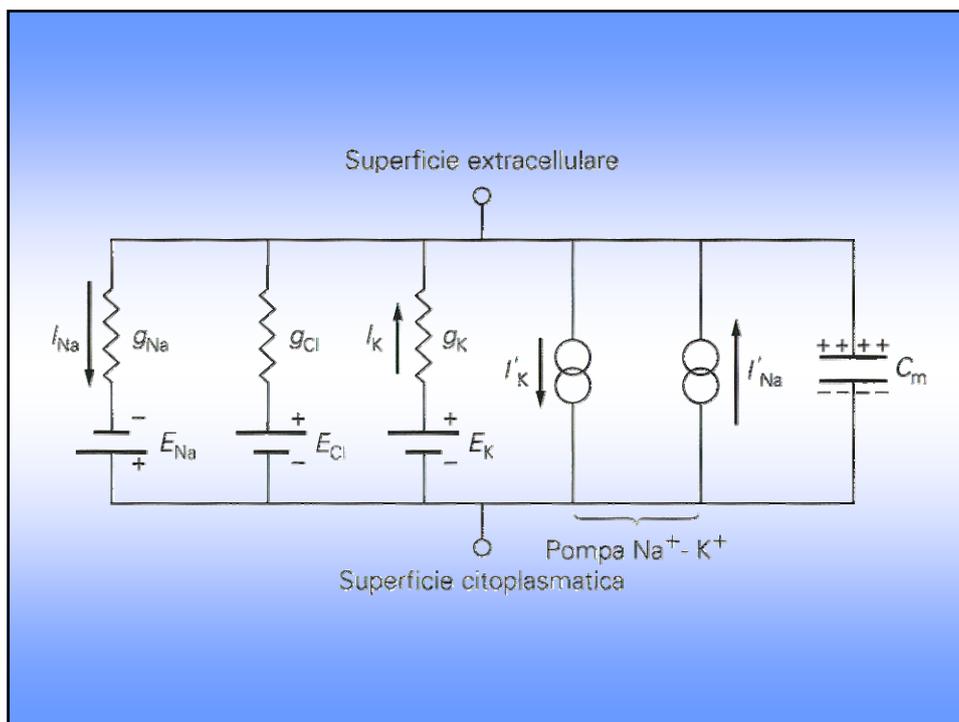


## Equazione di Nerst

$$E_X = \frac{RT}{zF} \ln \frac{[X]_e}{[X]_i}$$

## Equazione di Goldman

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



## PROPRIETA' PASSIVE DEI NEURONI

I NEURONI posseggono proprietà passive importanti:

Resistenza della membrana a riposo

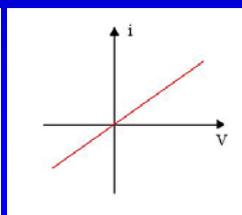
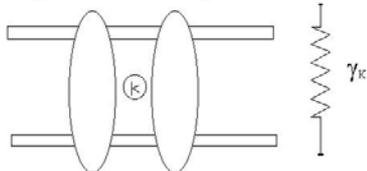
Capacità della membrana

Resistenza assiale intracellulare dell'assone

## MODELLIZZAZIONE ELETTRICA dei CANALI IONICI

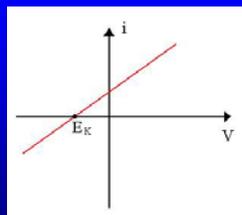
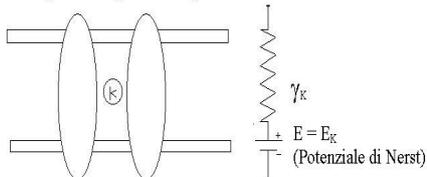
Es: canali passivi del potassio

Canale passivo in assenza di gradiente di concentrazione



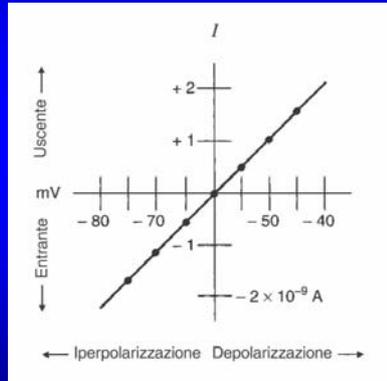
$$i_K = \gamma_K V_m$$

Canale passivo in presenza di gradiente di concentrazione



$$i_K = \gamma_K (V_m - E_K)$$

## Resistenza della membrana



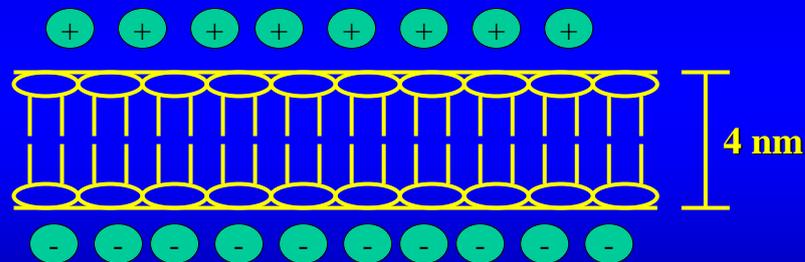
$$\Delta V = I \times R_{in}$$

$R_m$  = resistenza  
specifica di membrana,  
in  $\Omega/\text{cm}^2$

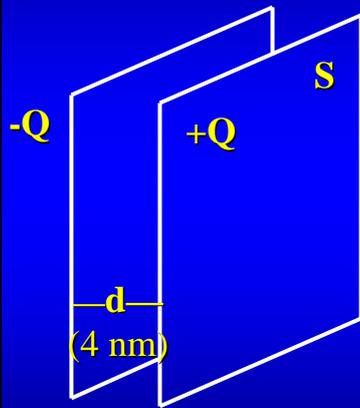
$$R_{in} = R_m / 4\pi r^2$$

## Capacità Elettrica

### Membrana plasmatica



## Capacità della membrana



$$V = Q/C$$

$$\Delta V = \Delta Q/C$$

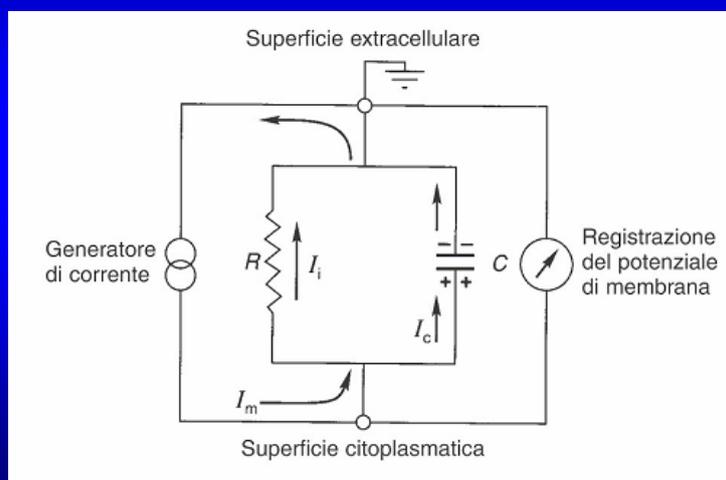
$$\Delta V = I_c \Delta t/C$$

$C_m$  = capacità  
specifica di membrana,  
circa  $1 \mu\text{F}/\text{cm}^2$

$$C_{in} = C_m (4\pi r^2)$$

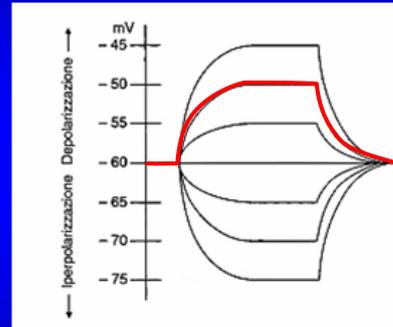
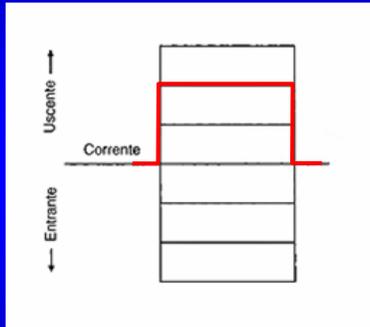
## PROPRIETA' PASSIVE DEI NEURONI

### Equivalente Elettrico di una Membrana plasmatica



## FENOMENI TRANSITORI e COSTANTE DI TEMPO “ $\tau$ ”

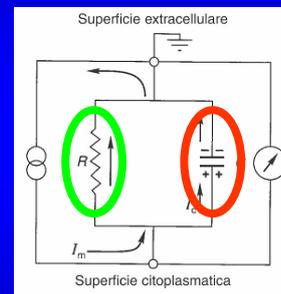
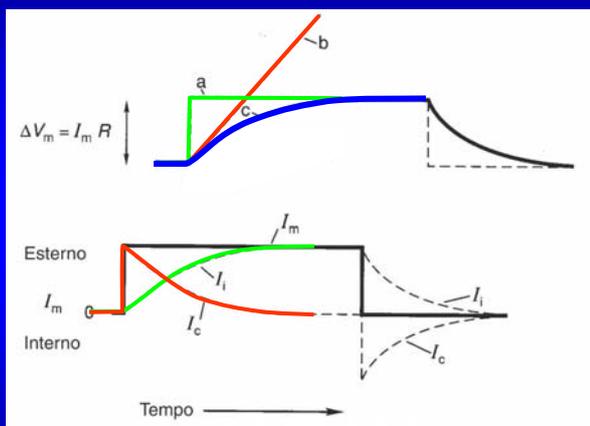
### Variazione di potenziale (impulso di corrente)



La capacità di membrana riduce la velocità con cui varia il potenziale di membrana in risposta ad un impulso di corrente

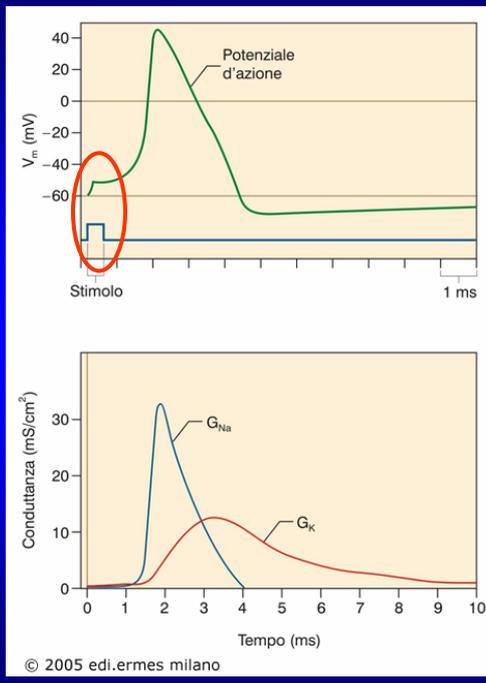
## FENOMENI TRANSITORI e COSTANTE DI TEMPO “ $\tau$ ”

### Variazione di potenziale (impulso di corrente)



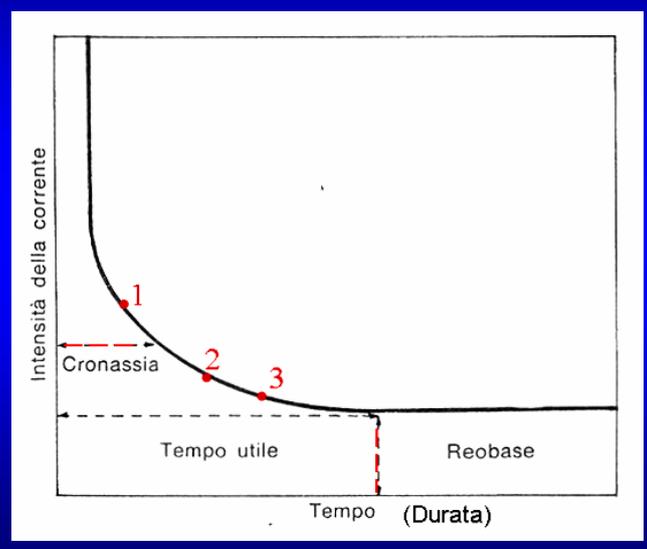
$$\Delta V(t) = I_m R_m (1 - e^{-t/\tau})$$

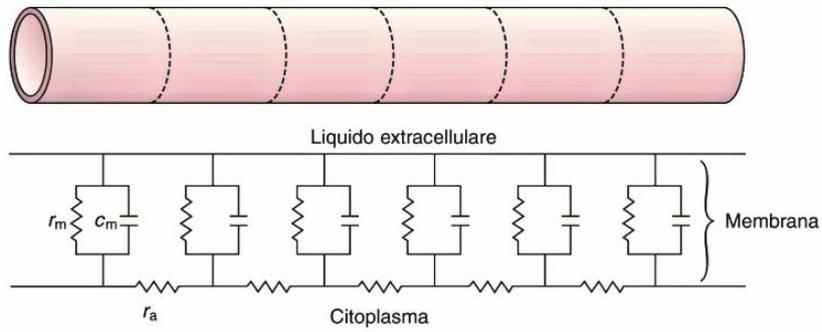
$$\tau = R_m C_m \text{ [s]}$$



A causa delle caratteristiche passive della membrana, uno stimolo, per essere efficace, deve avere una certa ampiezza ed una certa durata. Entro un certo range, queste due grandezze sono interdipendenti

## Curva intensità-durata



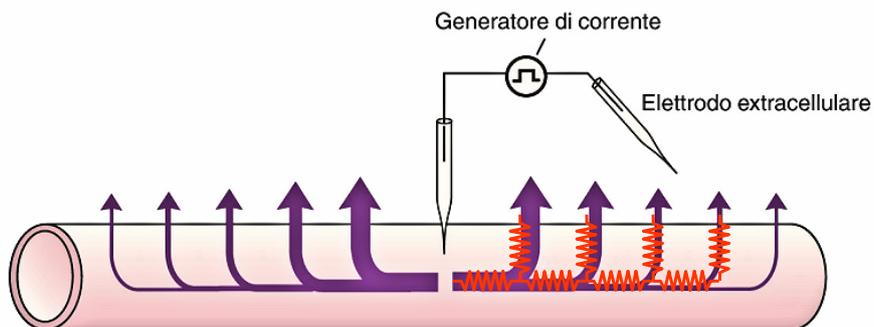


$$r_m = \frac{R_m}{2\pi a}$$

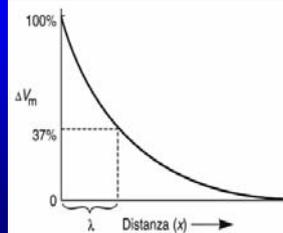
$$r_a = \frac{\rho_a}{\pi a^2}$$

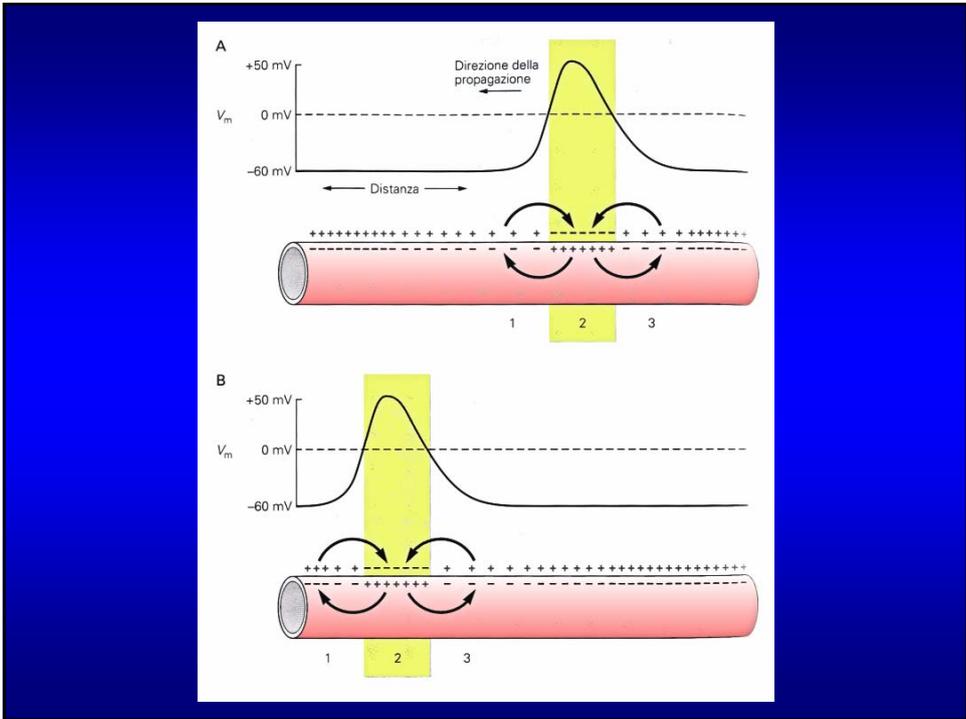
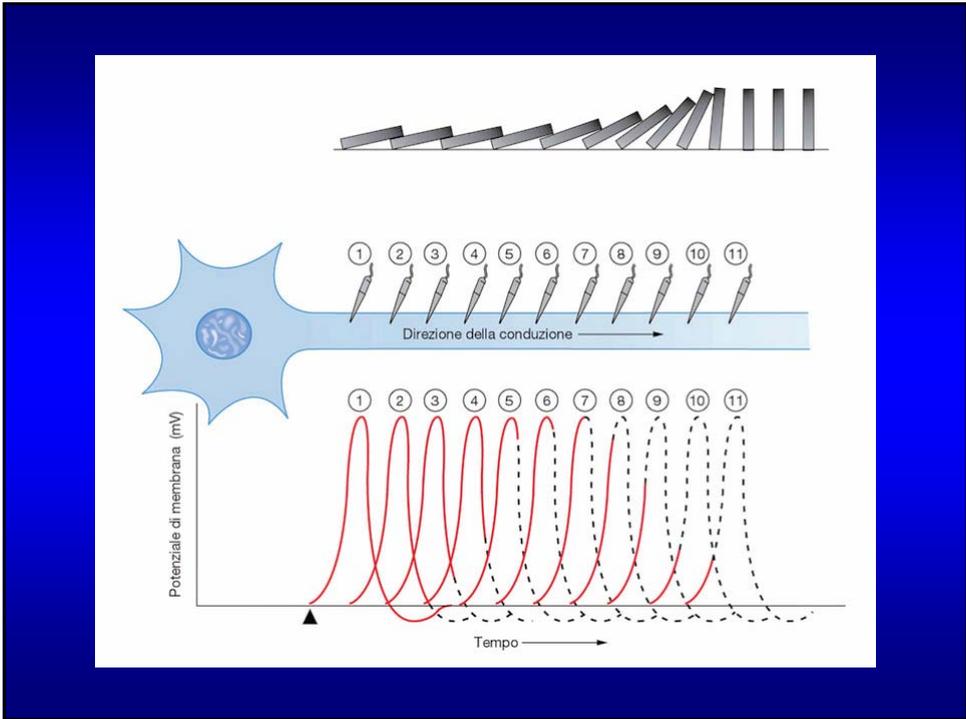
$R_m$  = resistenza specifica di un'unità di area della membrana [ $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ]

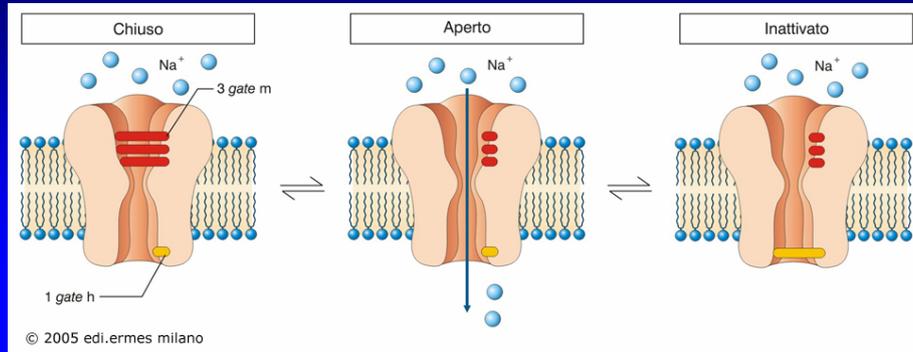
$\rho_a$  = resistenza specifica di un'unità di volume di citoplasma [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ]



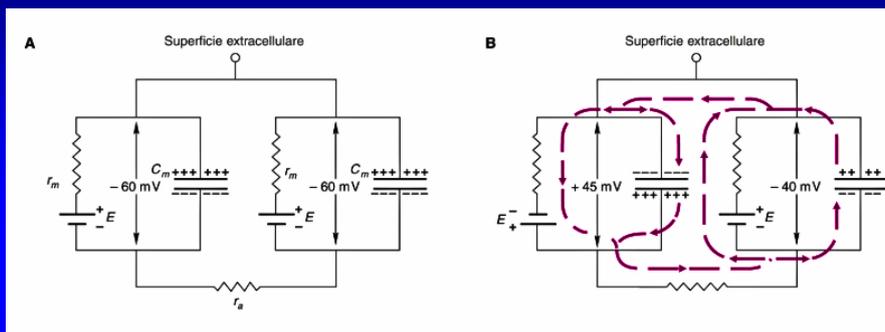
$$\Delta V(x) = \Delta V_0 e^{-\frac{x}{\lambda}} \quad \lambda = \sqrt{\frac{r_m}{r_a}}$$



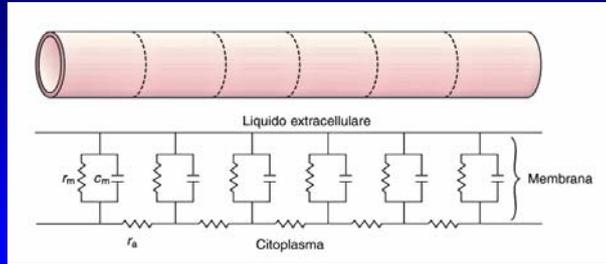




**Il periodo di refrattarietà costringe il potenziale d'azione a procedere in avanti (conduzione ortodromica). Inoltre, limita la frequenza massima con cui il neurone può generare potenziali d'azione.**



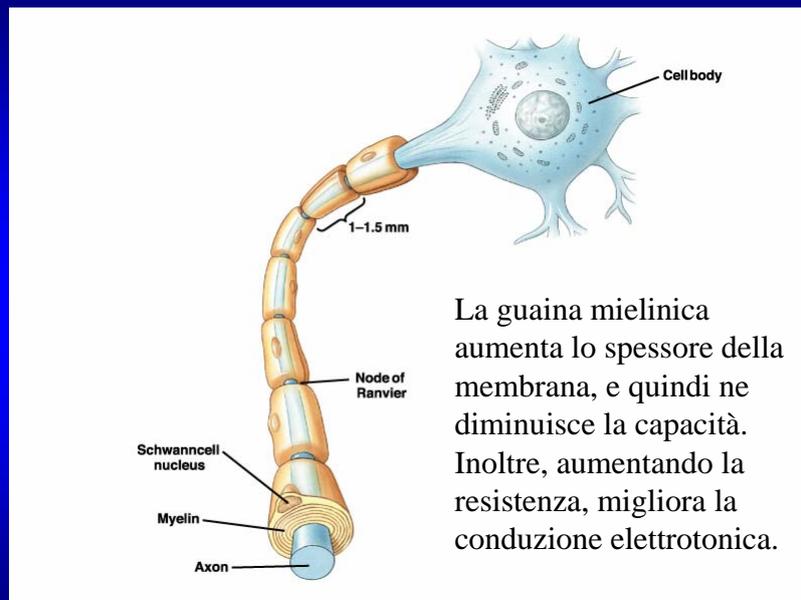
**La resistenza assiale e la capacità della membrana limitano la velocità con cui la depolarizzazione si propaga nel corso del potenziale d'azione**



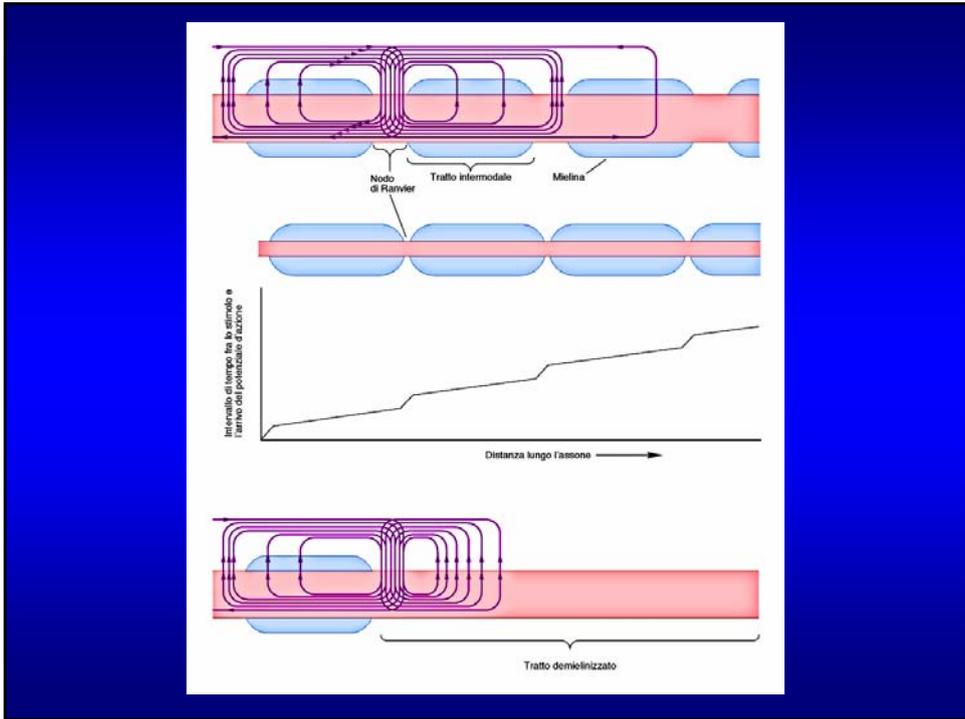
Il tempo necessario perché la depolarizzazione si propaghi lungo l'assone è funzione di  $r_a$  e di  $C_m$

$$v \sim 1/r_a C_m$$

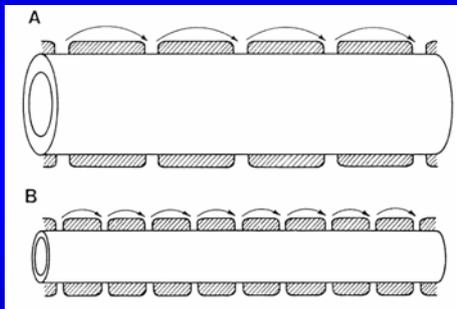
**Per aumentare la velocità di propagazione si può o aumentare il diametro assiale della fibra nervosa o diminuire la capacità della membrana**



La guaina mielinica aumenta lo spessore della membrana, e quindi ne diminuisce la capacità. Inoltre, aumentando la resistenza, migliora la conduzione elettrotonica.



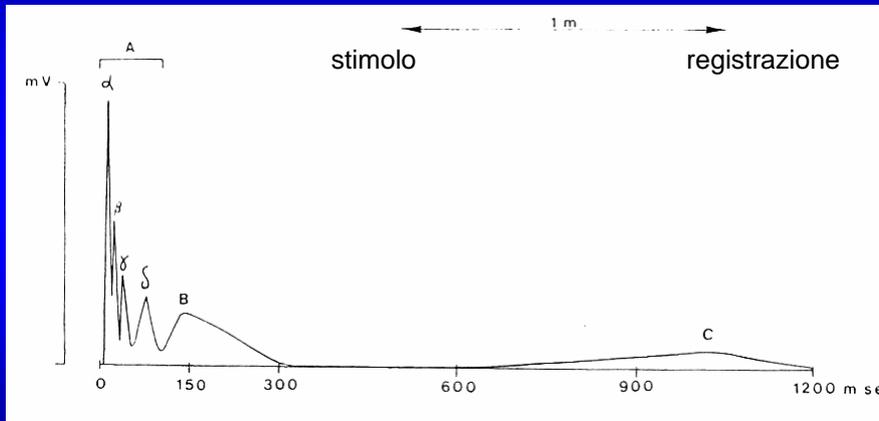
La velocità di propagazione dipende dal numero di nodi che il p. a. deve saltare



Le fibre con diametro maggiore presentano un numero minore di nodi. Conducono perciò più rapidamente. Per le fibre di tipo A, vale la seguente approssimazione :

$$V \text{ (m/sec)} = 6 \text{ D } (\mu\text{m})$$

## Potenziale composto di un nervo

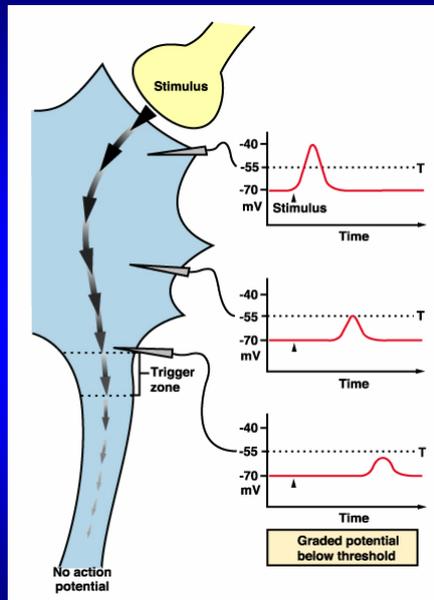


## Classificazioni delle fibre nervose

Tipo di fibra	Funzione (es.)	Diametro medio (μm)	Velocità di conduzione media
Aα	Afferenze primarie dei fusi neuromuscolari, α-motoneuroni	15	100 m/s (70-120)
Aβ	Afferenze cutanee per tatto e pressione	8	50 m/s (30-70)
Aγ	γ -motoneuroni	5	20 m/s (15-30)
Aδ	Afferenze cutanee per temperatura e nocicezione	3	15 m/s (12-30)
B	Simpatiche pregangliari	<3	7 m/s (3-15)
C Amieliniche	Afferenze cutanee per nocicezione, Efferenze simpatiche postgangliari	1	1 m/s (0,5-2)

### Fibre afferenti

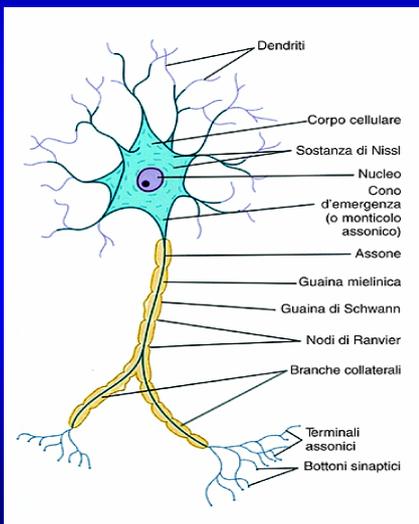
Gruppi	Funzione (es.)	Diametro medio (μm)	Velocità di conduzione media
I	Afferenze primarie dei fusi neuromuscolari e degli organi tendinei	13	75 m/s (70-120)
II	Meccanocettori cutanei	9	55 m/s (25-70)
III	Sensibilità profonda muscolare	3	11 m/s (10-25)
IV	Fibre nocicettive amieliniche	1	1 m/s



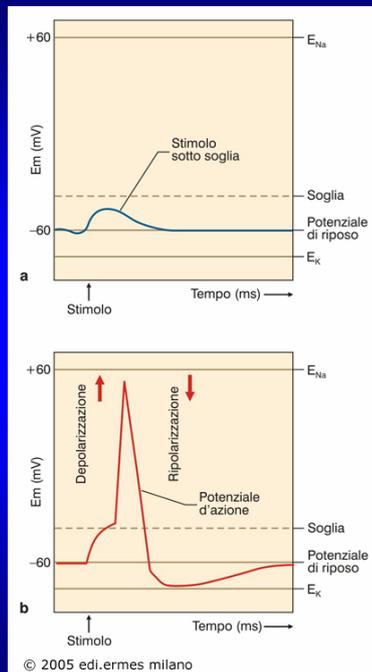
Il potenziale d'azione viene generato in una zona specifica del neurone, detta *trigger zone*.

I potenziali, a monte di questa zona, si propagano secondo il modello della conduzione assonale passiva.

## Le varie regioni del neurone sono provviste di differenti tipi di canali voltaggio-dipendenti



- Dendriti: canali per  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$  e a volte  $Na^+$
- Zona d'innescio: alta densità di canali per  $Na^+$
- Assone: bassa densità di canali per  $Na^+$  e  $K^+$
- Terminazioni: canali per  $Ca^{2+}$



Soglia: depolarizzazione minima che la membrana deve raggiungere per far nascere un potenziale d'azione.

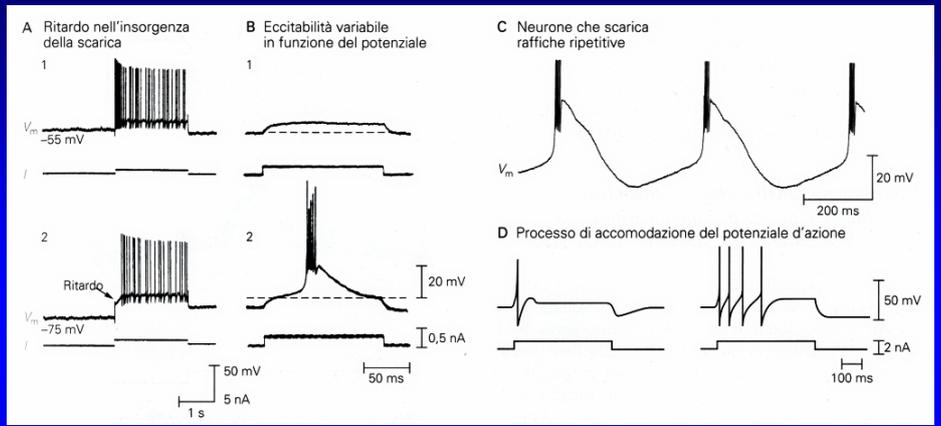
L'aumento di permeabilità al sodio è tale da fare entrare nella cellula una quantità di sodio superiore alla quantità di ioni potassio che escono. Il potassio non è più in grado di bilanciare gli effetti dell'entrata del sodio, ha luogo il processo autorigenativo per il sodio.



Alcune tossine agiscono bloccando in modo specifico alcuni canali: il TEA (tetraetilammonio) blocca i canali per il  $K^+$ , mentre la tetrodotossina (TTX, contenuta nel pesce palla) blocca i canali per il  $Na^+$



Un piatto di sushi di pesce palla (*fugu sushi*), preparato in maniera impropria può risultare letale



**Le caratteristiche della frequenza di scarica sono molto variabili da un neurone all'altro in quanto ciascun neurone possiede un diverso corredo di canali ionici voltaggio-dipendenti.**