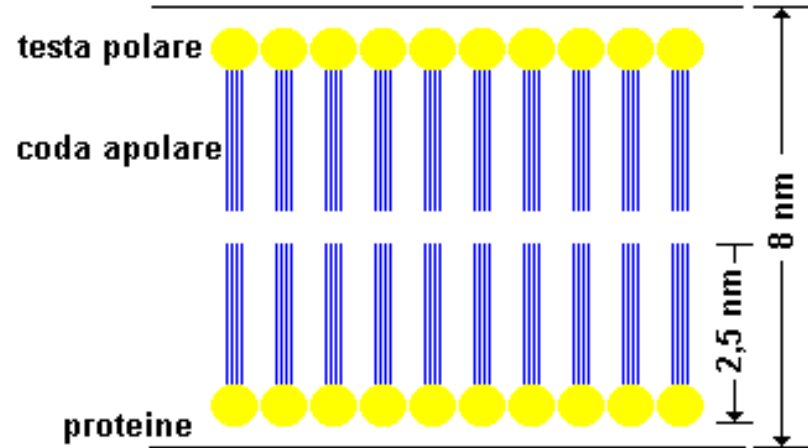
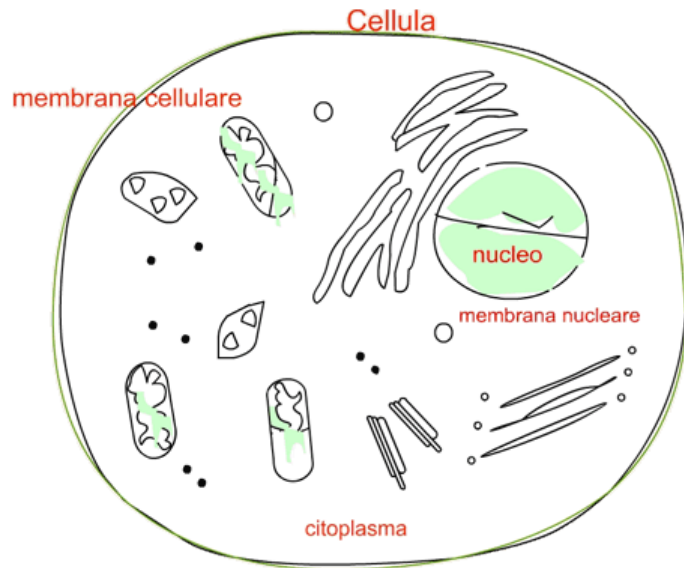


# BIOELETTRICITÀ

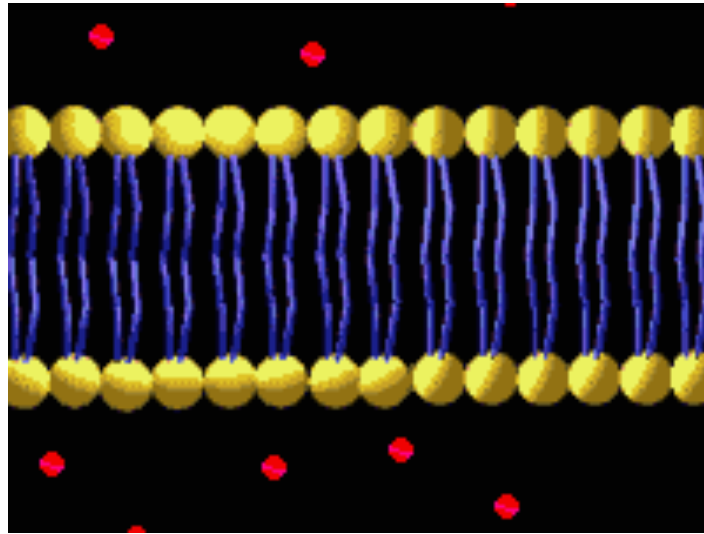
La **membrana cellulare** è costituita da un sottile strato lipoproteico (spessore  $\approx 8$  nm), che separa il liquido intracellulare dal liquido interstiziale (extracellulare).



Il liquido intracellulare ed il liquido interstiziale possono essere schematizzati come soluzioni acquose di ioni positivi,  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ , e negativi  $\text{Cl}^-$  e  $\text{A}^-$  (ioni proteici).

# BIOELETRICITÀ

La membrana cellulare ha funzione di filtro selettivo, che lascia passare alcune sostanze piuttosto che altre, e si comporta come una **struttura dinamica** che modifica la sua permeabilità a soluti ed a ioni elettroliti in rapporto alle condizioni fisico-chimiche in cui essa si trova.



Processo di diffusione passiva

# BIOELETRICITÀ

Studi approfonditi iniziati negli anni '50 hanno consentito di accertare le condizioni fisico-chimiche che caratterizzano la membrana cellulare ed i due liquidi ad essa adiacenti.

La membrana cellulare si trova nelle ***condizioni di riposo*** quando sussiste un equilibrio fra liquido intracellulare e liquido interstiziale.

Quando sussistono tali condizioni, molte osservazioni sperimentali hanno posto in evidenza che le concentrazioni delle varie specie ioniche nei due liquidi sono diverse e che esiste una differenza di potenziale fra le due facce della membrana.

# BIOELETTICITÀ

Le concentrazioni delle varie specie ioniche nei due liquidi per membrane di cellule muscolari di mammiferi sono riportate nella seguente tabella.

Le concentrazioni sono tali da far risultare ciascun liquido elettricamente neutro.

IONE	INTERSTIZIALE (mol/m <sup>3</sup> )	INTRACELLULARE (mol/m <sup>3</sup> )
POTASSIO K <sup>+</sup>	4	155
SODIO Na <sup>+</sup>	145	12
TOTALE CATIONI	149	167
CLORO Cl <sup>-</sup>	120	4
PROTEICI A <sup>-</sup>	29	163
TOTALE ANIONI	149	167

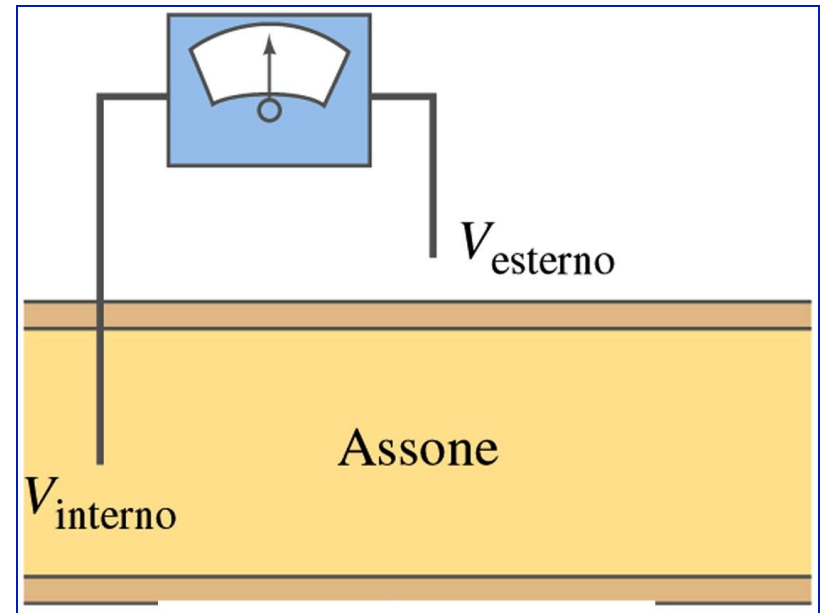
# BIOELETTRICITÀ

In condizioni di riposo, fra le due facce della membrana esiste una d.d.p. compresa fra  $-60$  e  $-90$  mV (negativa all'interno della cellula), detta **potenziale di riposo**  $V_m$ .

Al potenziale di riposo corrisponde un campo elettrico pari a circa  $10^7$  V/m.

$$E = \frac{V_m}{d}$$

$V_m = 90$  mV  
 $d = 8$  nm (spessore membrana)



# BIOELETRICITÀ

Il passaggio degli ioni fra i due liquidi separati dalla membrana è governato da tre differenti fattori:

- ✓ differenza di concentrazione
- ✓ differenza di potenziale elettrico
- ✓ permeabilità della membrana

I movimenti degli ioni dovuti al gradiente di concentrazione ed a quello di potenziale si chiamano ***meccanismi di trasporto passivo*** e sono regolati dalla permeabilità della membrana.

La permeabilità della membrana dipende dalle sue condizioni fisico-chimiche ed è diversa per ciascuna specie ionica.

# BIOELETTICITÀ

La diffusione degli ioni attraverso la membrana obbedisce alla legge di Fick:

$$J = P \cdot \Delta c$$

con i seguenti valori della permeabilità  $P$ :

✓ elevata per gli ioni  $K^+$  e  $Cl^-$

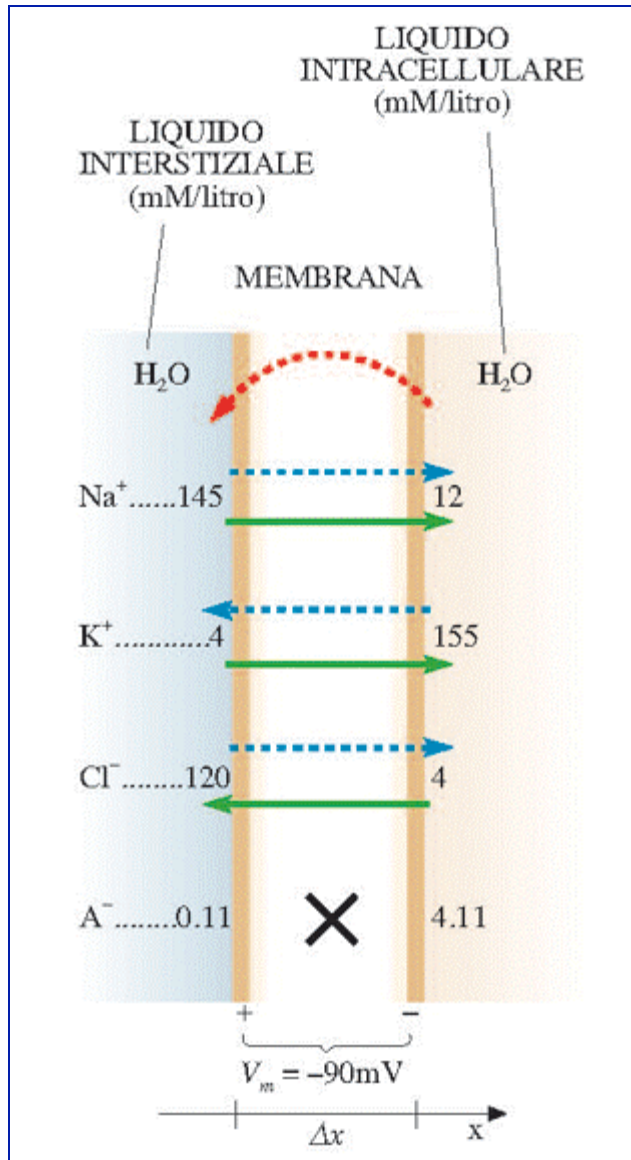
$$(P_K = 1 \cdot 10^{-6} \text{ cm/s}; P_{Cl} = 4 \cdot 10^{-6} \text{ cm/s});$$

✓ ridotta per gli ioni  $Na^+$  ( $P_{Na} = 2 \cdot 10^{-8} \text{ cm/s}$ );

✓ nulla per gli ioni proteici  $A^-$ .

La presenza di ioni non diffusibili è causa della formazione di un sottile strato di cariche di segno opposto sulle due facce della membrana, da cui ha origine il potenziale di membrana.

# BIOELETTRICITÀ



I meccanismi di trasporto passivo sono schematizzati dalle frecce verdi e blu: a tratto pieno il gradiente di potenziale elettrico e a tratto punteggiato il gradiente di concentrazione.

La freccia rossa punteggiata rappresenta il meccanismo attivo pompa sodio-potassio.



# BIOELETTRICITÀ

Per gli ioni permeabili le condizioni di equilibrio sono determinate dall'**equazione di Nernst**:

$$V_N = V_1 - V_2 = \frac{RT}{ZeN_A} \ln \frac{[S]_2}{[S]_1}$$

$V_N$ : potenziale di Nernst

$Z$ : valenza (n.ro di elettroni coinvolti)

L'equazione di Nernst consente di calcolare la differenza di potenziale che deve essere applicata alla membrana, affinché lo ione permeabile mantenga inalterate le concentrazioni  $[S]_1$  ed  $[S]_2$  nei due liquidi.

# BIOELETTRICITÀ

Concentrazioni ioniche e relativo potenziale di Nernst calcolato (da confrontare con il potenziale di membrana a riposo misurato sperimentalmente, pari a  $-90$  mV).

IONE	INTERSTIZIALE (mol/m <sup>3</sup> )	INTRACELLULARE (mol/m <sup>3</sup> )	POTENZIALE DI NERNST (mV)
POTASSIO K <sup>+</sup>	4	155	-97
SODIO Na <sup>+</sup>	145	12	+66
TOTALE CATIONI	149	167	
CLORO Cl <sup>-</sup>	120	4	-90
PROTEICI A <sup>-</sup>	29	163	
TOTALE ANIONI	149	167	
POTENZIALE	0 mV	-90 mV	

# BIOELETTICITÀ

Il confronto fra i dati sperimentali e le condizioni di equilibrio previste dall'equazione di Nernst portano a concludere che:

- ✓ per lo ione  $\text{Cl}^-$  sussistono le condizioni di equilibrio;
- ✓ per lo ione  $\text{K}^+$  il rapporto fra le concentrazioni è leggermente maggiore di quello previsto per l'equilibrio;
- ✓ per lo ione  $\text{Na}^+$  il segno del potenziale di equilibrio è opposto a quello sperimentalmente osservato.

# BIOELETRICITÀ

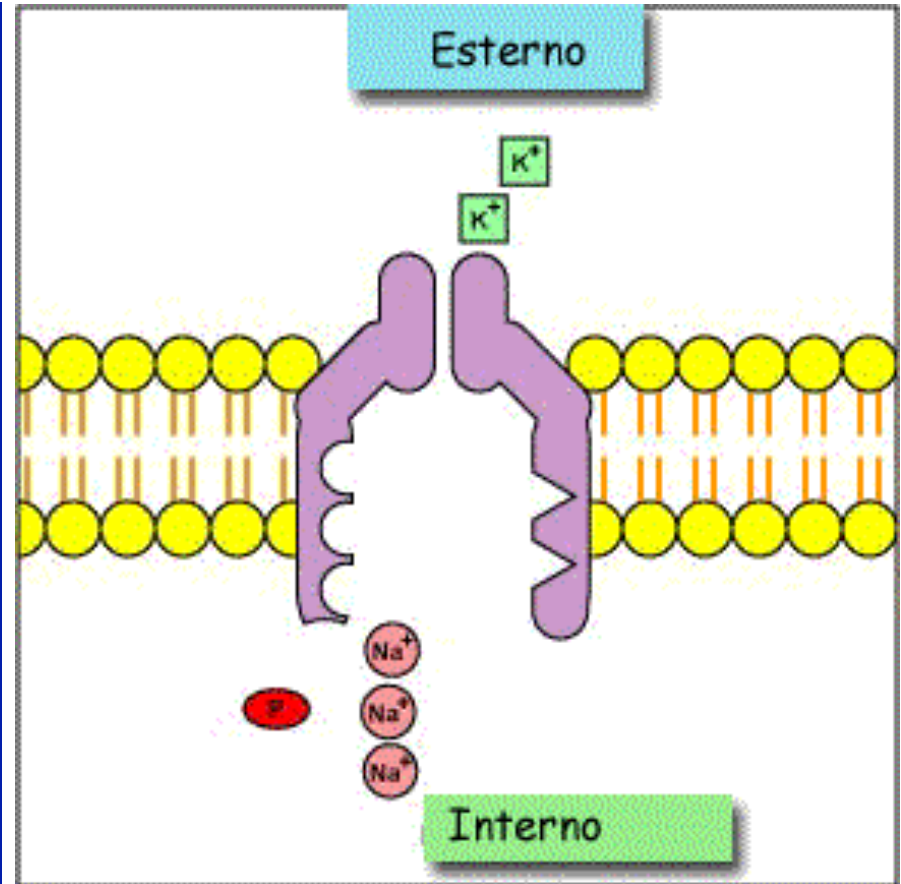
I meccanismi di trasporto passivo spiegano solo l'equilibrio dello ione  $\text{Cl}^-$ , ma non rendono conto delle concentrazioni misurate per gli ioni  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ .

Se ci fossero solo i meccanismi di trasporto passivo si dovrebbero infatti verificare:

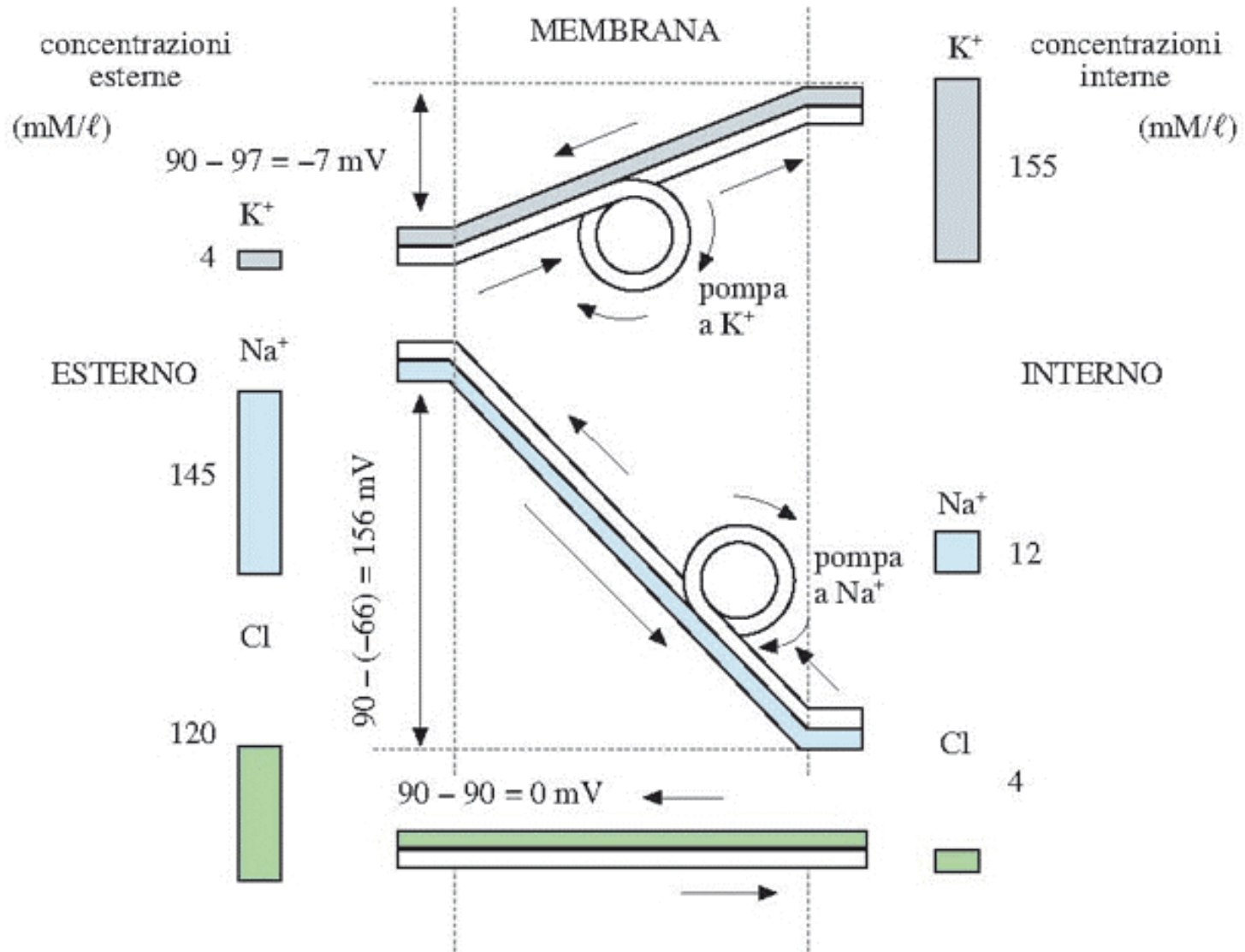
- ✓ un leggero flusso di ioni  $\text{K}^+$  verso l'esterno;
- ✓ un consistente flusso di ioni  $\text{Na}^+$  verso l'interno limitato solo dalla scarsa permeabilità della membrana al sodio.

# BIOELETTRICITÀ

Esiste però un meccanismo di trasporto attivo, detto ***pompa sodio-potassio*** per stabilire un flusso di ioni  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  contro i rispettivi gradienti di concentrazione. Tale meccanismo è mediato da proteine di trasporto e compiuto dalla cellula a spese della sua energia metabolica.



# BIOELETTRICITÀ



# BIOELETTRICITÀ

Prendendo in considerazione sia il trasporto passivo sia il trasporto attivo ione per ione, la condizione d'equilibrio è descritta dall'equazione di Goldman.

## Equazione di Goldman

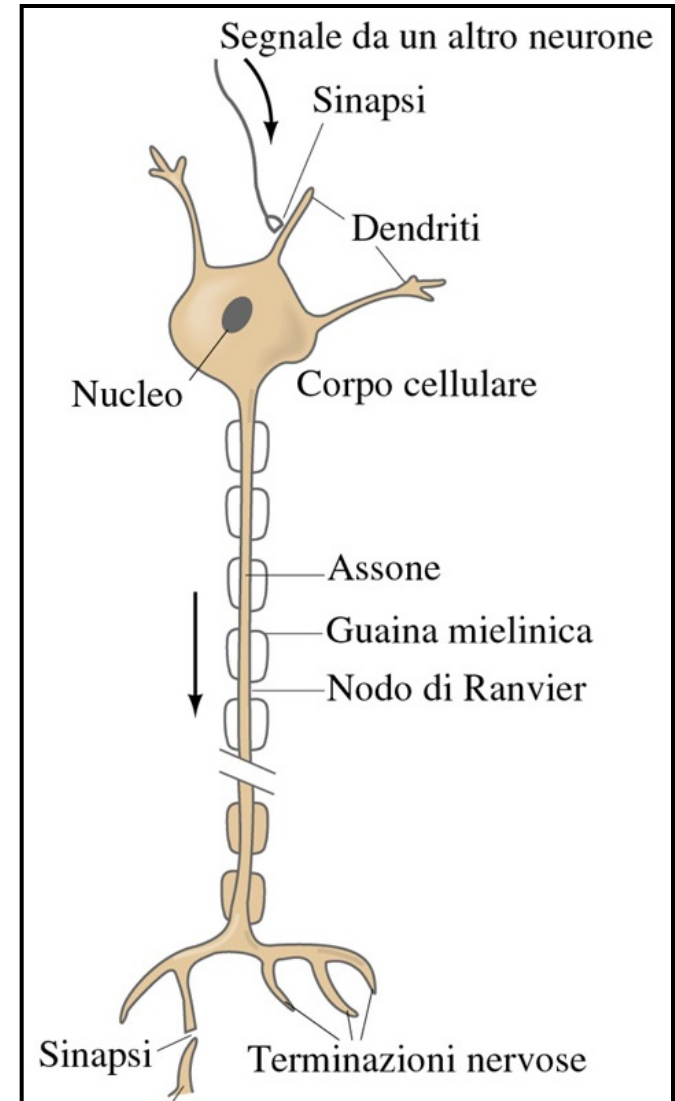
$$V_m = V_i - V_e = -\frac{RT}{N_A e Z} \ln \frac{P_K [K^+]_i + P_{Na} [Na^+]_i}{P_K [K^+]_e + P_{Na} [Na^+]_e}$$

Utilizzando i valori delle concentrazioni misurate ed ipotizzando un rapporto  $P_K/P_{Na} = 100$ , si ottengono i valori misurati del potenziale di membrana.

# BIOELETTRICITÀ

La trasmissione dell'informazione all'interno di un organismo umano avviene mediante impulsi elettrici che si propagano in cellule nervose, dette **neuroni**.

Il neurone si compone di un corpo centrale, cui sono attaccati alcuni filamenti (**dendriti**) ed una lunga appendice filiforme (**assone**) che in alcuni casi può raggiungere la lunghezza di 1 m.





# BIOELETTICITÀ

La membrana del neurone ha la proprietà di essere ***eccitabile***, cioè ha la capacità di reagire ad uno stimolo e di far propagare un segnale elettrico.

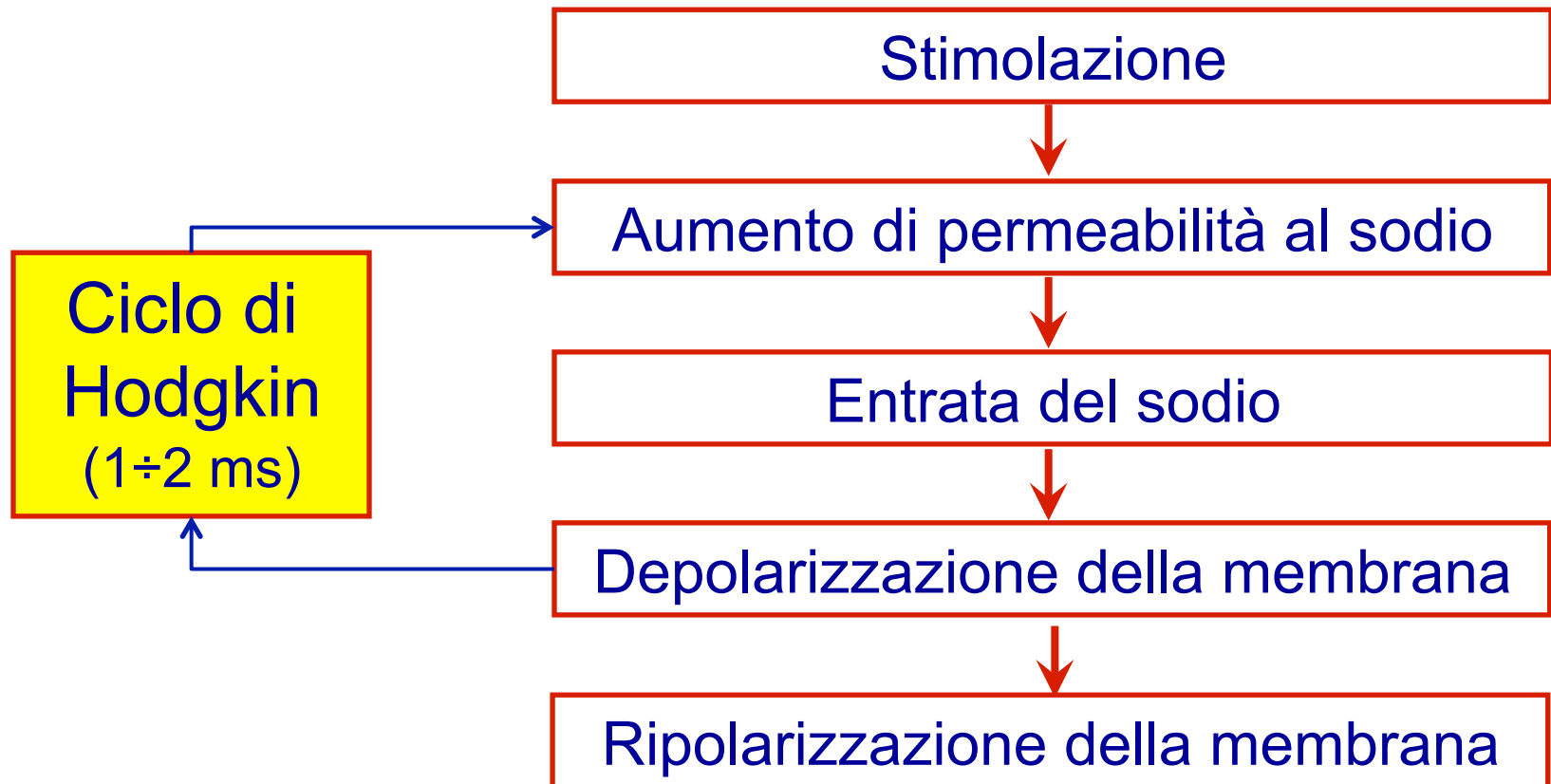
Lo stimolo può essere di varia natura: termico, chimico, meccanico, luminoso, elettrico, ecc..

Lo stimolo produce una ***depolarizzazione*** della membrana, cioè un aumento del potenziale interno alla cellula al di sopra della soglia di  $-50$  mV circa.

La ***depolarizzazione*** produce rapide variazioni del potenziale di membrana, che costituiscono un segnale elettrico che si propaga lungo l'assone, detto ***potenziale d'azione***.

# POTENZIALE D'AZIONE

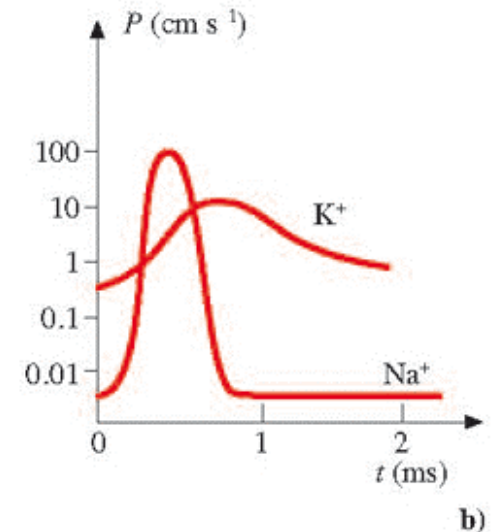
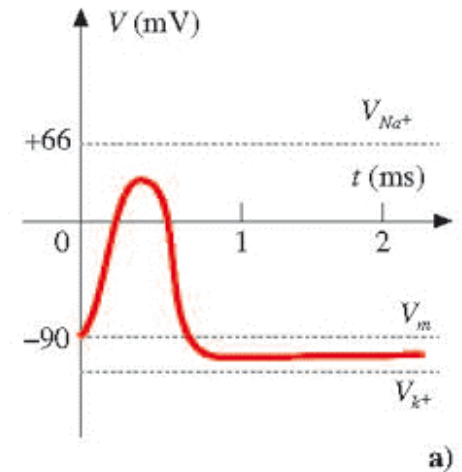
Quando la d.d.p. di membrana, a causa di una stimolazione, supera un valore di soglia ( $\approx -50$  mV), si produce un brusco aumento della permeabilità al  $\text{Na}^+$ , di durata limitata (1÷2 ms).



# POTENZIALE D'AZIONE

Alla depolarizzazione segue una fase di ripolarizzazione: si riduce la permeabilità degli ioni  $\text{Na}^+$  ed aumenta la permeabilità degli ioni  $\text{K}^+$ , che di conseguenza fluiscono all'esterno della cellula. La loro uscita fa diminuire il potenziale interno che ritorna ai valori di riposo.

Dopo pochi ms dall'inizio del processo le permeabilità ritornano ai valori normali e l'azione della pompa sodio-potassio ripristina le condizioni di riposo.



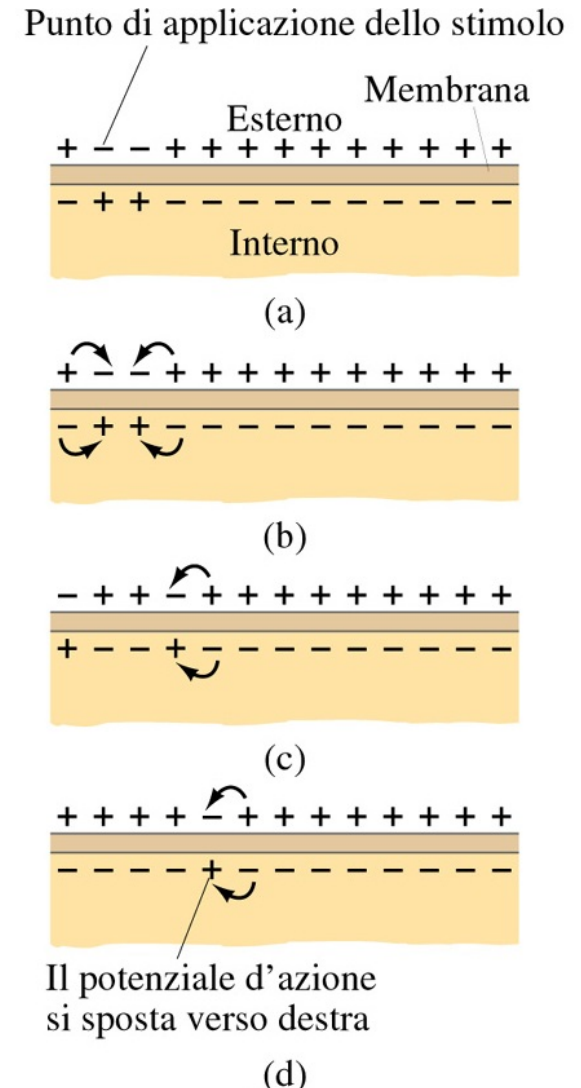
# POTENZIALE D'AZIONE

Il sodio entrato nella cellula nella regione della depolarizzazione è attratto dalle regioni adiacenti.

Mentre la membrana torna nello stato di riposo nel punto in cui è stata stimolata, il potenziale d'azione si manifesta nei punti vicini.

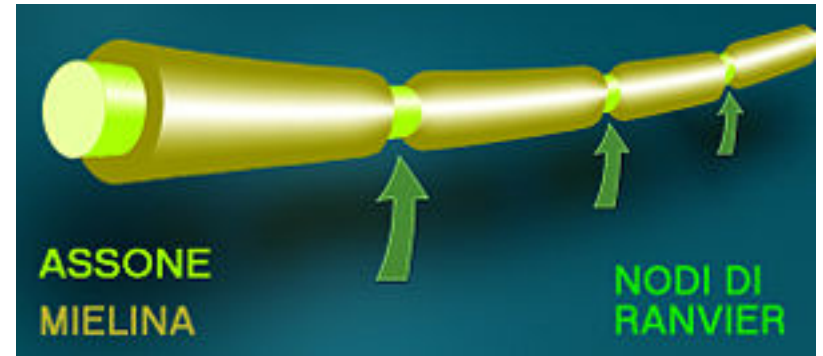
Con questo meccanismo il potenziale d'azione si propaga lungo tutta la membrana dell'assone.

Gli ioni scambiati durante la propagazione del potenziale d'azione non modificano sensibilmente le concentrazioni interne.



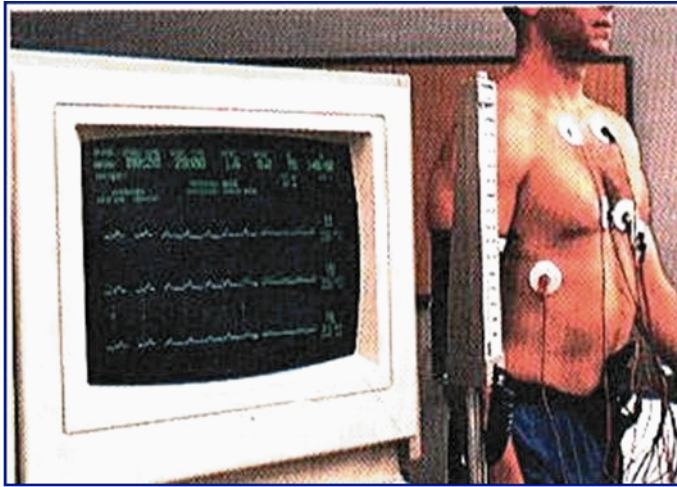
# POTENZIALE D'AZIONE

Gli assoni del sistema nervoso periferico sono ricoperti di una **guaina mielinica**, cioè di un rivestimento che isola l'assone dall'ambiente esterno tranne in alcuni punti detti **nodi di Ranvier**.

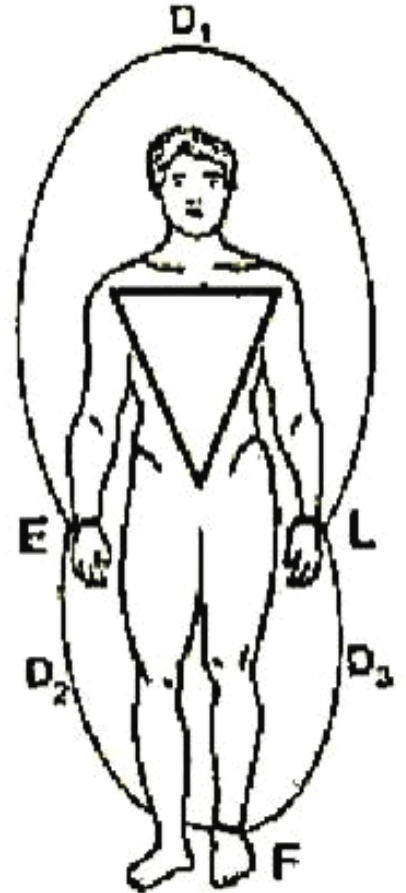


La struttura intervallata della guaina mielinica permette all'impulso elettrico di "saltare" da un nodo all'altro ed essere trasmesso così più velocemente da neurone a neurone. Si parlerà in questo caso di **conduzione saltatoria**, mentre per l'impulso che viaggia su tutta la fibra si parlerà di **conduzione puntiforme**.

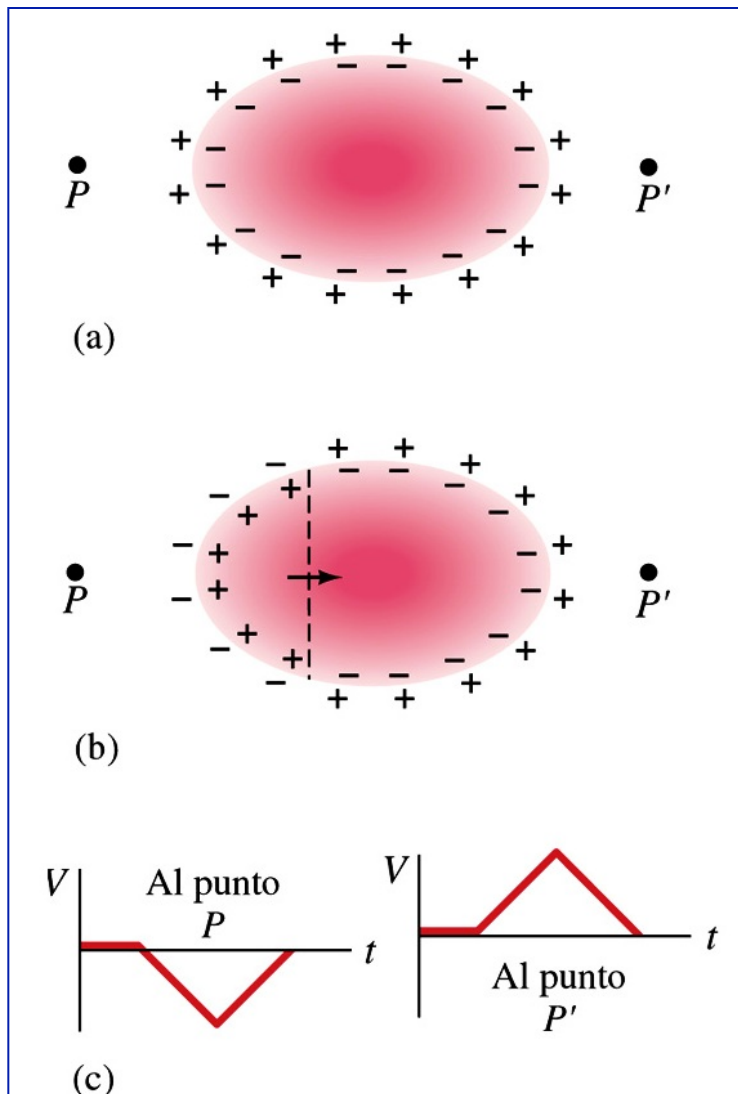
# ELETTROCARDIOGRAFIA



L'attività del cuore è attivata da impulsi elettrici, che stimolano la contrazione dei muscoli. Si producono, quindi, segnali elettrici che raggiungono la superficie del corpo e possono essere registrati in un tracciato chiamato **elettrocardiogramma (ECG)**.



# ELETTROCARDIOGRAFIA

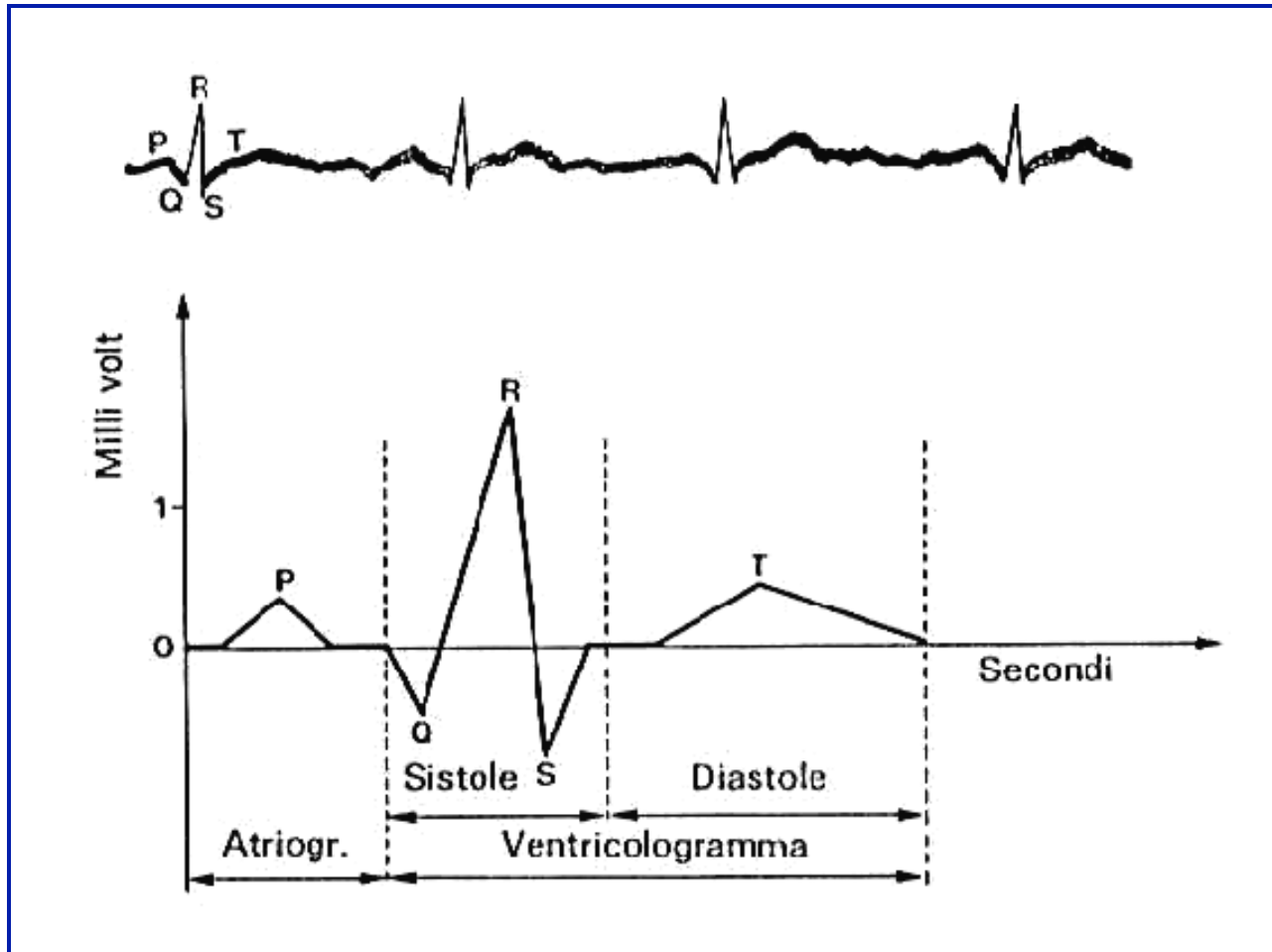


Una cellula di muscolo cardiaco che mostra:

- (a) lo strato di dipoli elettrici nello stato di riposo;
- (b) la depolarizzazione crescente della cellula quando il muscolo inizia a contrarsi;
- (c) il potenziale  $V$  nei punti  $P$  e  $P'$  in funzione del tempo.

# ELETTROCARDIOGRAFIA

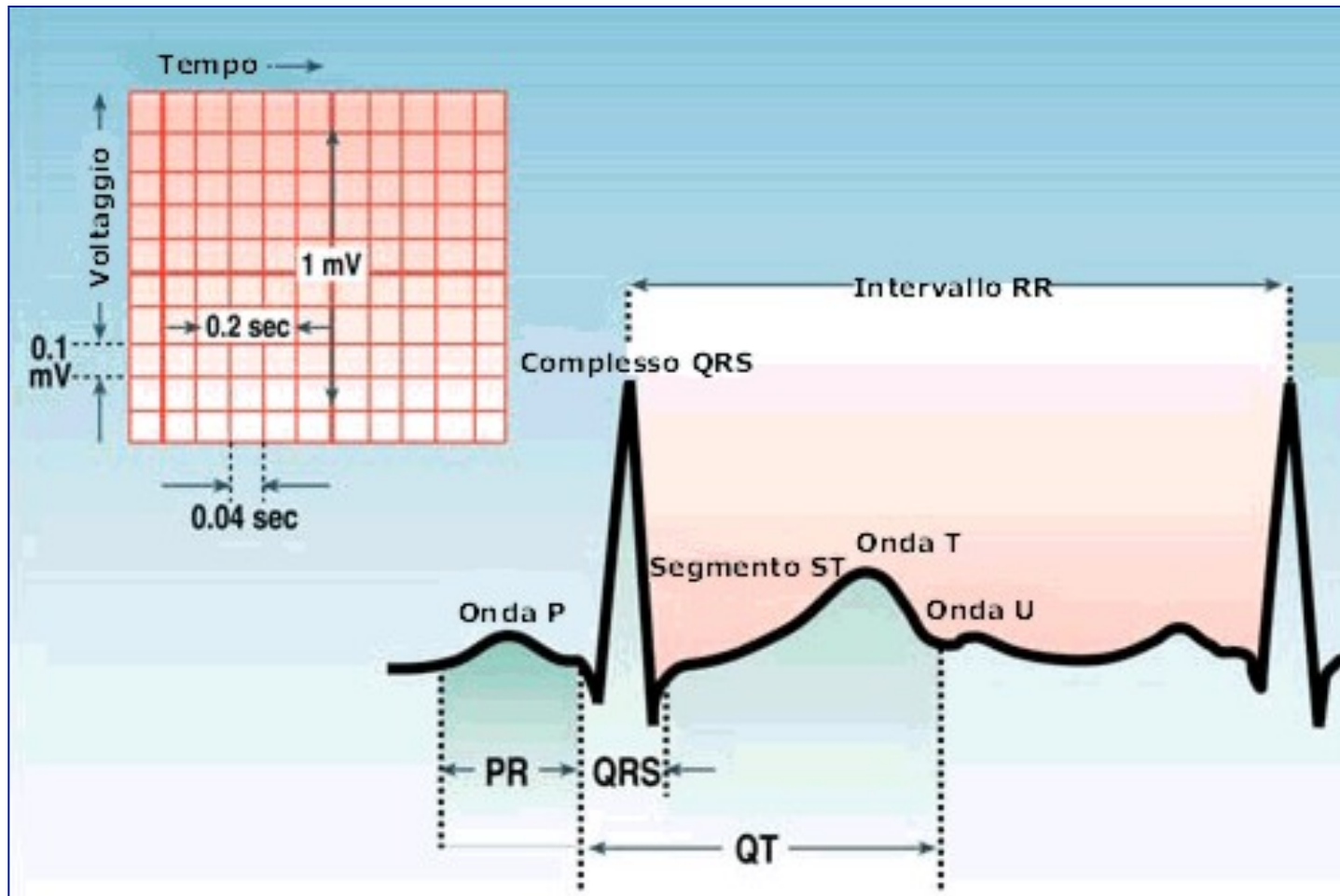
## Caratteristiche di un tracciato ECG





# ELETTROCARDIOGRAFIA

## Caratteristiche di un tracciato ECG



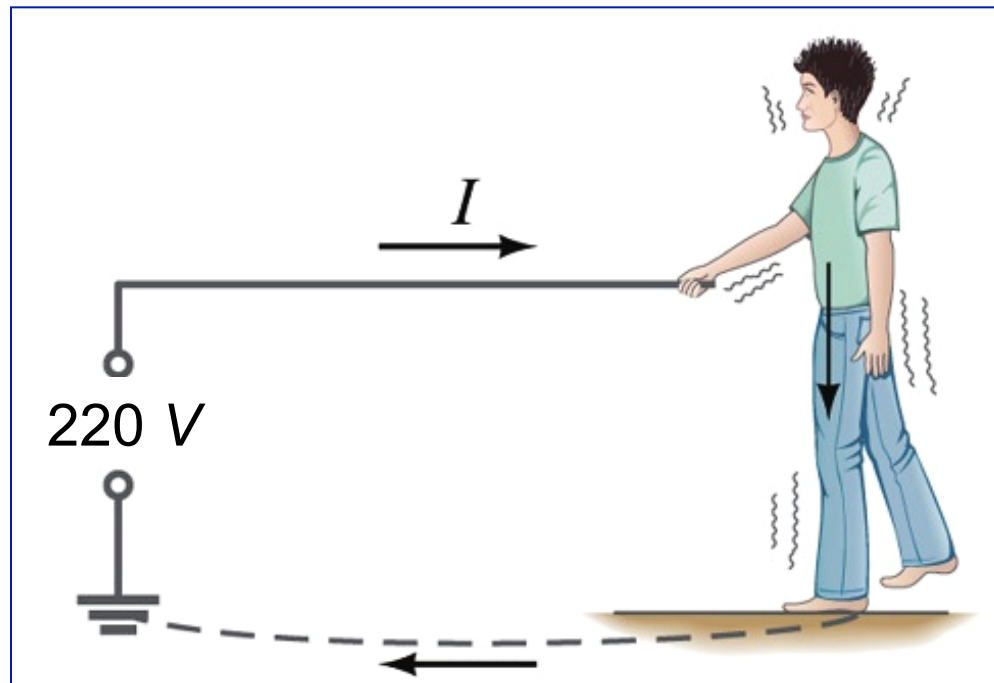
# PACE-MAKER CARDIACO

Quando gli impulsi elettrici prodotti dal sistema nervoso per l'attività cardiaca sono deboli o assenti, si può impiantare un dispositivo che fa le funzioni di uno stimolatore elettrico.

I moderni pace-maker hanno la caratteristica di rilevare i segnali elettrici provenienti dal sistema nervoso ed intervenire adeguando lo stimolo elettrico alle necessità. Possono essere programmati dall'esterno per variarne i parametri di funzionamento.

# NORME DI SICUREZZA

Una corrente che passa attraverso l'organismo umano produce danni che dipendono dalla intensità di corrente e dalla sua durata. È difficile quantificare i danni prodotti, perché essi dipendono anche dalle regioni del corpo umano attraversate.



# NORME DI SICUREZZA

Effetti prodotti dalla corrente che attraversa l'organismo umano per la durata di 1 s (ad una frequenza di 50 Hz):

Corrente (mA)	Effetto
1 .....	soglia di sensibilità
5 .....	massimo tollerato senza conseguenze
10-20 .....	contrazione muscolare
50 .....	dolore, svenimento
100-300 .....	fibrillazione ventricolare
300 .....	bruciature
6 A .....	contrazione ventricolare, paralisi respiratoria, defibrillatore

# NORME DI SICUREZZA

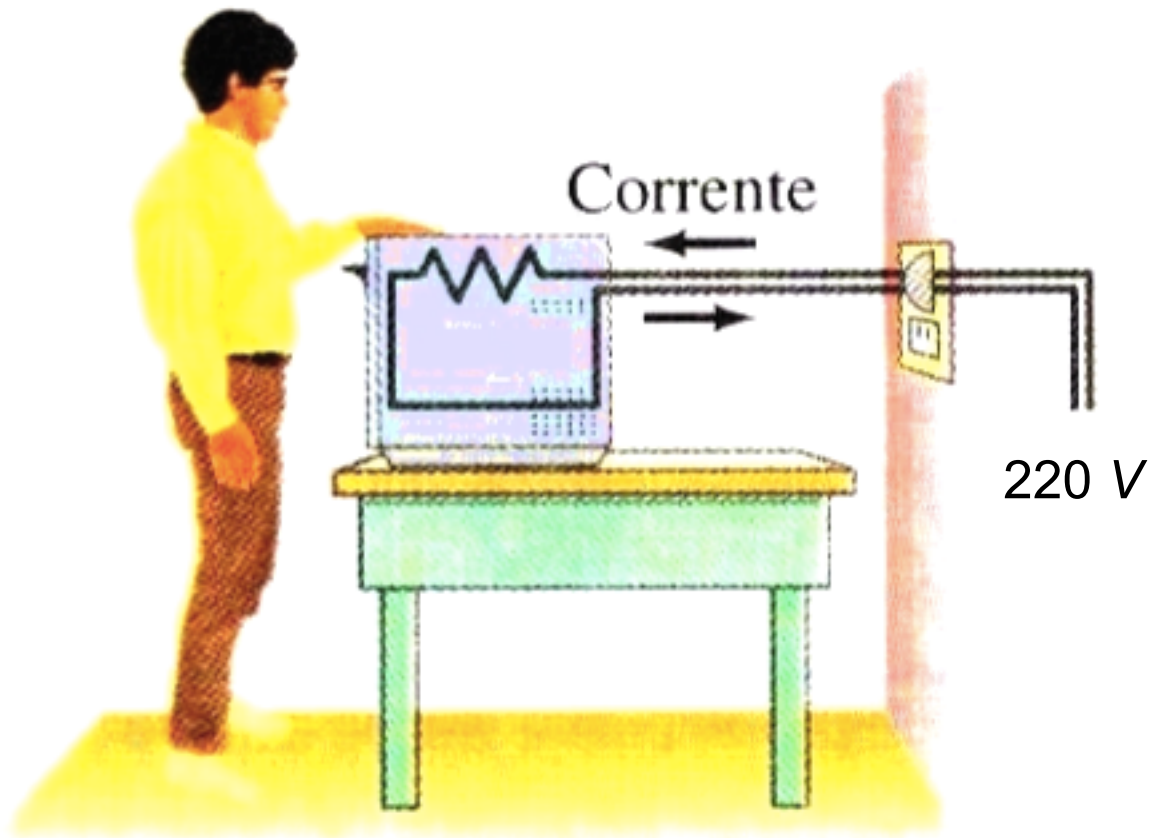
Affinché una corrente possa attraversare l'organismo umano, quest'ultimo deve far parte di un circuito, cioè occorre che sia a contatto con due punti a differente potenziale (es. un punto ad alta tensione ed un punto al suolo).

Precauzioni da osservare:

- usare apparecchiature elettriche a tre uscite;
- isolare il paziente.

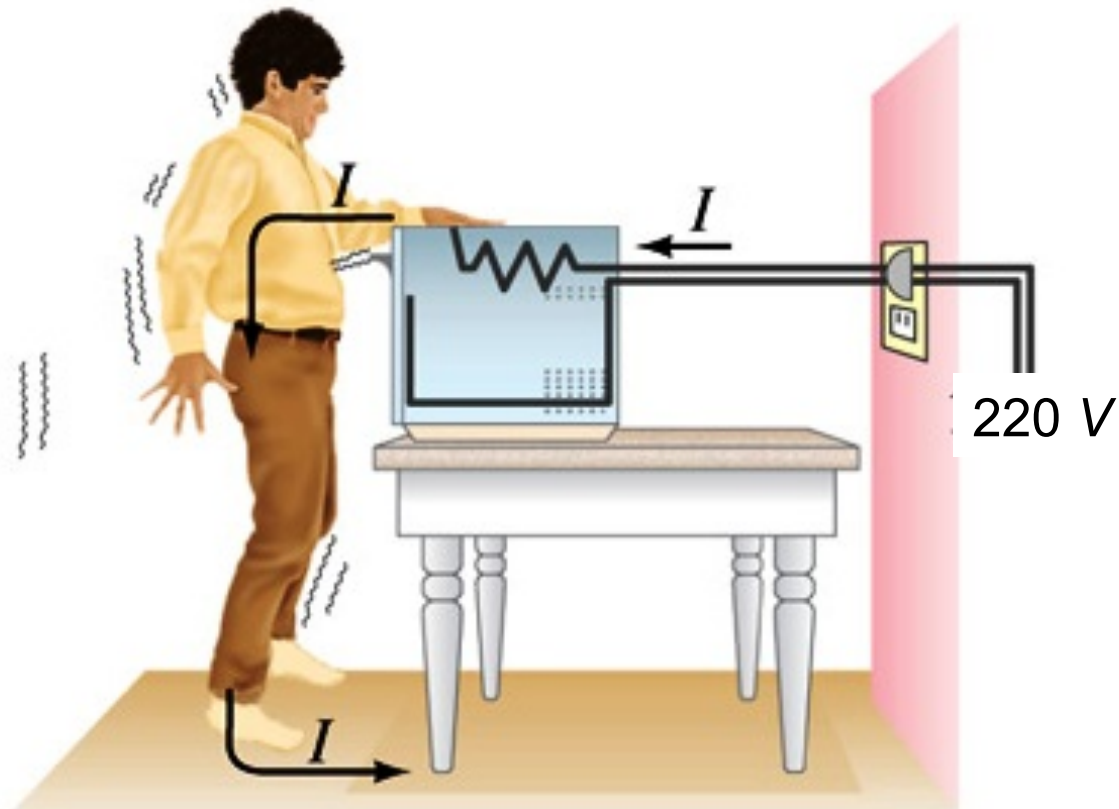
# NORME DI SICUREZZA

Dispositivo funzionante correttamente con una spina doppia.



# NORME DI SICUREZZA

Cortocircuito con l'involucro del dispositivo, quando l'involucro non è messo a terra: scossa.



# NORME DI SICUREZZA

Cortocircuito con l'involucro messo a terra tramite il terzo polo della spina.

