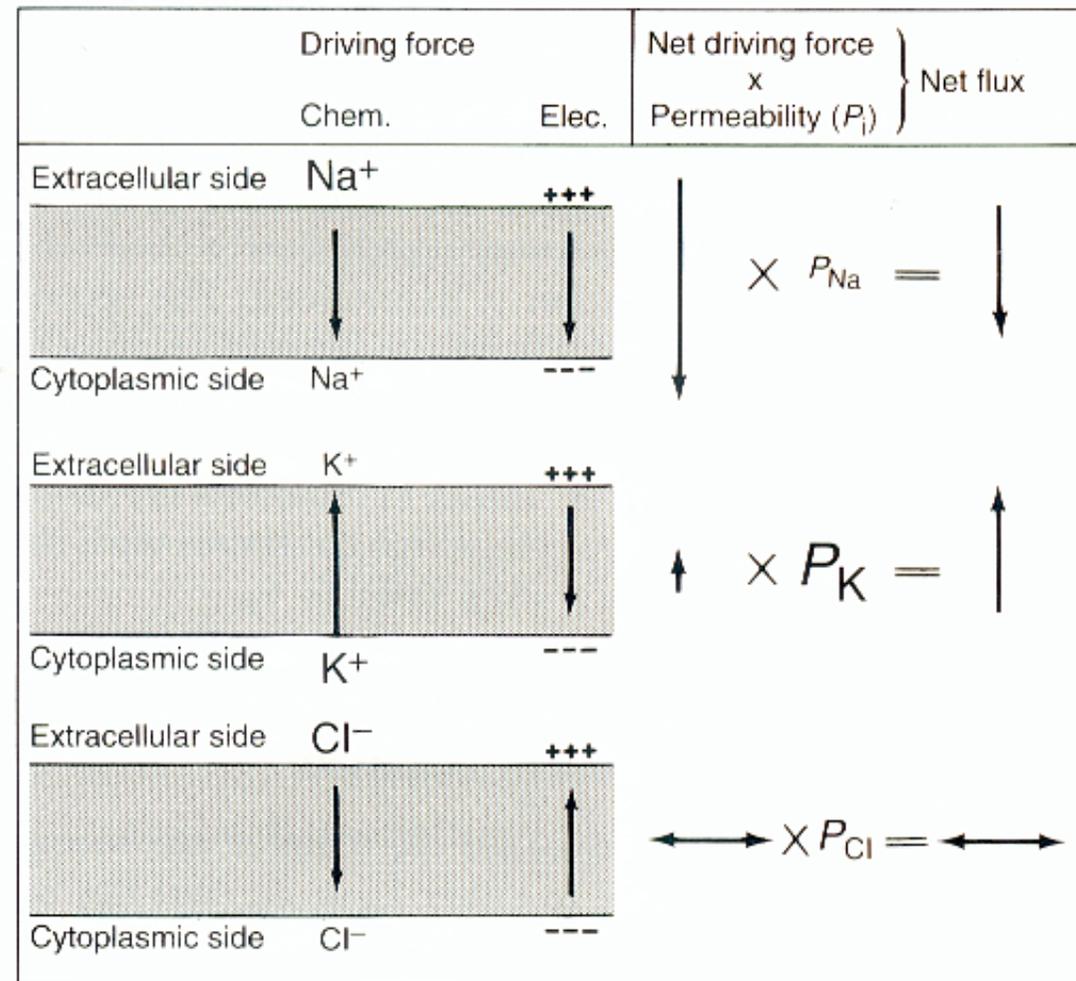
$$E_{Na} = (0,058 \cdot \text{Log} \frac{120}{20}) \text{ Volt} = 45 \text{ mV}$$

$$E_K = (0,058 \cdot \text{Log} \frac{2,5}{139}) \text{ Volt} = -102 \text{ mV}$$

$$E_{Cl} = (0,058 \cdot \text{Log} \frac{3,8}{120}) \text{ Volt} = -88 \text{ mV}$$

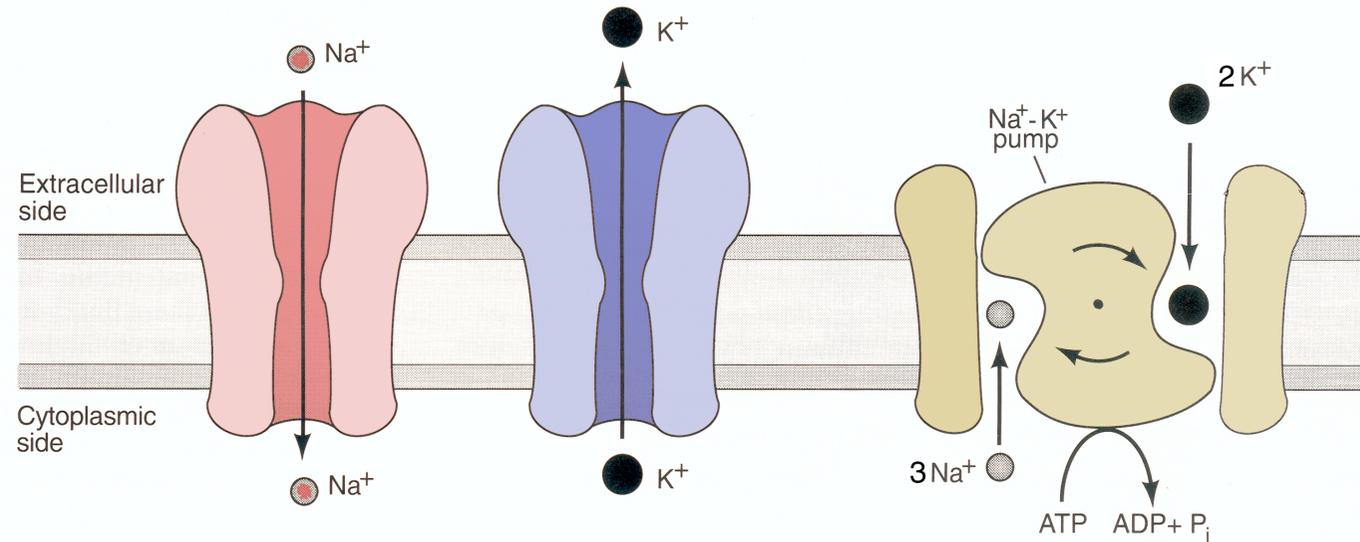


# Il flusso netto delle correnti ioniche passive è nullo



The fluxes for  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , and  $\text{Cl}^-$  across the cell membrane are a result of their chemical and electrical driving forces and the permeability of the membrane. The fluxes shown here are for a cell with a membrane potential of  $-60$  mV and the ionic gradients shown in Table 6-1. [Horizontal arrows signify no net driving force or no net flux.]

## Il ruolo della pompa $\text{Na}^+/\text{K}^+$ : il mantenimento dei gradienti di $\text{Na}^+$ e $\text{K}^+$



**FIGURE 6-7**

When the cell is at rest the passive fluxes of  $\text{Na}^+$  and  $\text{K}^+$  into and out of the cell are balanced by active transport driven in the opposite direction by the ATP-dependent  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  pump.

# La stechiometria della pompa $3\text{Na}^+ : 2\text{K}^+$

- elettrogenica

- contributo al valore del potenziale di membrana trascurabile (alcuni mV)

