



Feb 15 2025

中研院高中生培育計畫

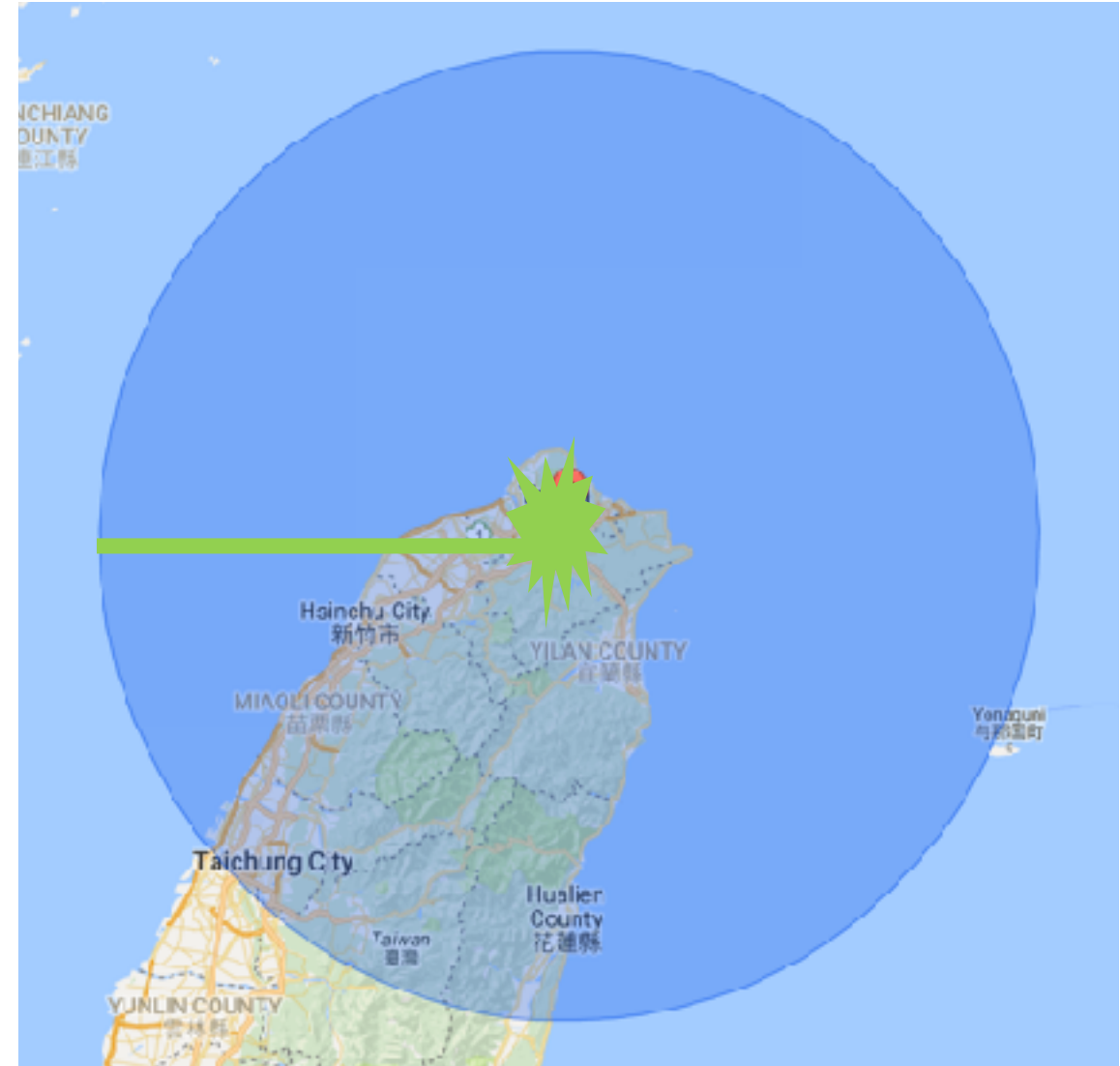
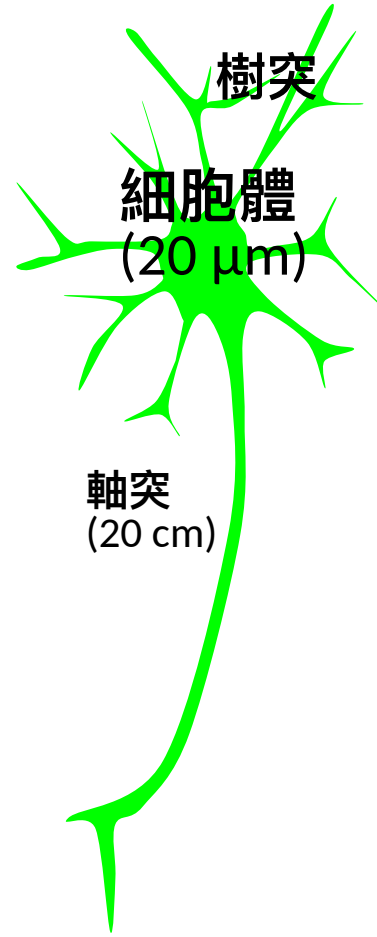
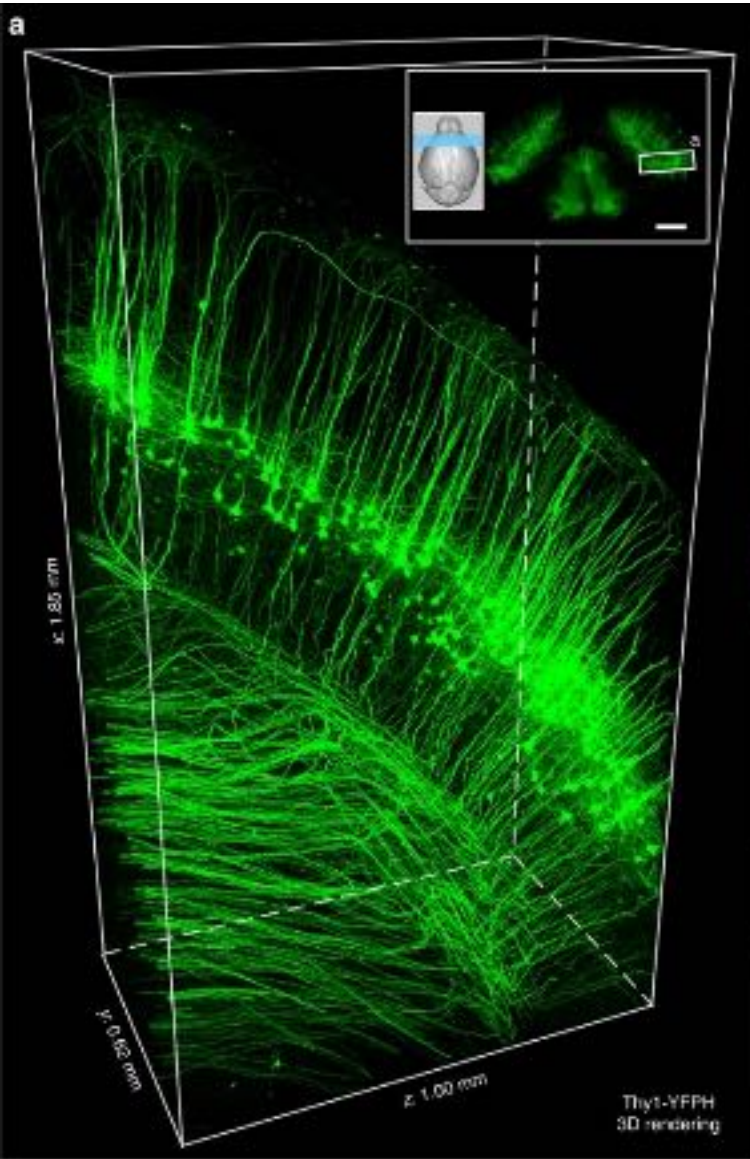
生物醫學的電現象

楊世斌 Shi-Bing Yang, Ph.D.

中央研究院生物醫學科學研究所

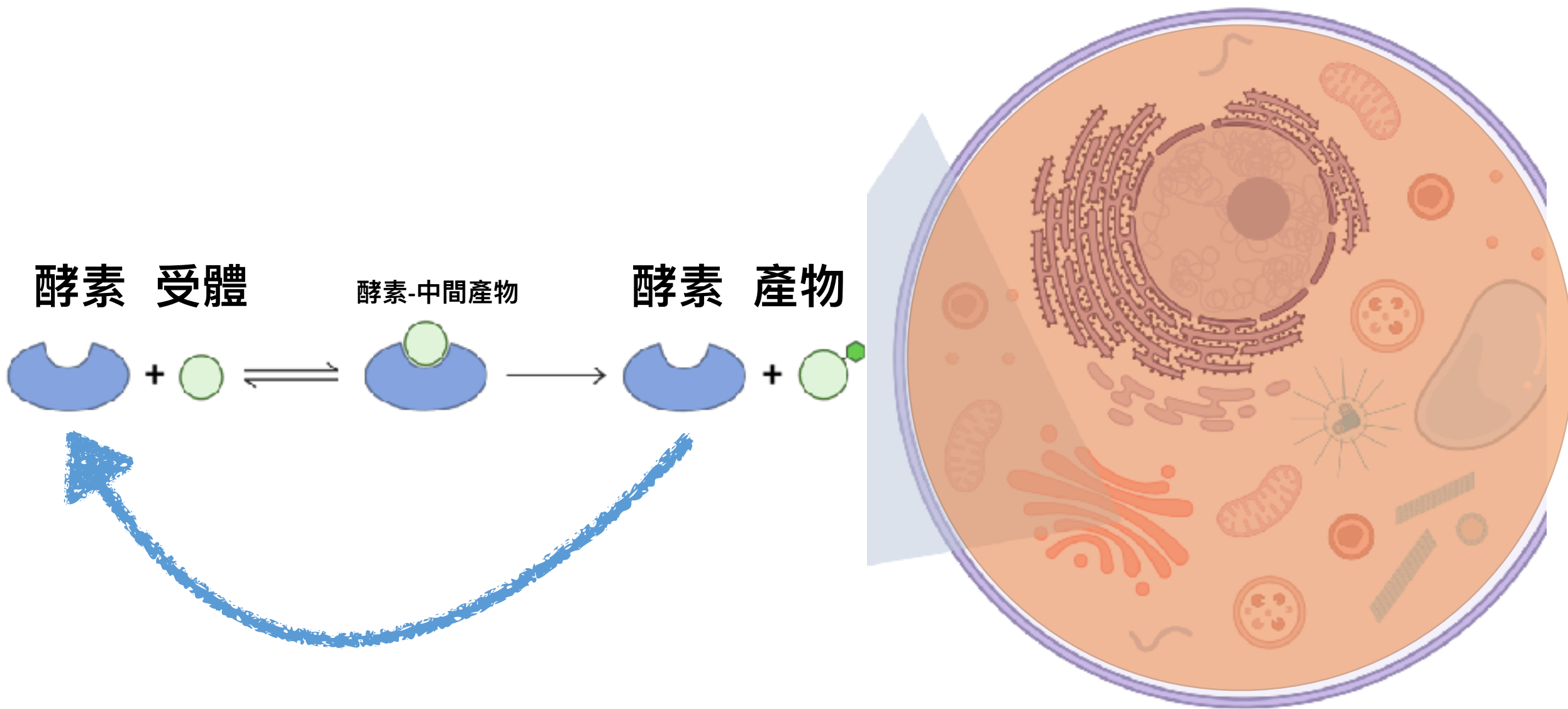
生物電訊號傳播的距離：

如果神經元的細胞體($20\text{ }\mu\text{m}$) 跟成人的身高一樣($\sim 1.5\text{ m}$)



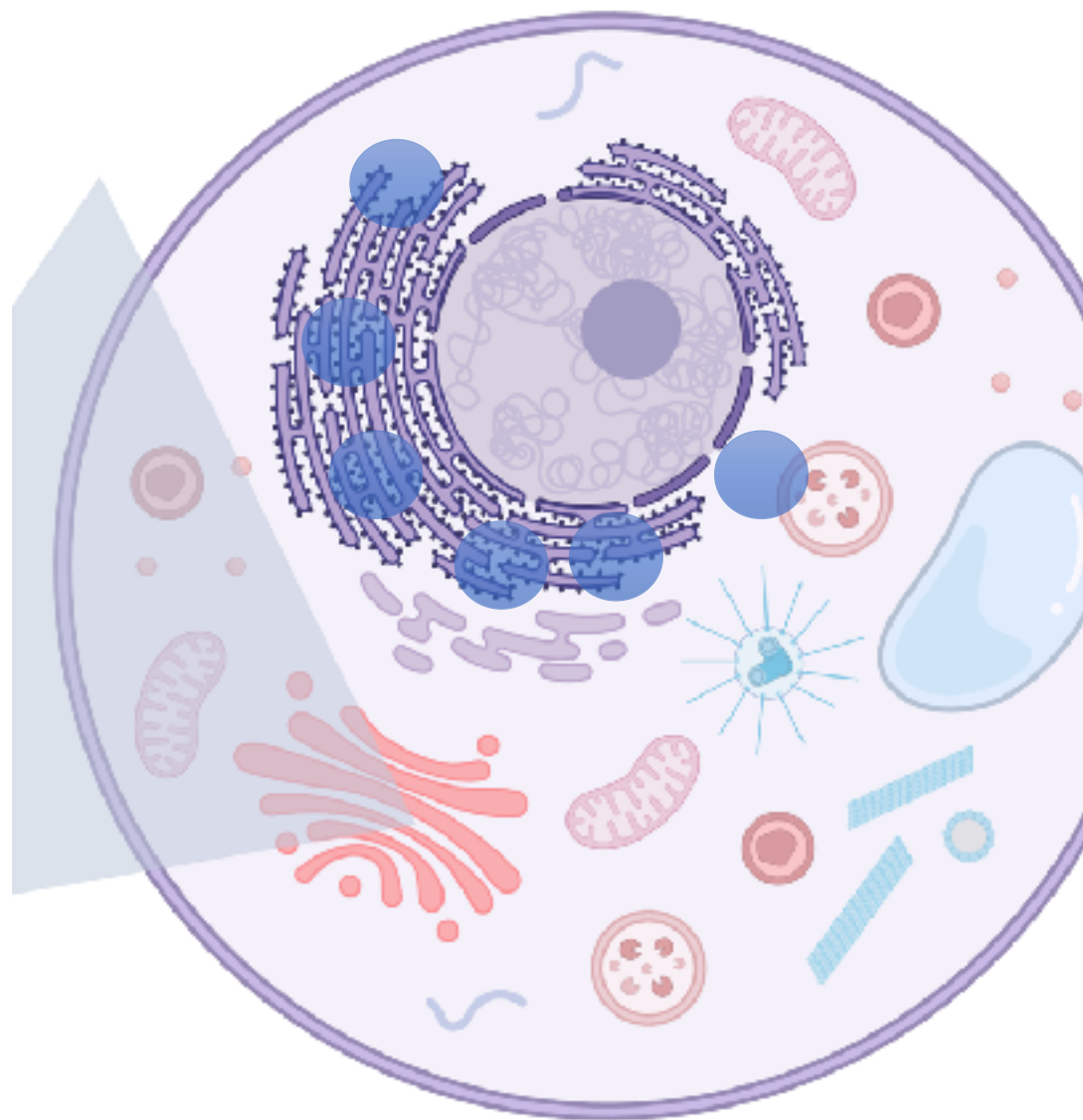
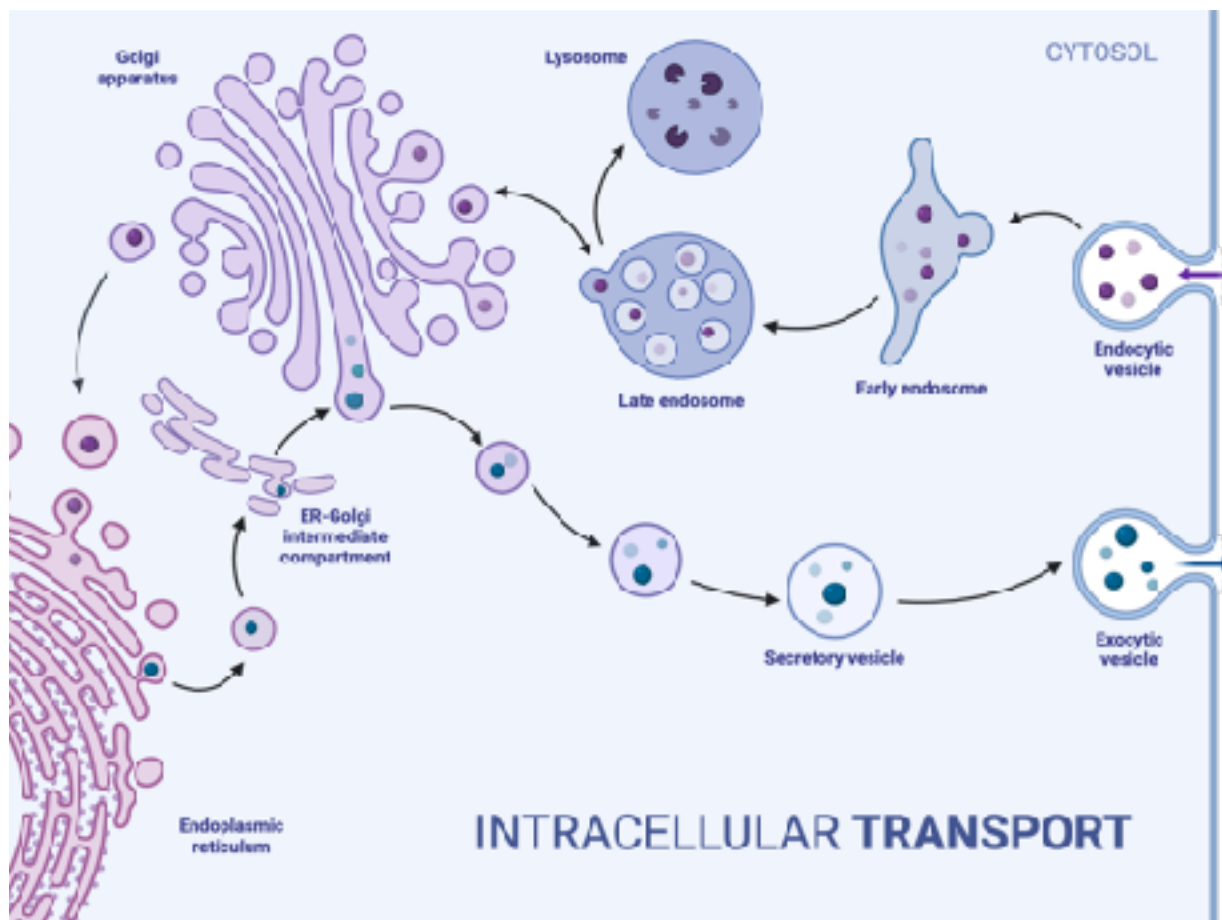
生物體內各式訊號傳遞的速度：

- 生物化學反應：擴散



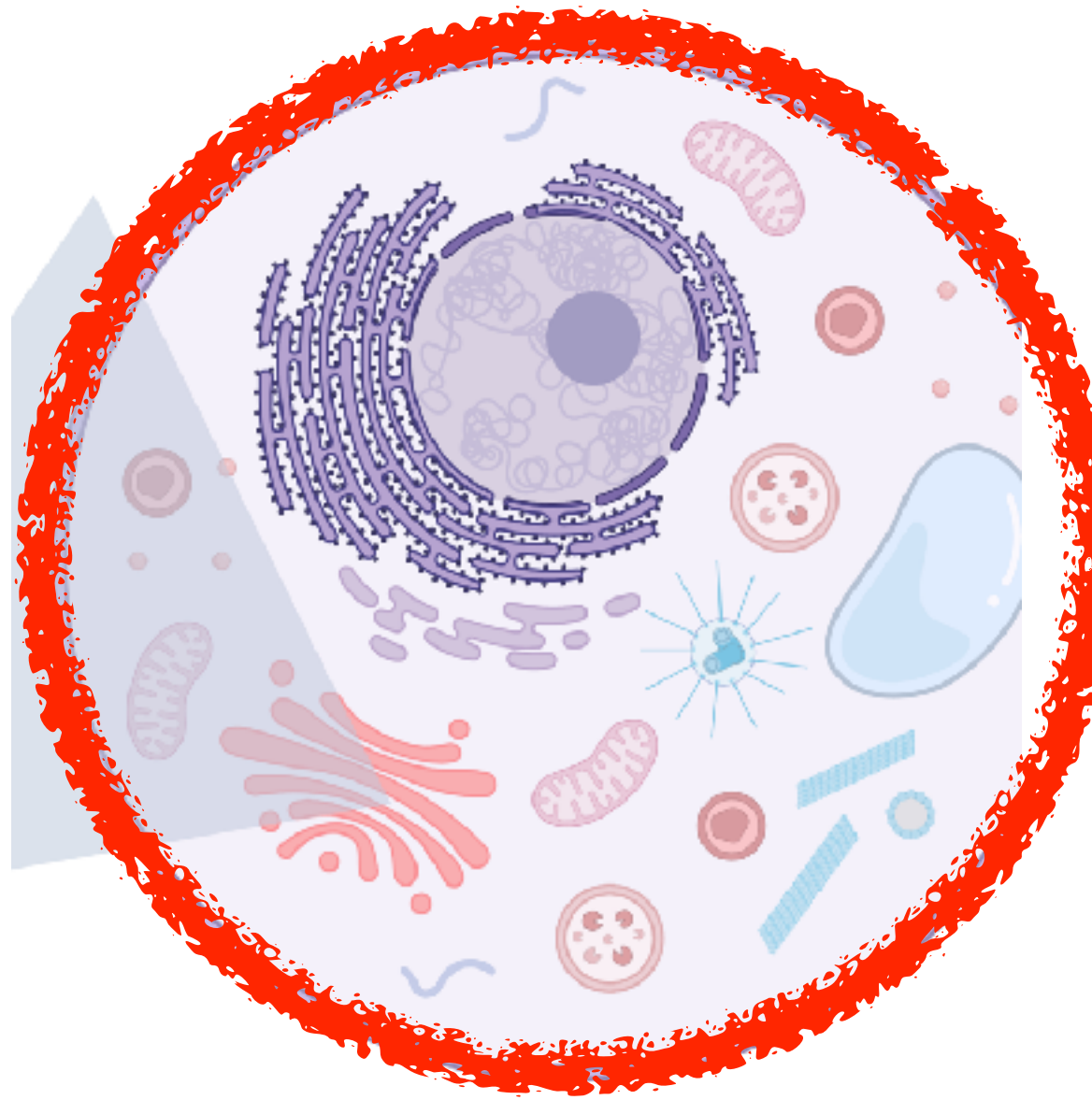
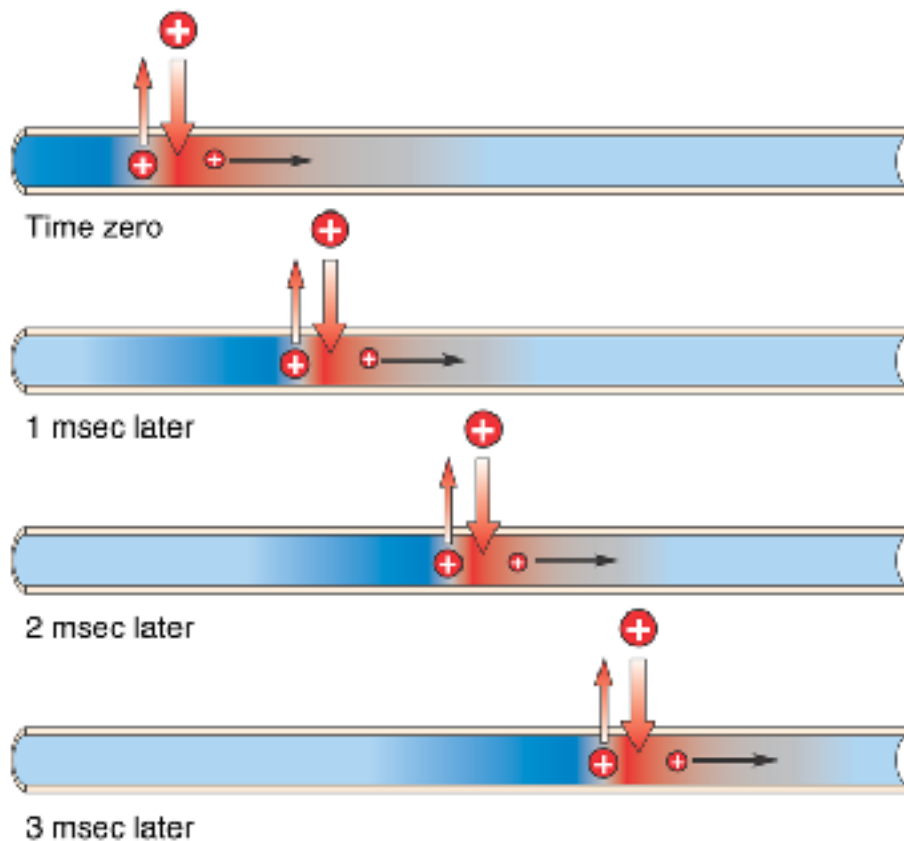
生物體內各式訊號傳遞的速度：

- 生物化學反應：擴散
- 主動運輸：消耗能量的運輸方式



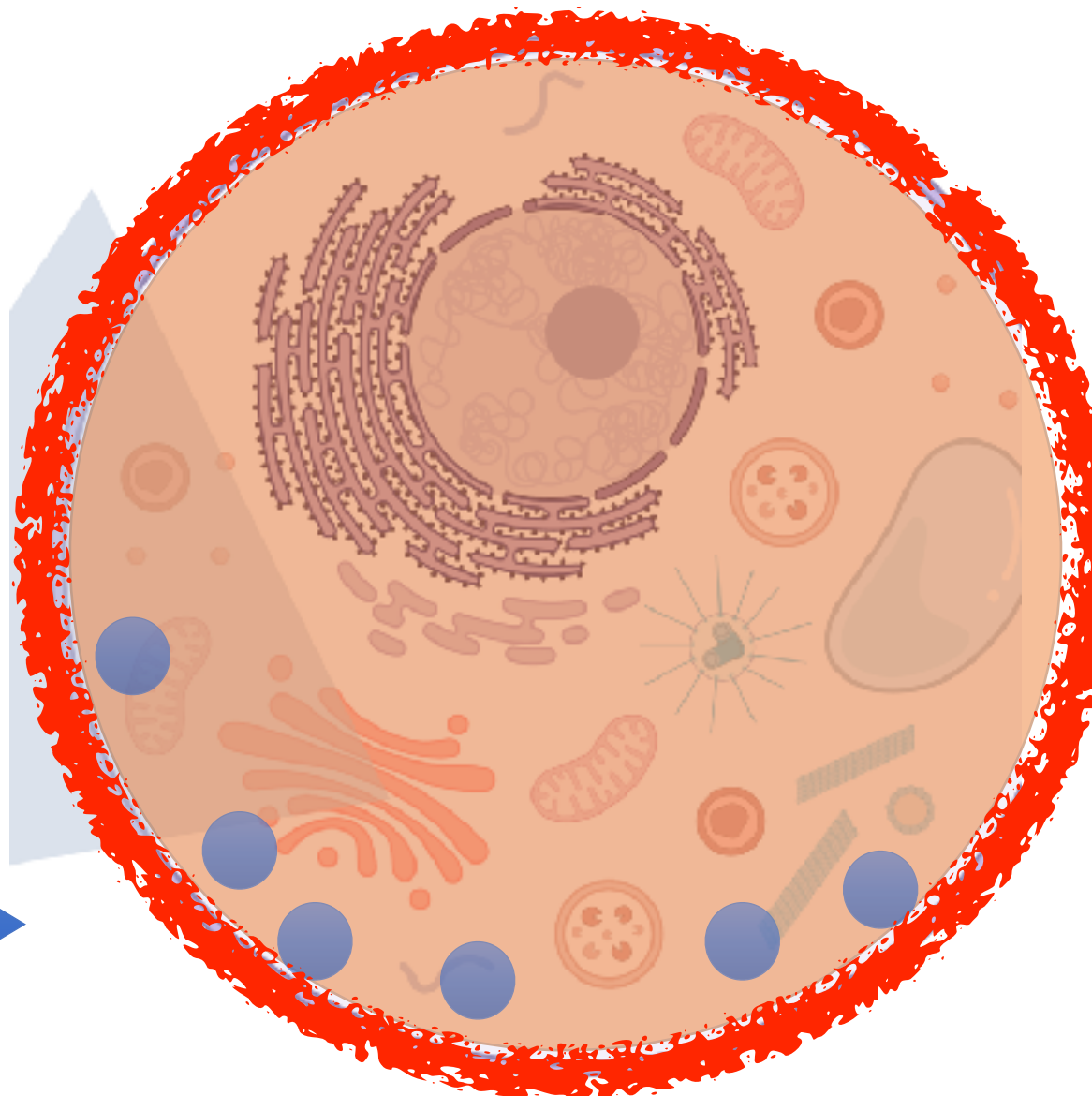
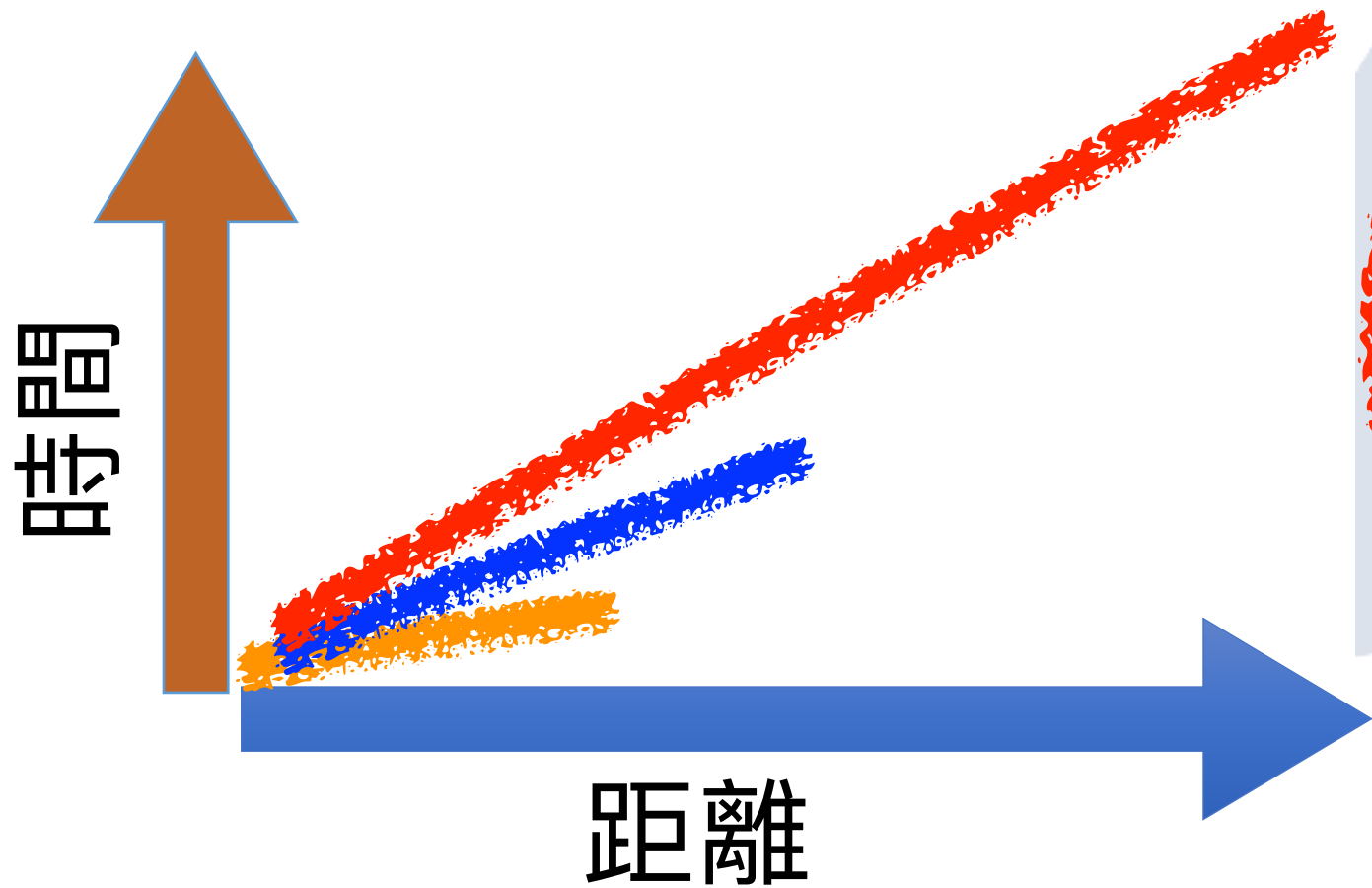
生物體內各式訊號傳遞的速度：

- 生物化學反應：擴散
- 主動運輸：消耗能量的運輸方式
- 生物電訊號：電化學反應



生物體內各式訊號傳遞的速度：

- 生物化學反應：擴散
- 主動運輸：消耗能量的運輸方式
- 生物電訊號：電化學反應



生物體內各式訊號傳遞的速度：

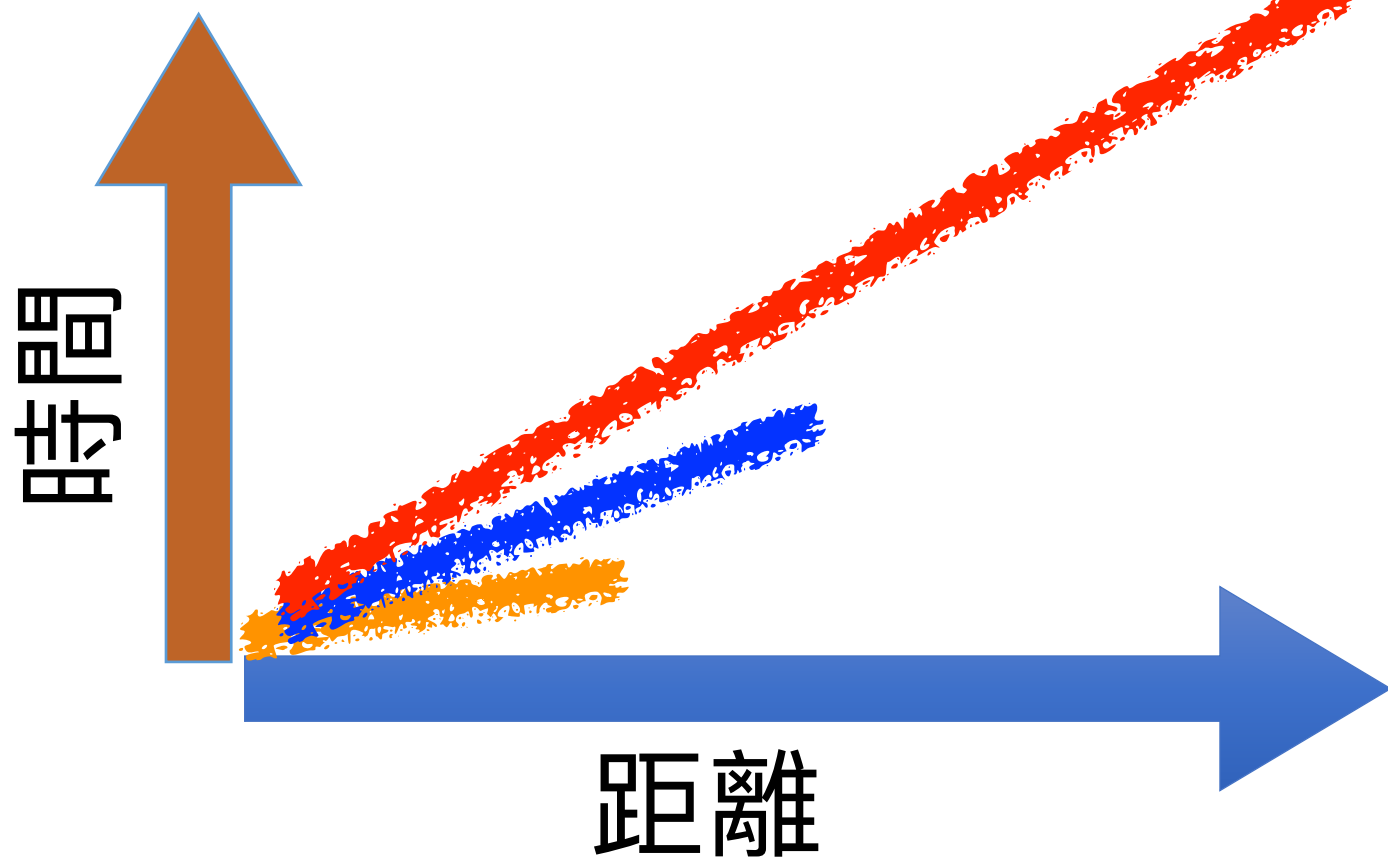
- 生物化學反應：擴散
- 主動運輸：消耗能量的運輸方式
- 生物電訊號：電化學反應

每一公分所需的時間：

生物電訊號：0.1秒

主動運輸：2小時

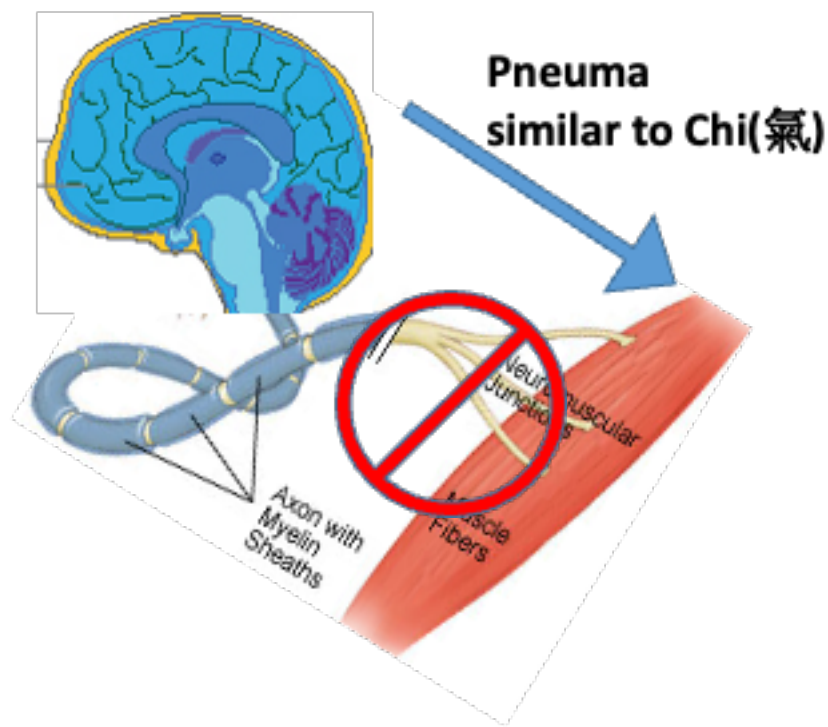
生化反應：>1000小時！



神經生理之氣球學說

古時候的生理學家只用剪刀鑷子做出來的觀察結果:

- 腦室中儲存“氣”.
- 肌肉的收縮膨脹，是由“氣”引導的.
- 神經是“氣”的傳導管路，當神經截斷，氣的傳導受阻，肌肉則無法收縮.

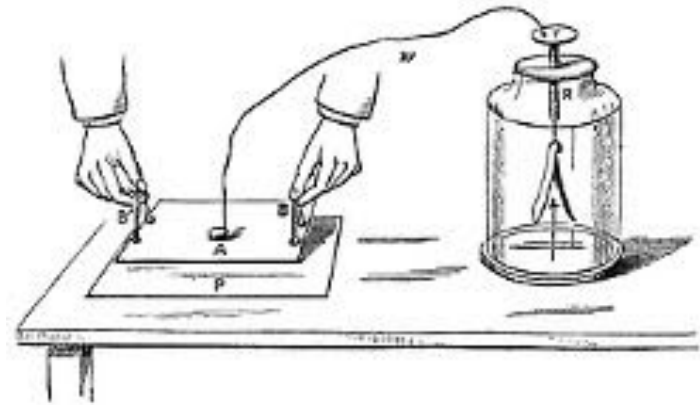
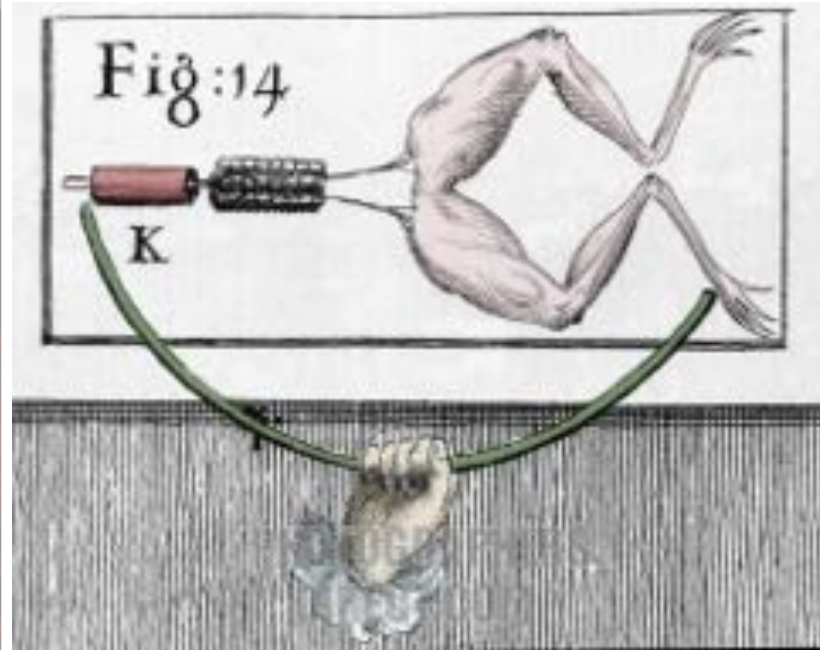


蓋倫 (~200AD)
Aelius Galenus (Galen of Pergamon)

生物的電現象

伽伐尼Galvani (~1800):

- 掛在鐵欄杆晾乾的蛙腿，會自主產生收縮.
- “電溶液”由脊髓產生，傳遞到腿部.



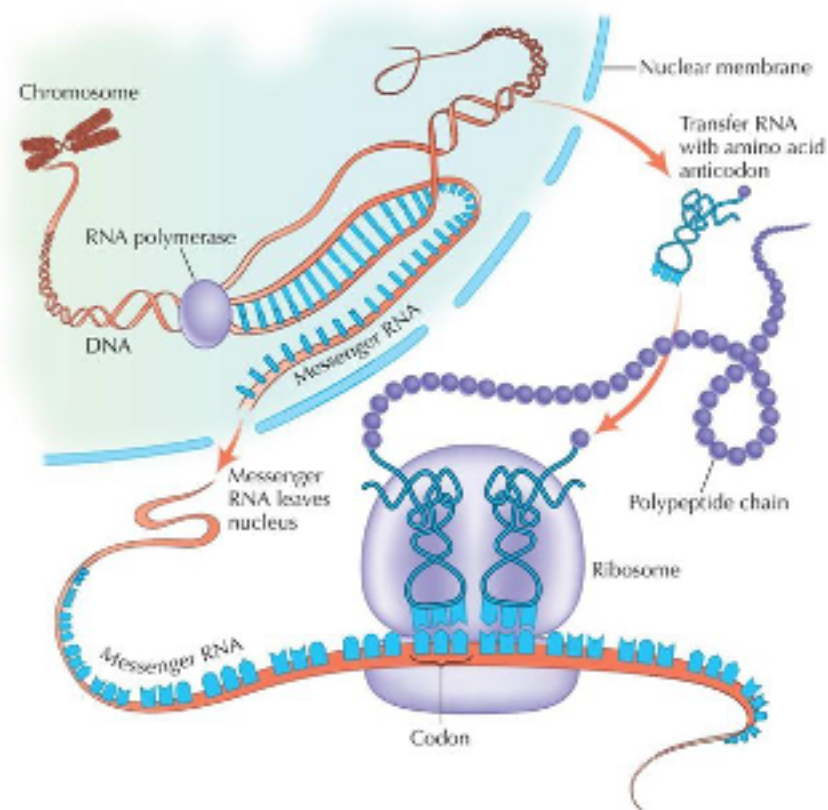
動作電位的產生：

~1850: 杜布瓦-雷蒙 **du Bois-Reymond** 認為所有生物現象皆能用物理化學數學的概念來描述。他偵測到肌肉收縮前，會有激烈的電位變化，由中樞向四肢傳遞。

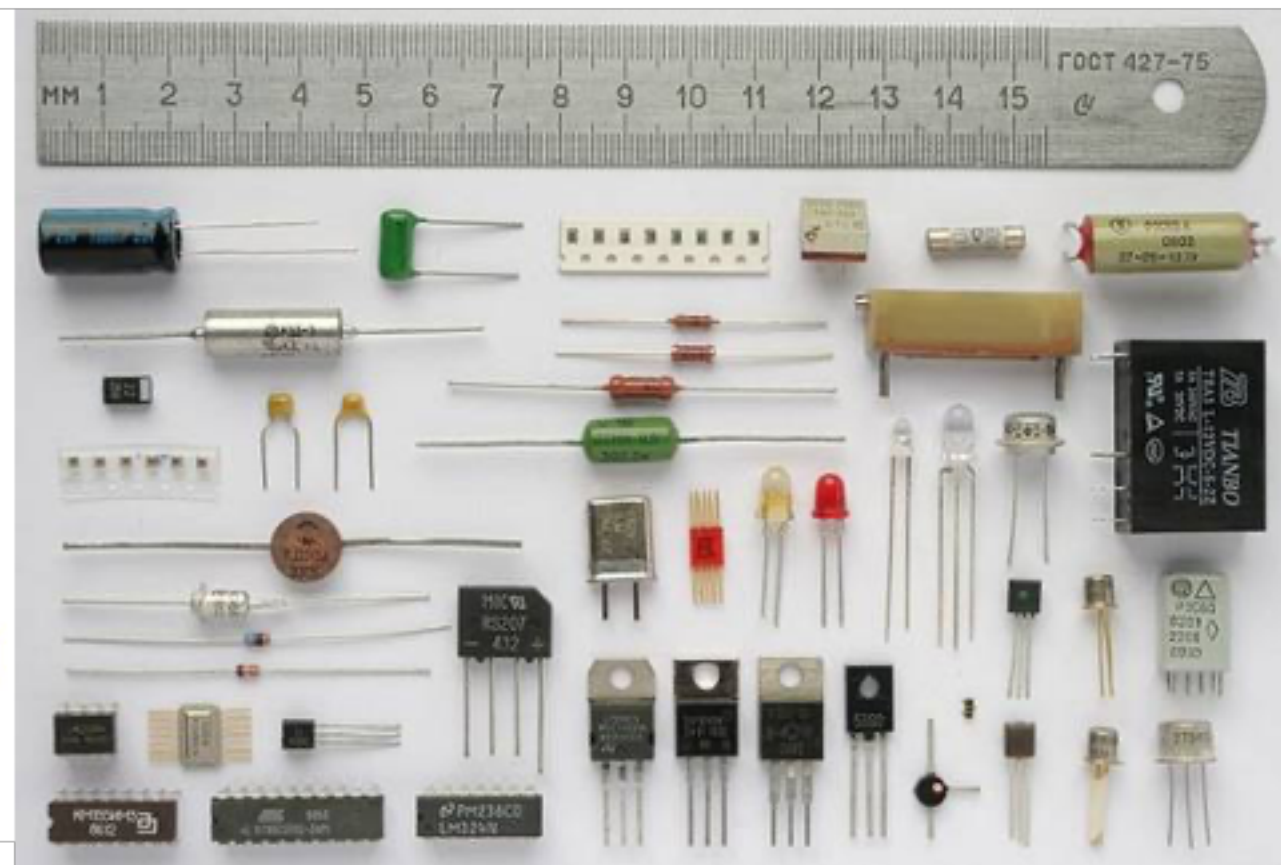


這堂課需要用到的基本物理學概念:

電阻，電容，電池



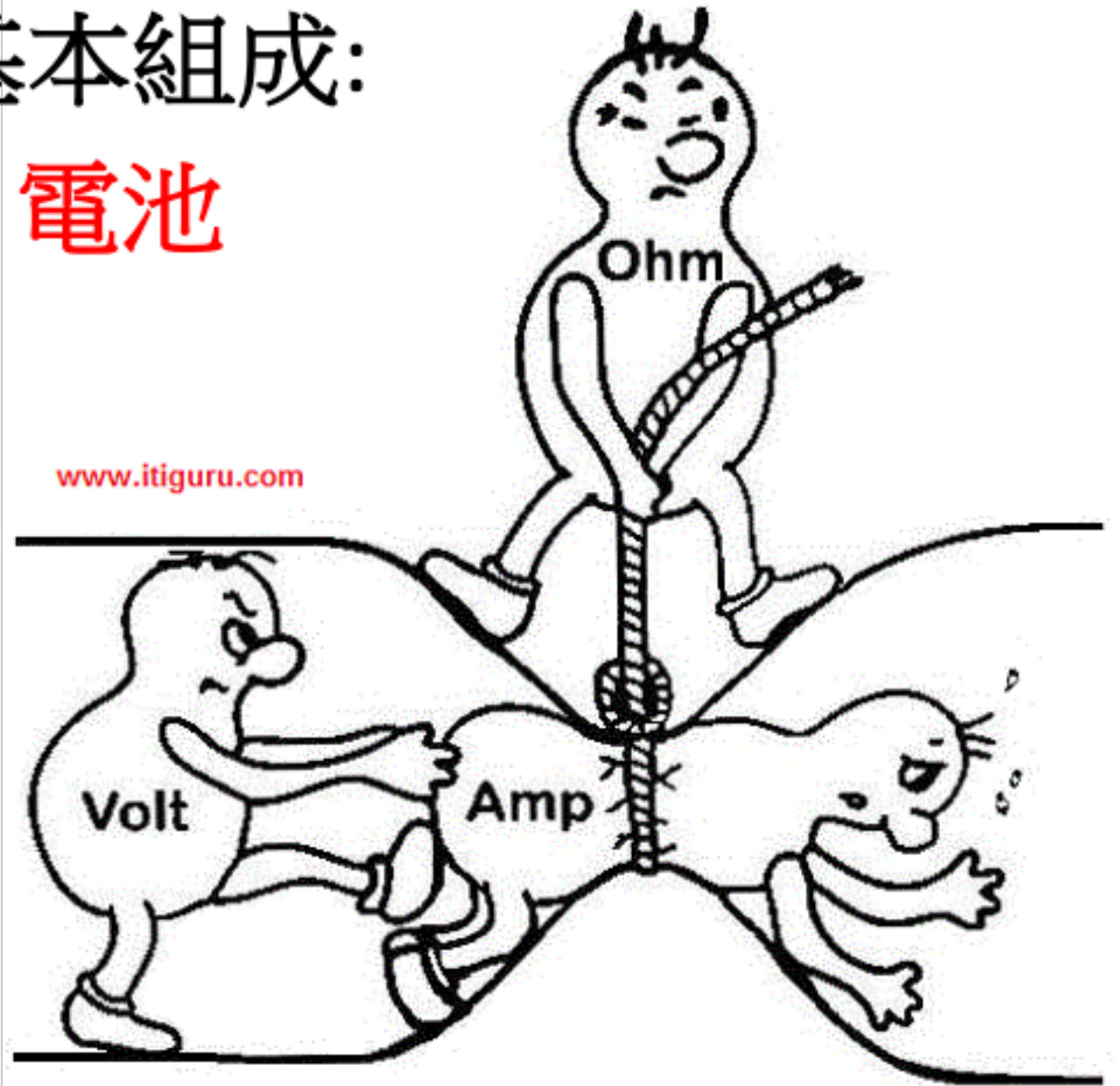
DNA
↓
RNA
↓
PROTEIN



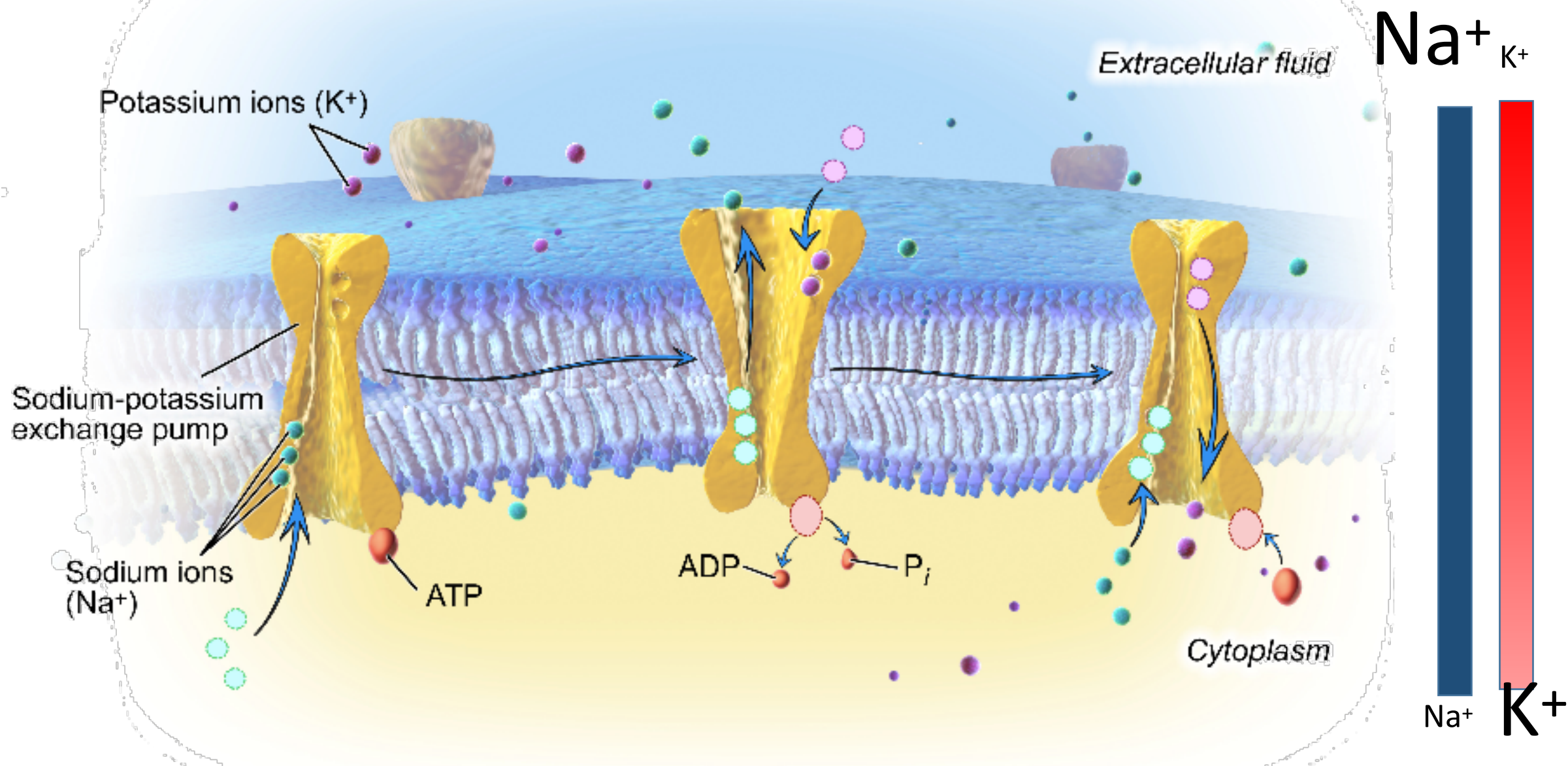
生物電子學的基本組成:

電阻，電容，電池

歐姆定律:
 $V=IR$



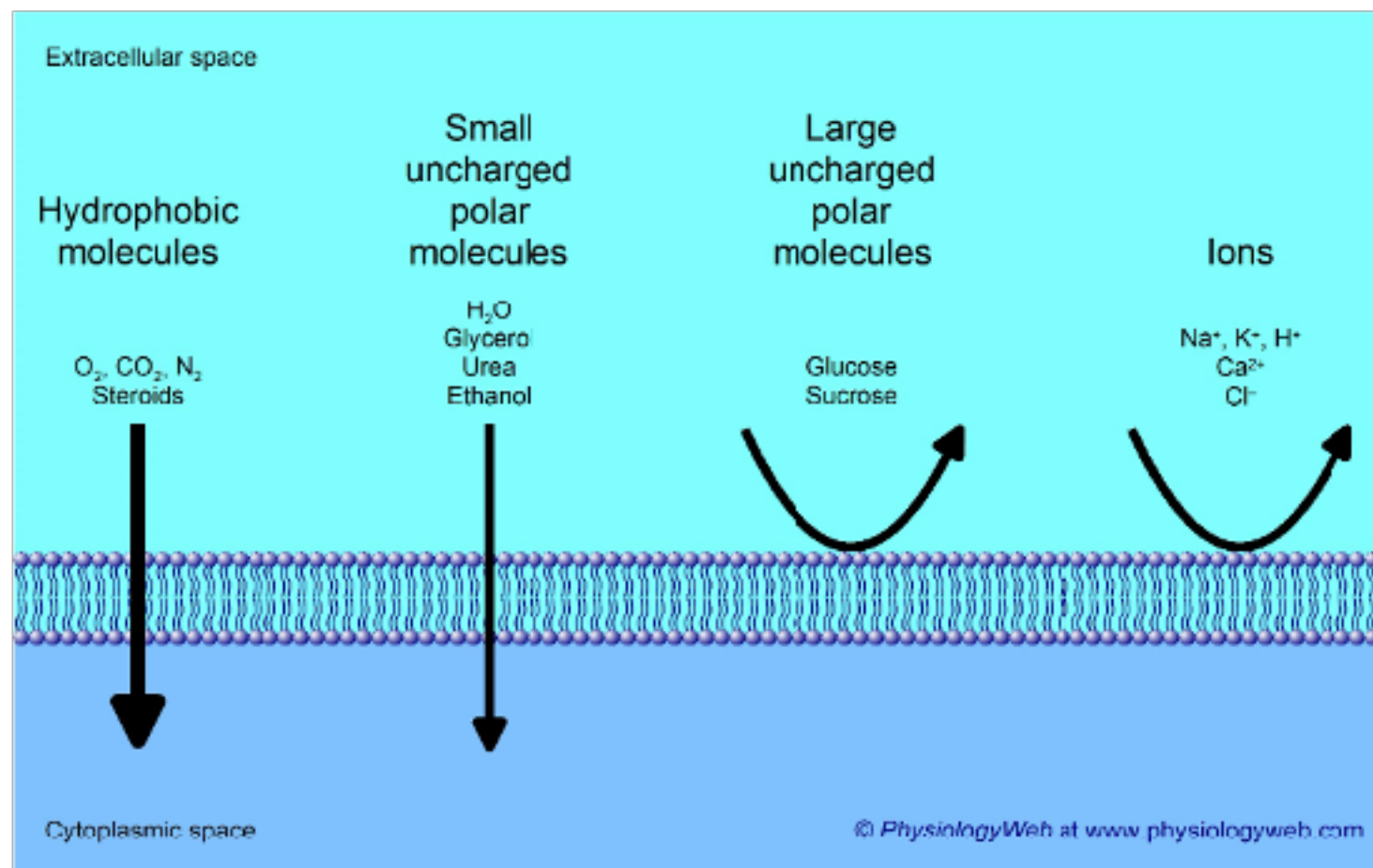
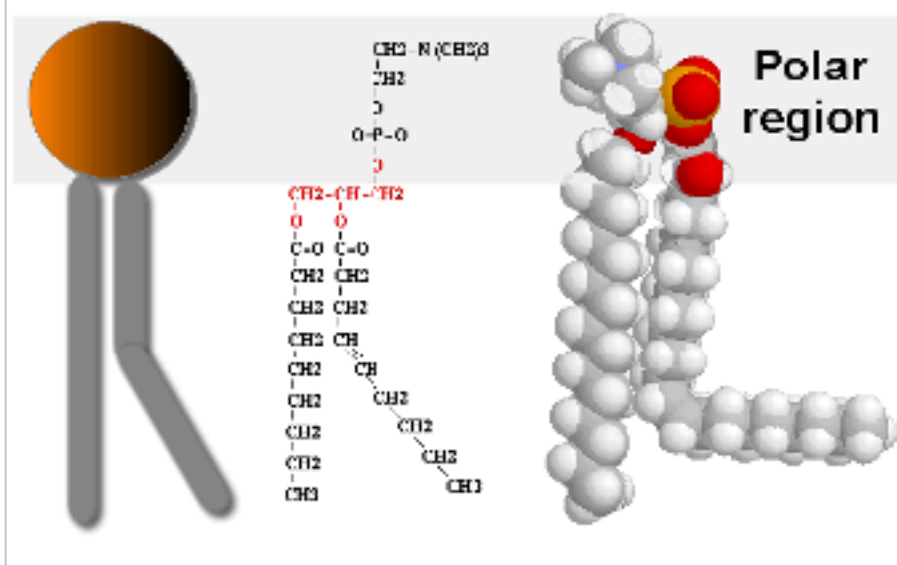
鈉鉀幫浦:分子電池，藉由消耗ATP建立化學電位



電阻，電容，電池

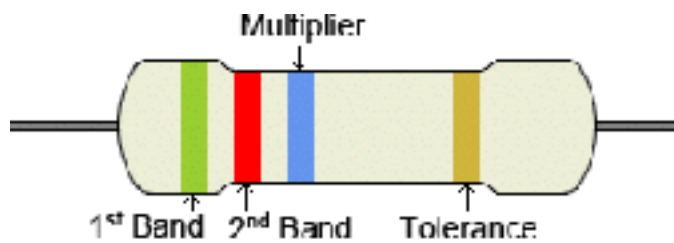
細胞膜是對水性分子有很強的阻隔能力。

Phospholipids

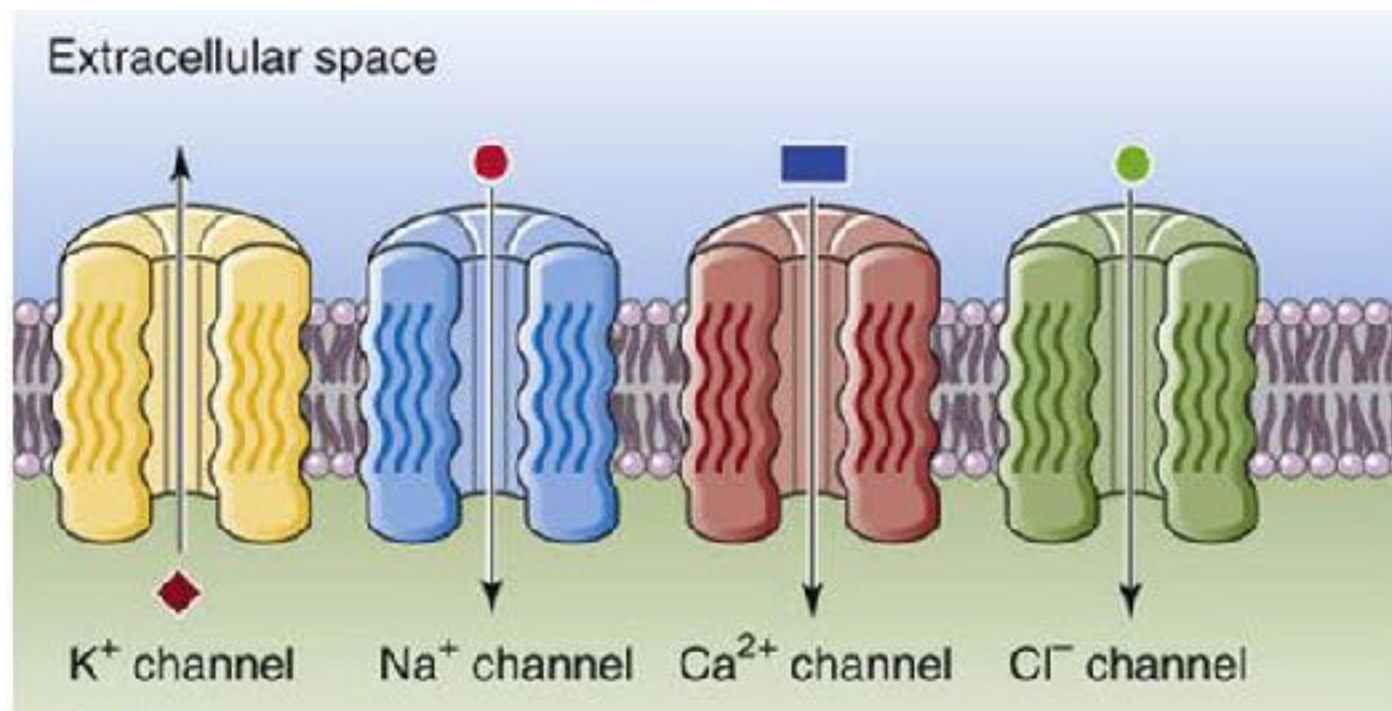


細胞膜上有特殊蛋白：離子通道

功能為細胞電訊號的基本電阻元件

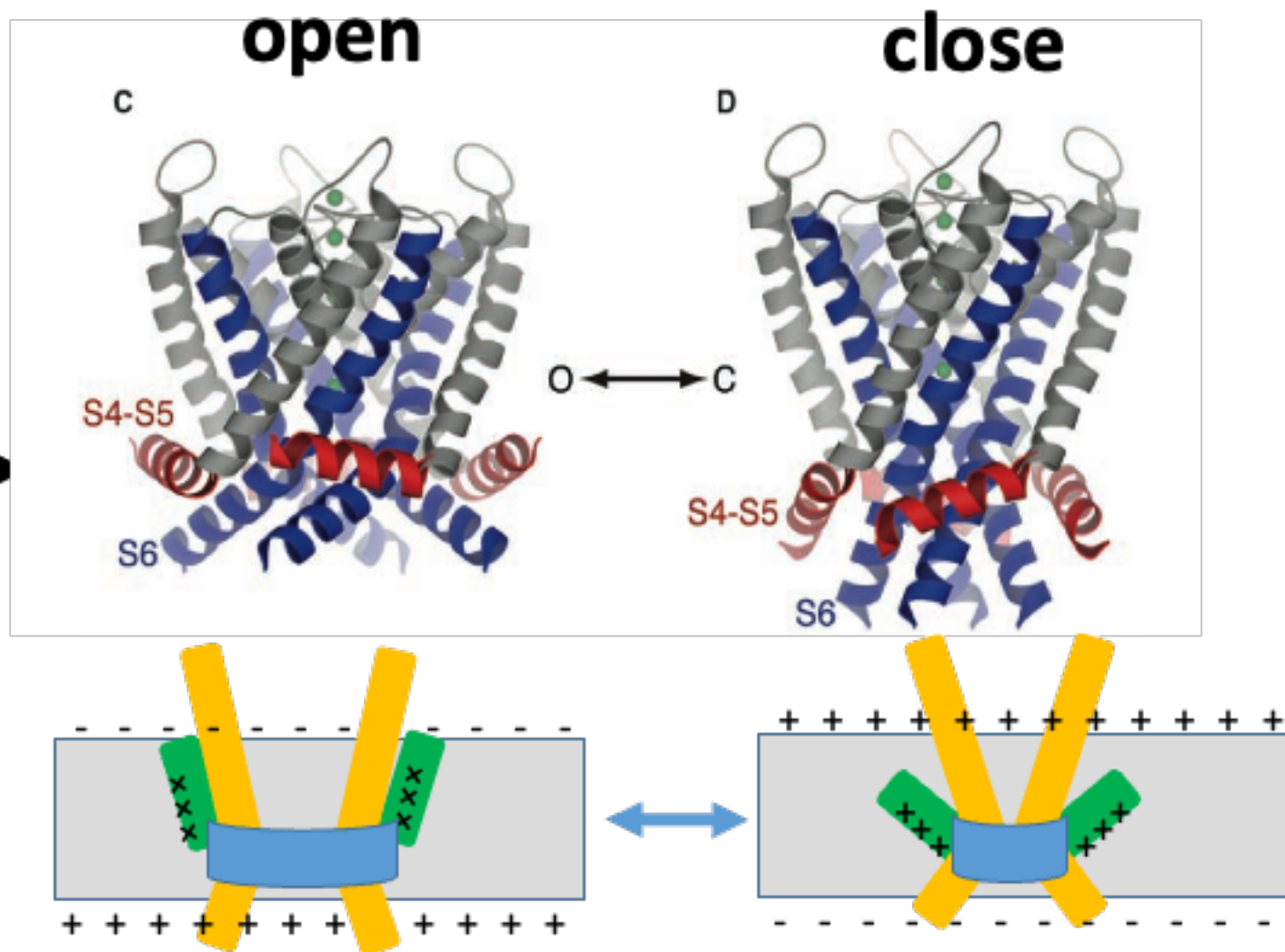
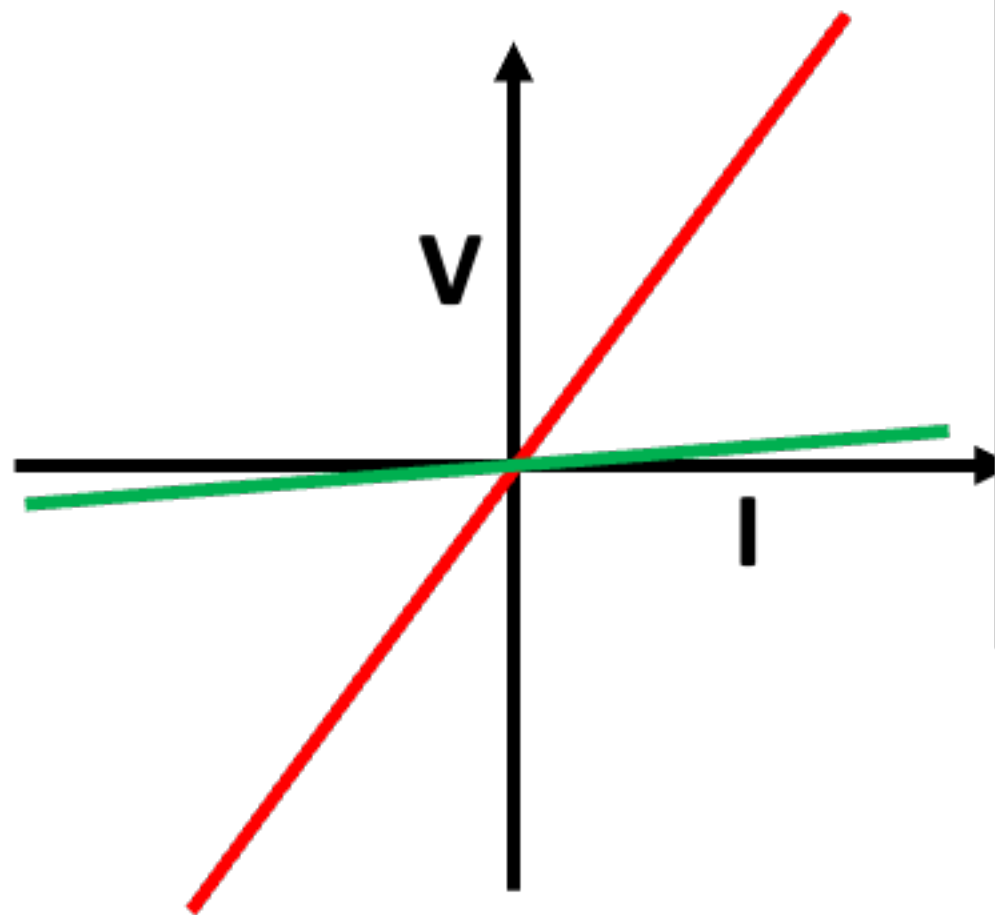


Color	1 st , 2 nd Band Significant Figures	Multiplier	Tolerance
Black	0	$\times 1$	
Brown	1	$\times 10$	$\pm 1\%$ (F)
Red	2	$\times 100$	$\pm 2\%$ (G)
Orange	3	$\times 1K$	$\pm 0.05\%$ (W)
Yellow	4	$\times 10K$	$\pm 0.02\%$ (P)
Green	5	$\times 100K$	$\pm 0.5\%$ (D)
Blue	6	$\times 1M$	$\pm 0.25\%$ (C)
Violet	7	$\times 10M$	$\pm 0.1\%$ (B)
Grey	8	$\times 100M$	$\pm 0.01\%$ (L)
White	9	$\times 1G$	
Gold		$\times 0.1$	$\pm 5\%$ (J)
Silver		$\times 0.01$	$\pm 10\%$ (K)

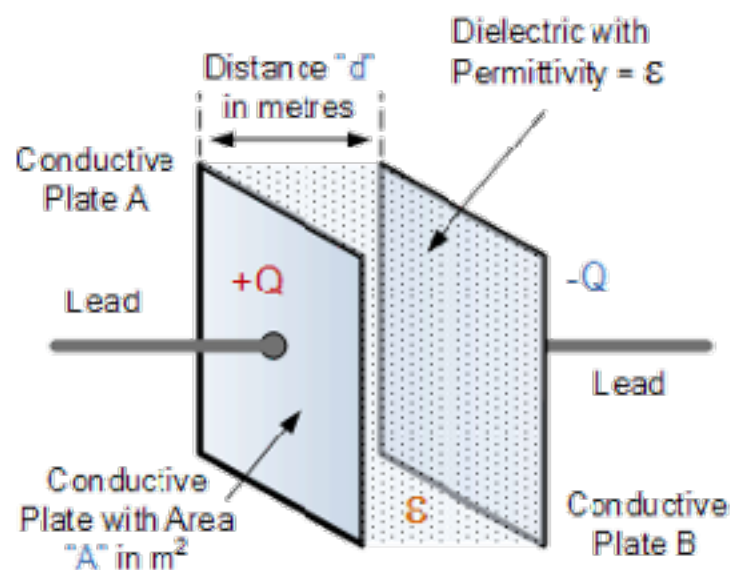


電阻，電容，電池

膜蛋白中的離子通道為基本電阻元件



電阻，電容，電池



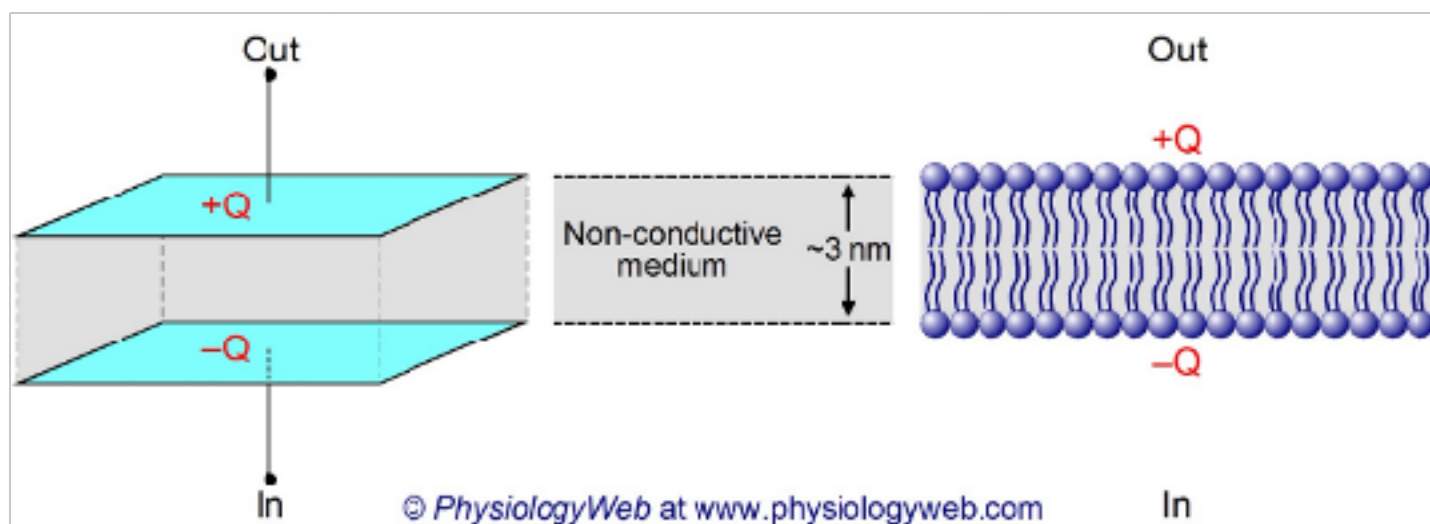
$$C = Q/V$$

C: Farad

Q: Coulomb

V: Volt

細胞膜為良好的電容



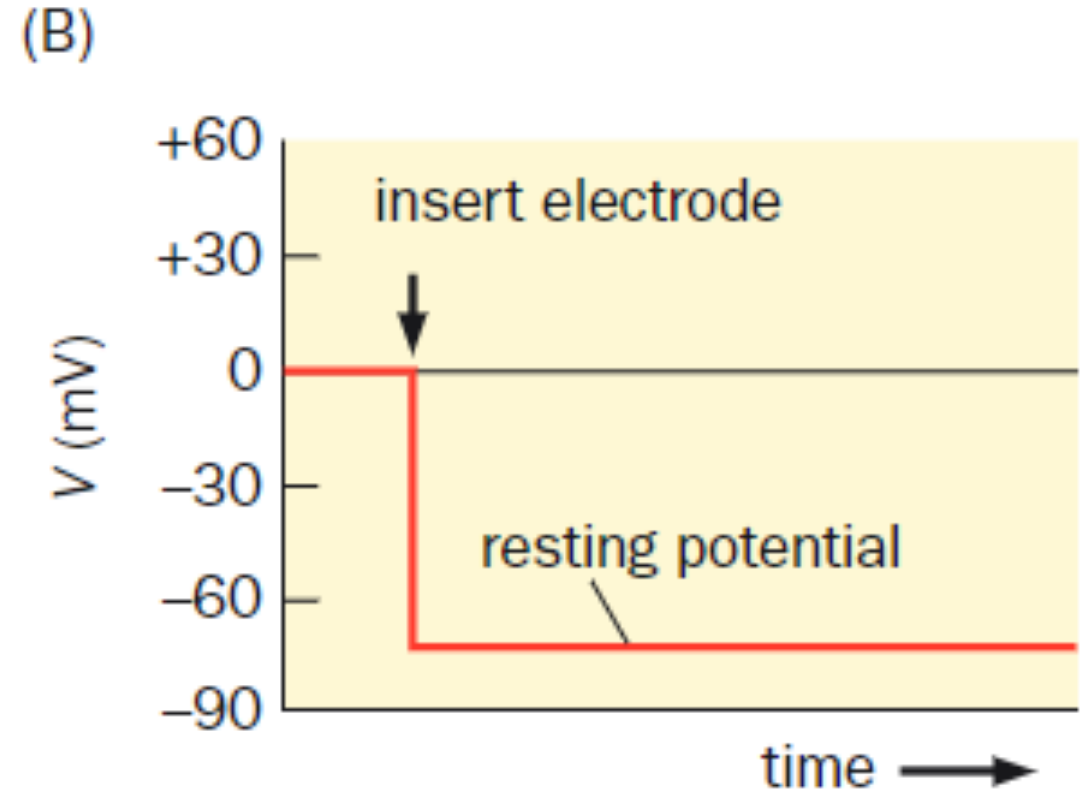
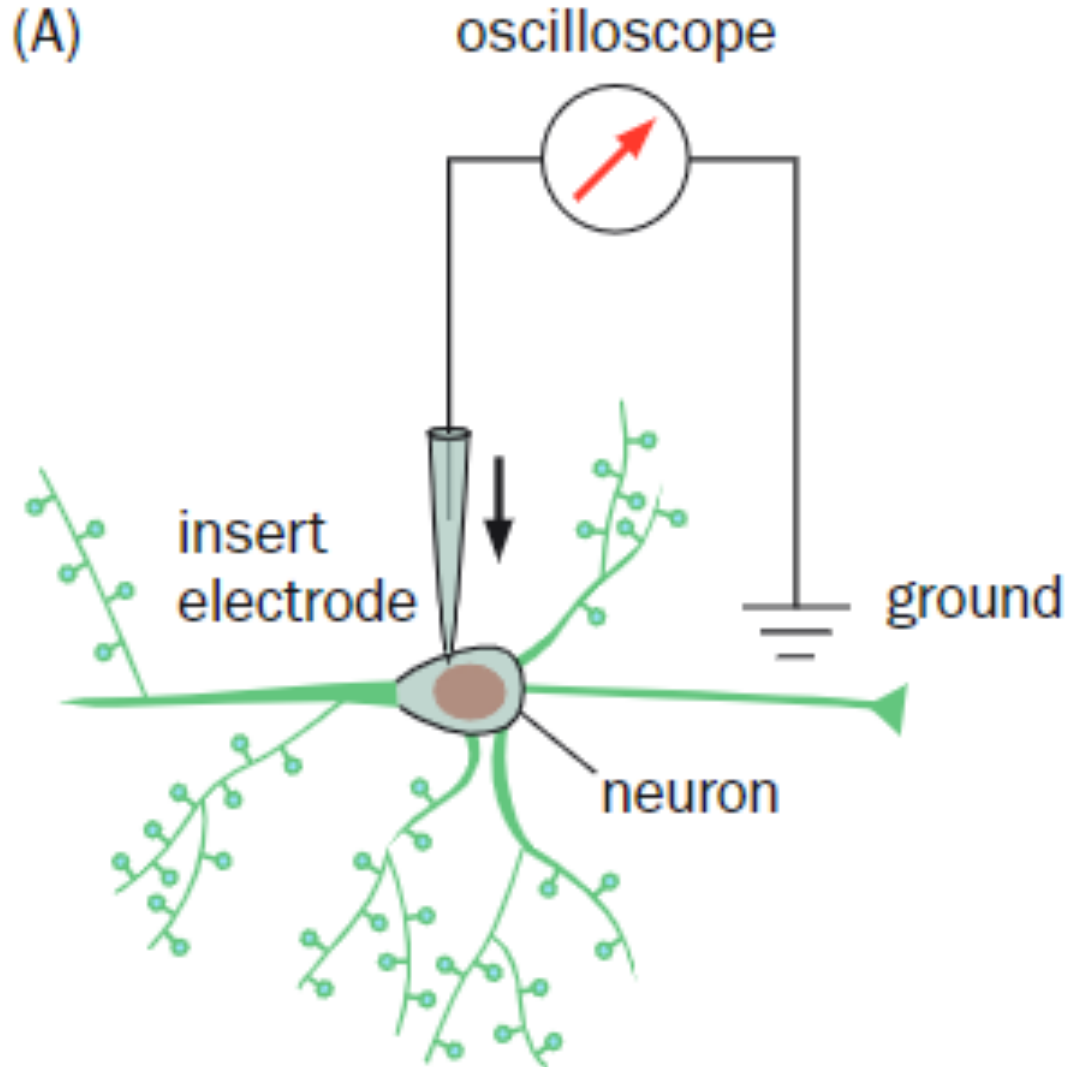
電容為 $0.5 \mu F/cm^2$

一般大小的細胞，在細胞膜上的帶電粒子數量為：

$1 \times 10^8 e$

膜電位:細胞內外的電位差

細胞內的電位比細胞外低



細胞的電位差的成因：

細胞內外離子濃度不平均

細胞膜對不同離子選擇性不同

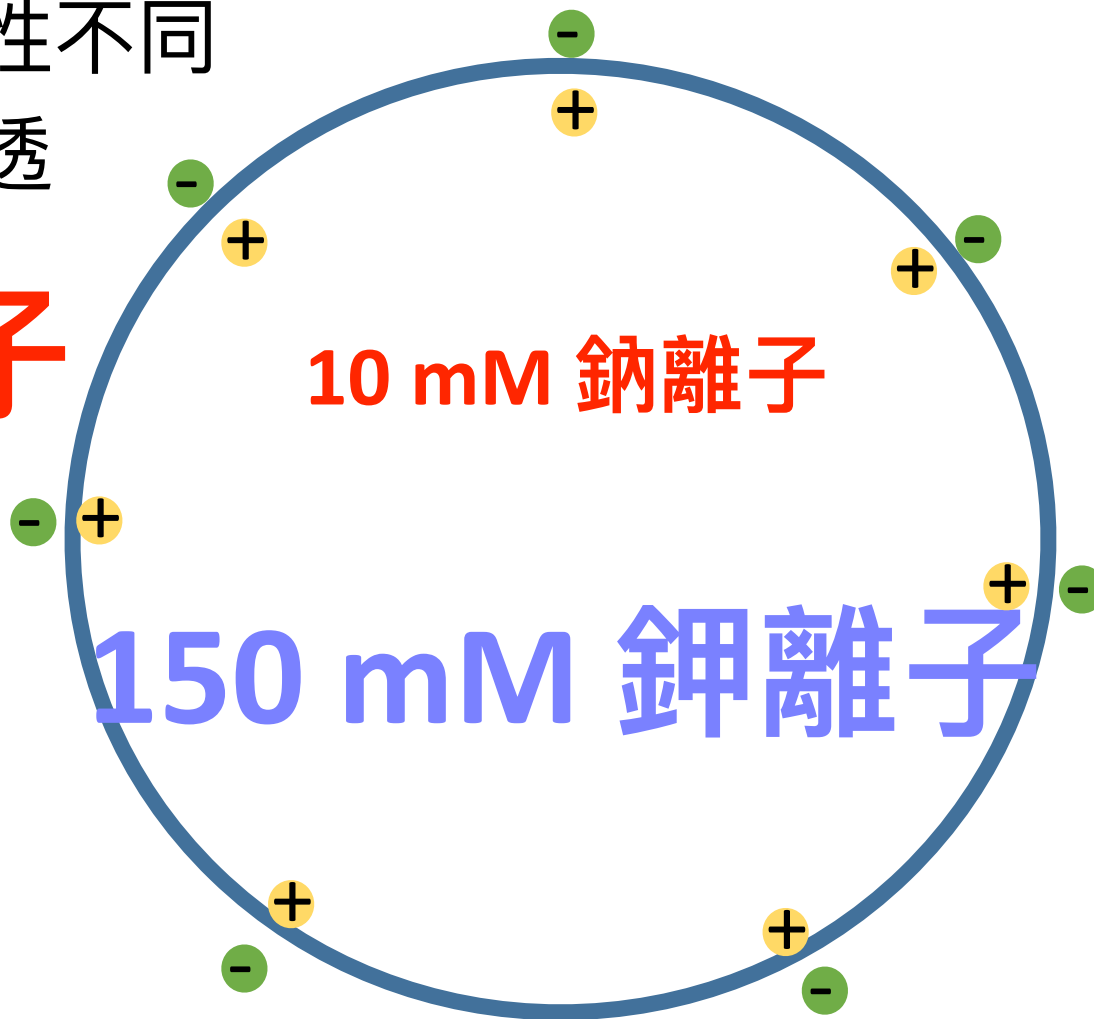
平常時候對鉀離子很通透

150 mM 鈉離子

3 mM 鉀離子

10 mM 鈉離子

150 mM 鉀離子



電阻，電容，電池

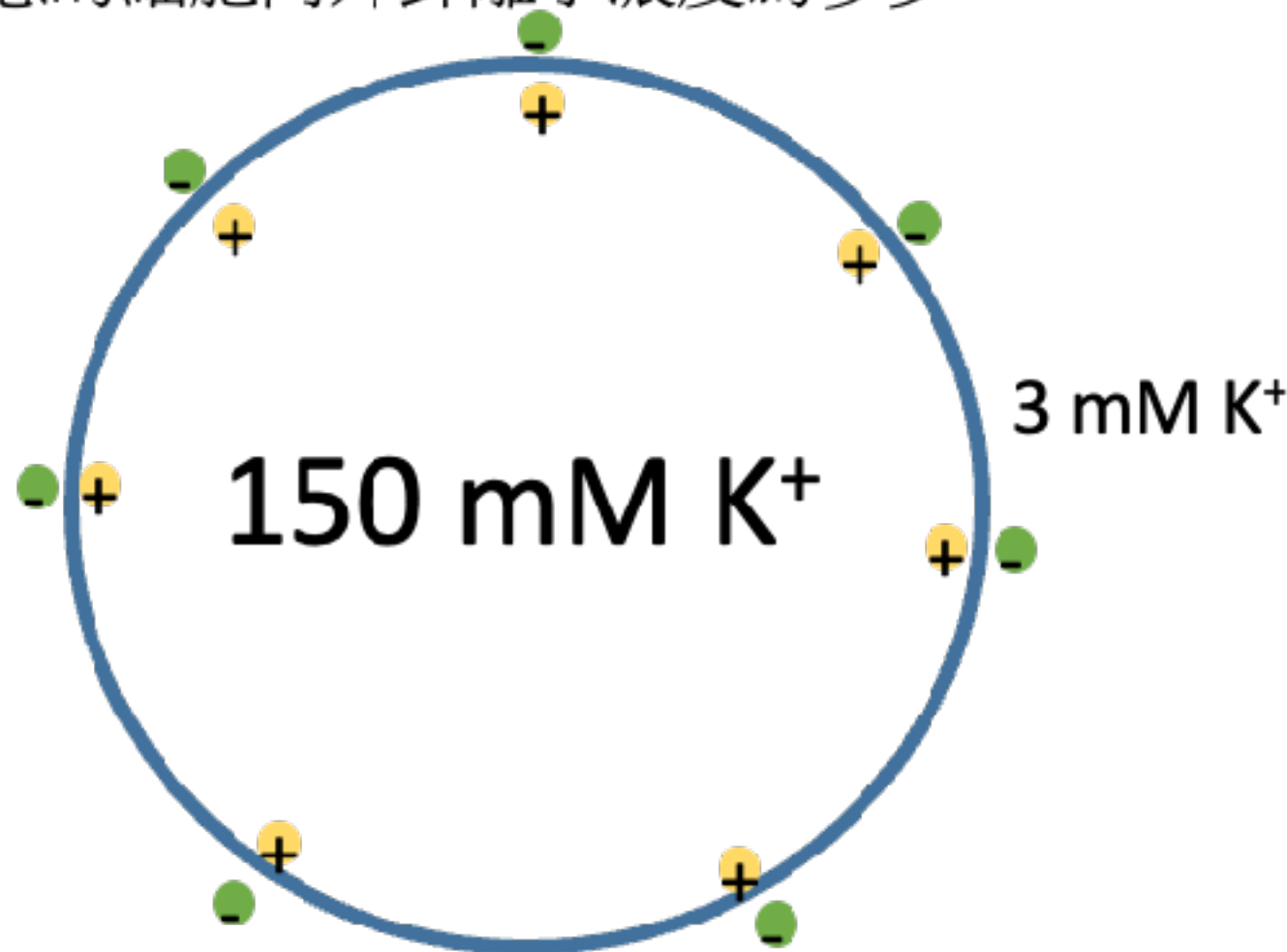
如果細胞內的 $[K^+]$ 是 150 mM,細胞外的 $[K^+]$ 是 3 mM.

當鉀離子通道開啟，在平衡態的細胞內外鉀離子濃度為多少？

3 mM K^+ ?

76.5 mM K^+ ?

150 mM K^+ ?



電阻，電容，電池

At the electrochemical equilibrium state:

Cell diameter $\sim 20 \mu\text{m}$: Cell volume = $4200 \mu\text{m}^3$

Number of K^+ in the cell

$150 \text{ mM} \sim 6 \times 10^{11} \text{ K}^+$

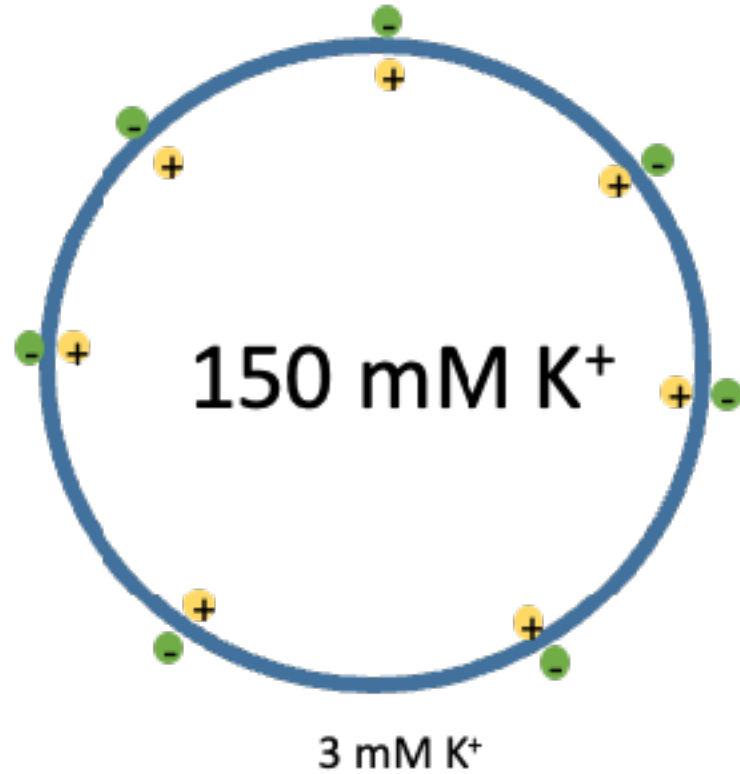
Assuming the cell surface is 20 pF

$E_{\text{K}} = -100 \text{ mV}$

Ions relocated for establishing equilibrium potential:

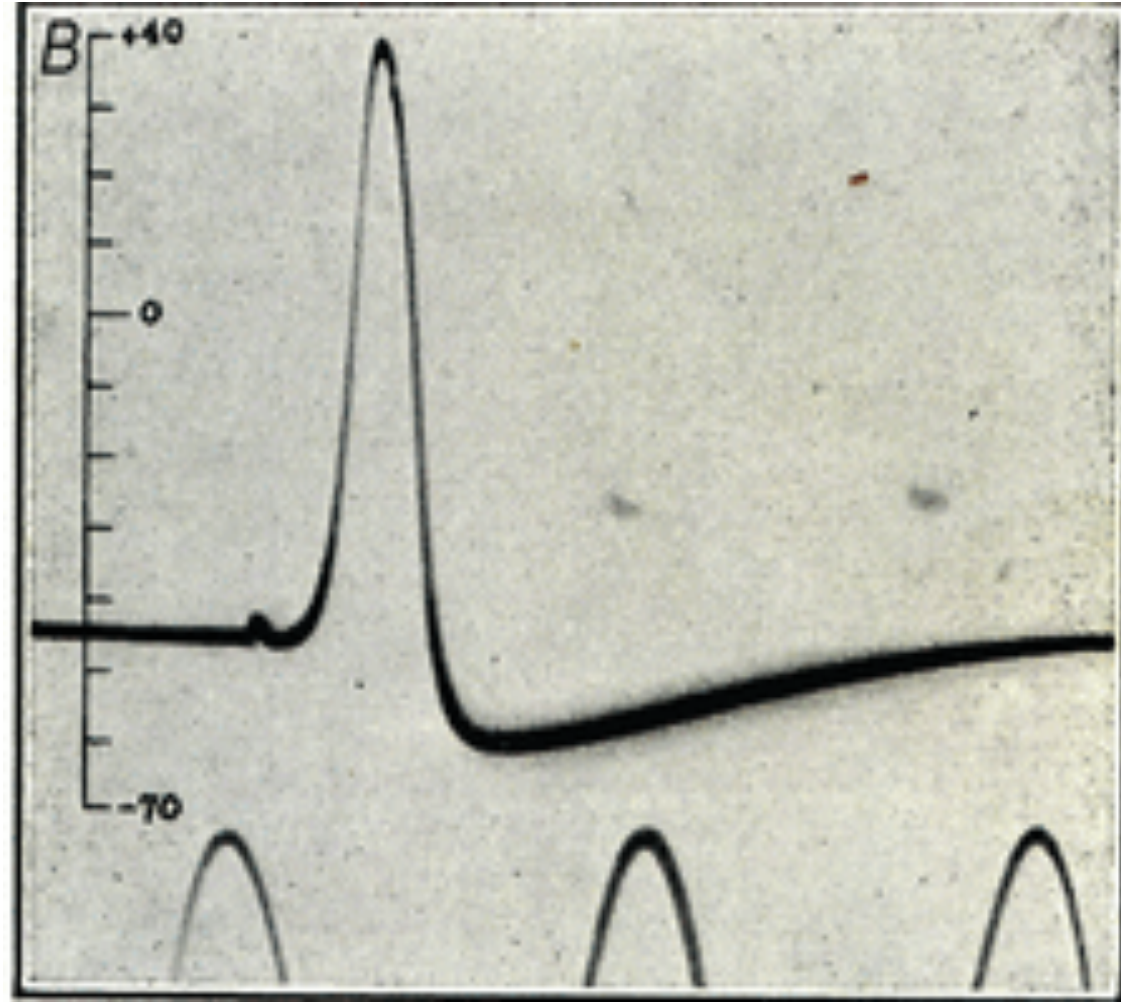
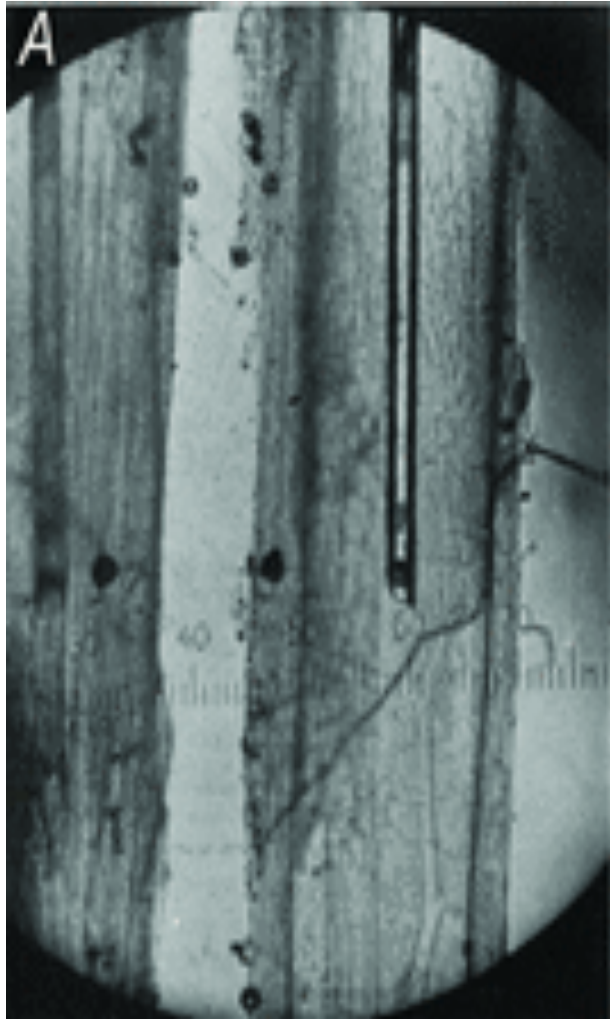
$1 \times 10^8 \text{ K}^+$

Redistributed ions: $1 \times 10^8 / 6 \times 10^{11} \sim 0.016\%$

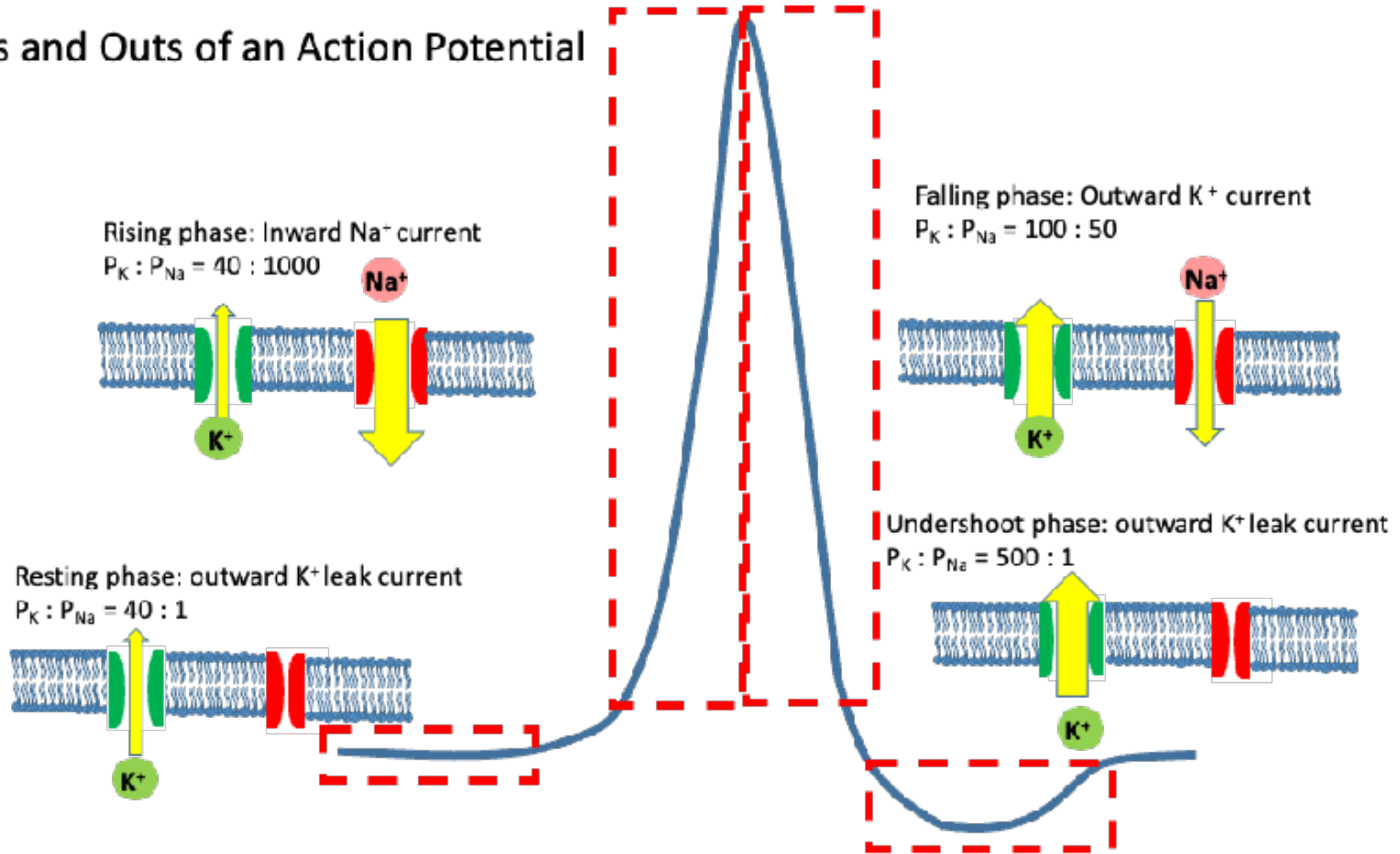


細胞休息狀態下的電位為 -60 mV .

受到刺激會產生動作電位：最主要的生物電訊號

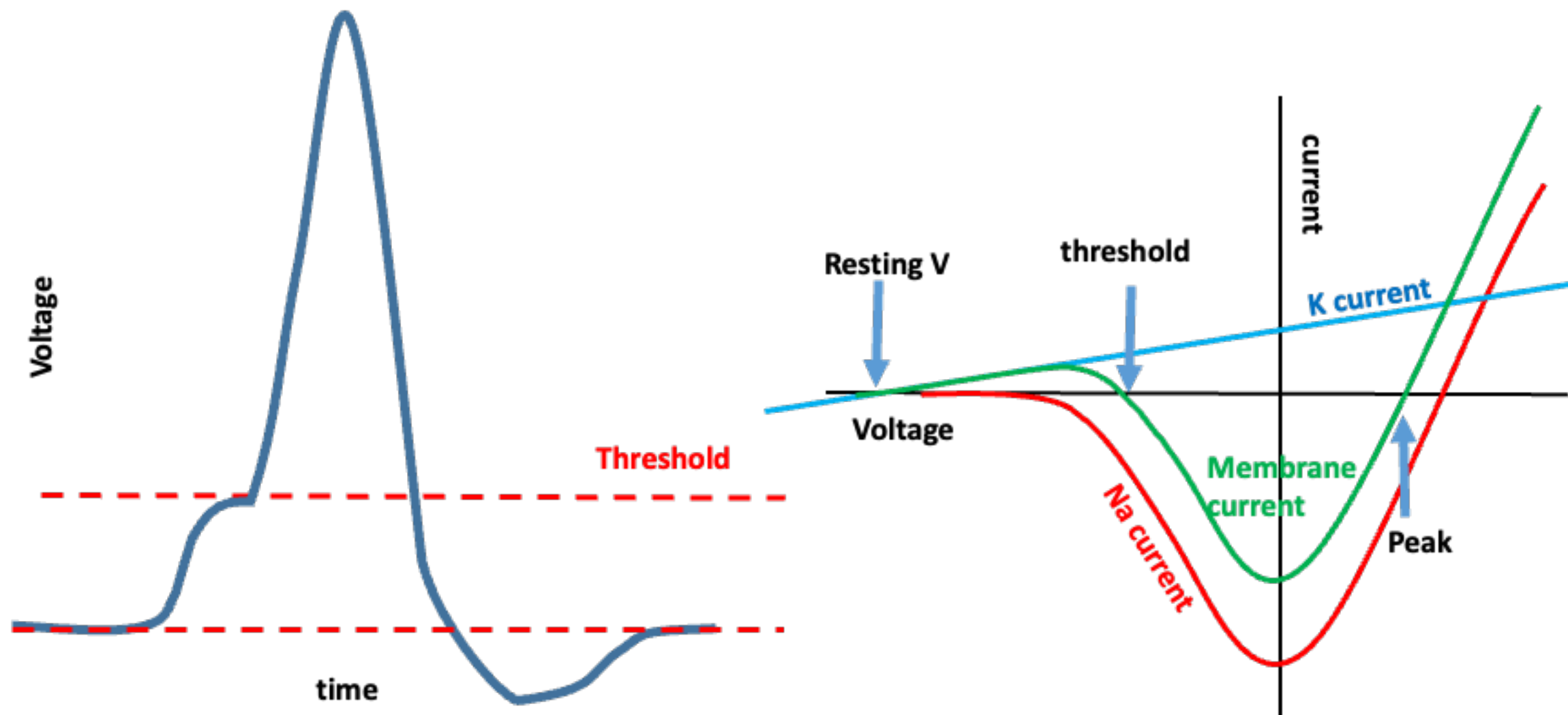


The Ins and Outs of an Action Potential



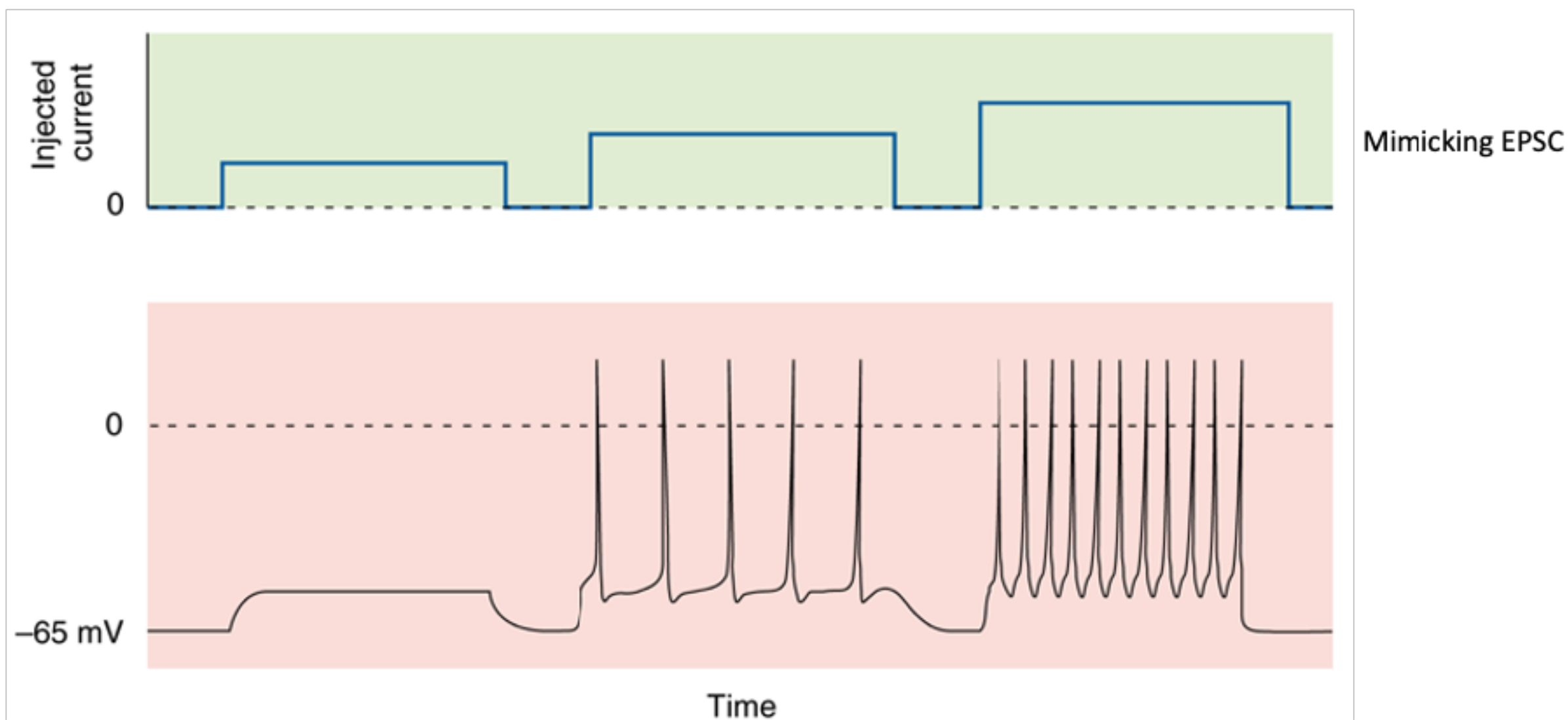
動作電位的產生:

全有全無律: 膜電位超過閾值則可產生動作電位

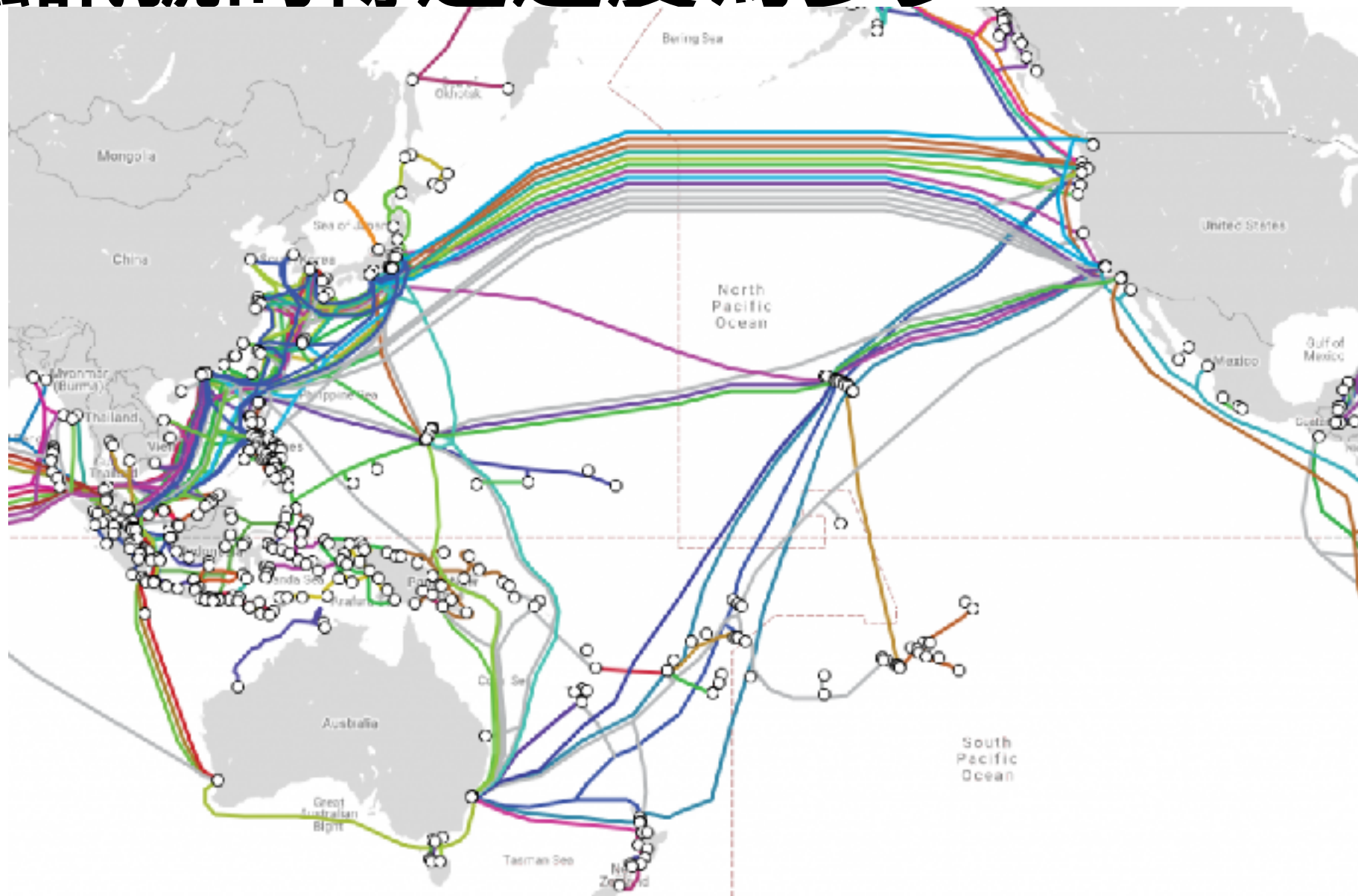


如果動作電位為全有全無，那神經的訊號怎麼產生？

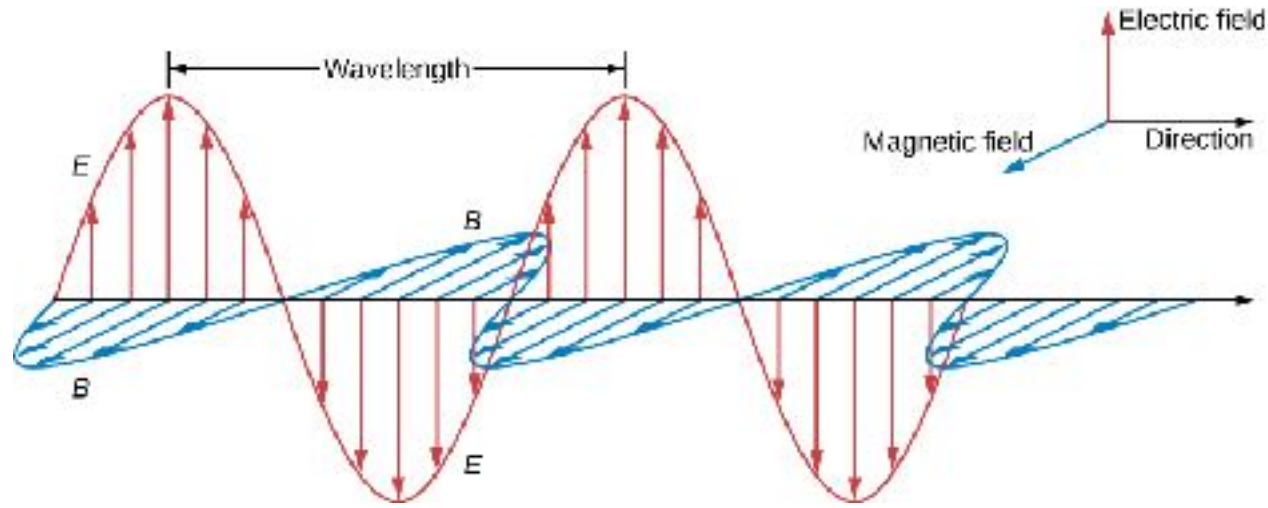
動作電位的頻率決定神經訊號的內容



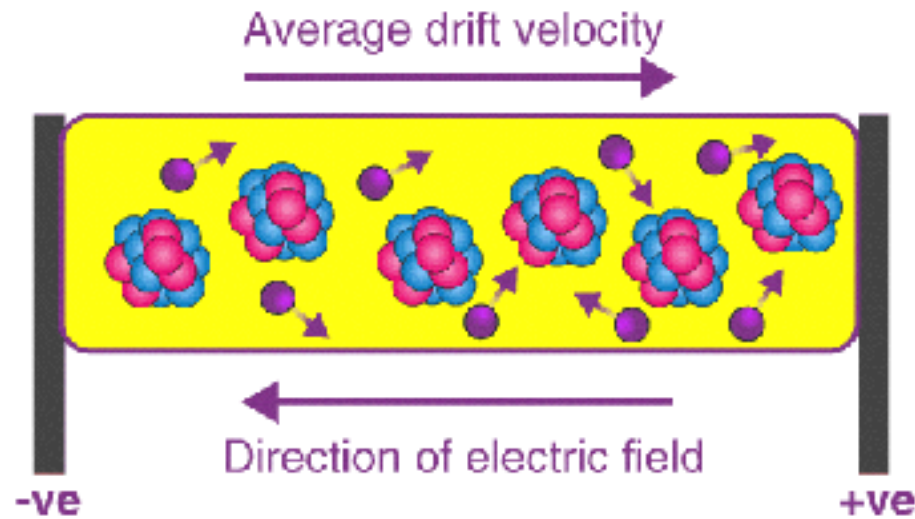
電磁訊號的傳遞速度為多少？



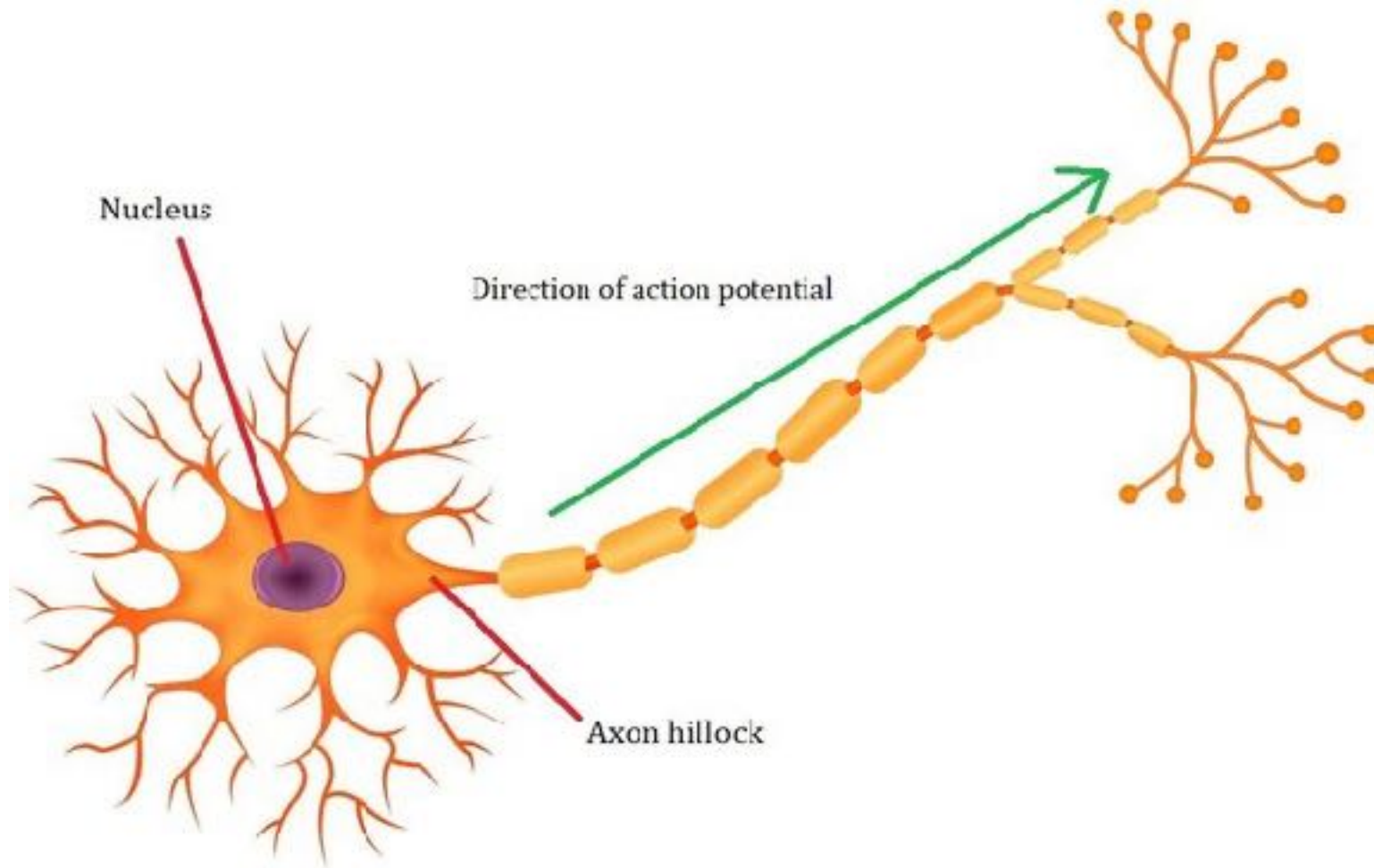
電磁波的傳遞速度: 50–99% 光速.



電子傳遞速度: ~ drift velocity and electron mobility.



神經動作電位傳導的速度？

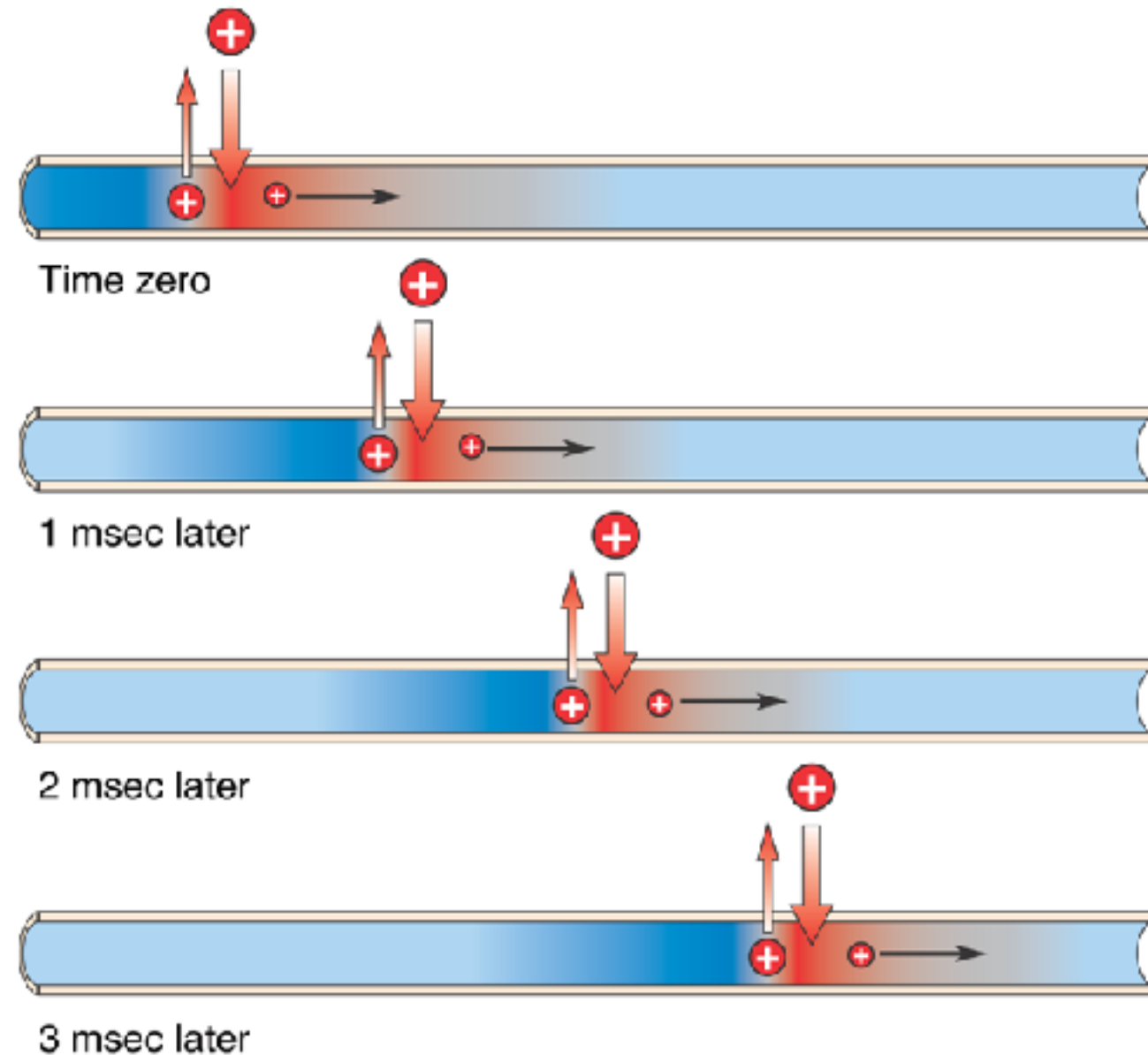


神經動作電位傳導的速度？

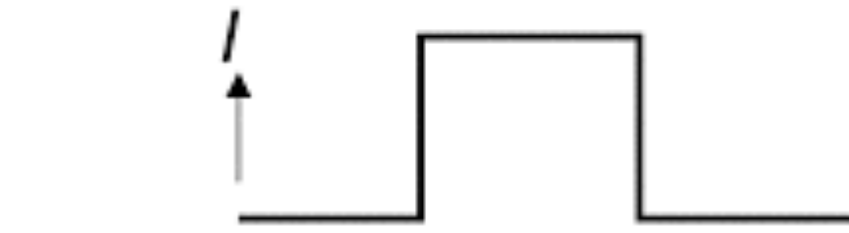
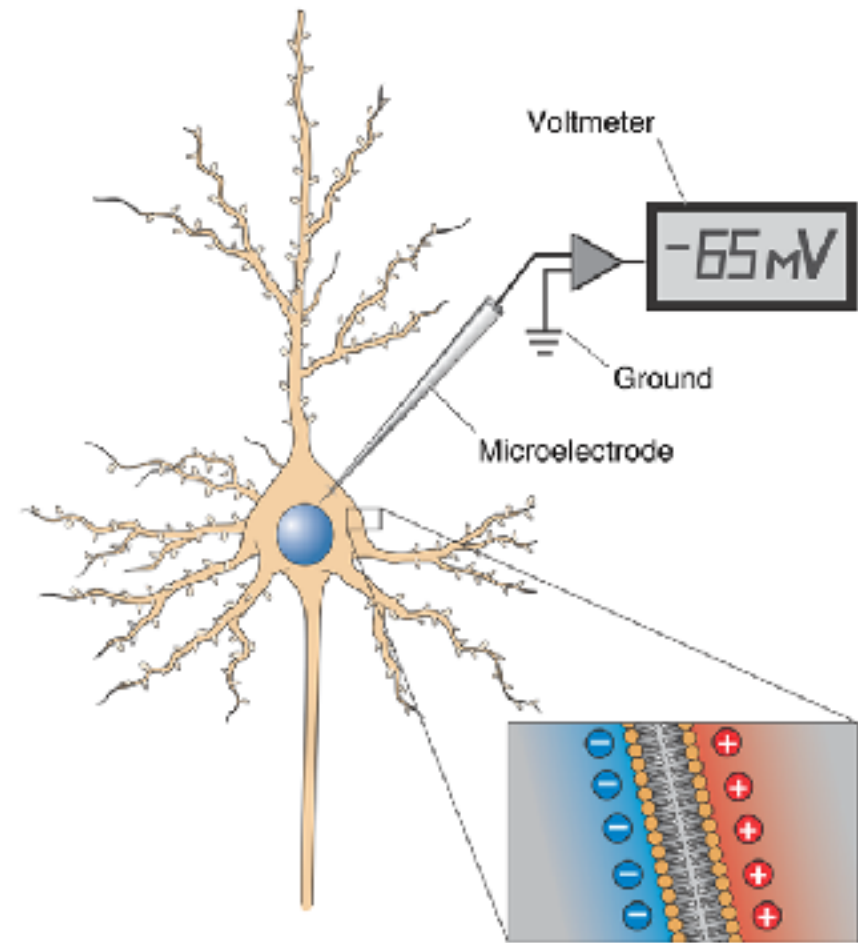
Typical conduction velocity: 10 m/sec

Length of action potential: 2 msec

Each action potential: ~2 cm

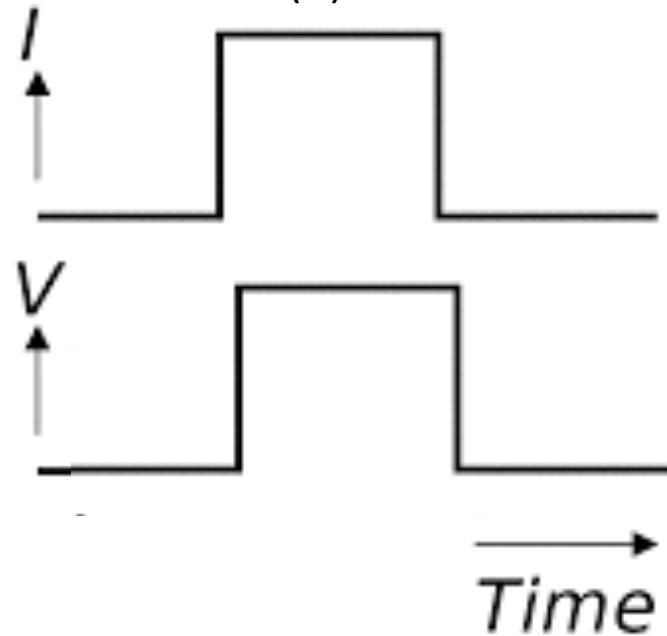


細胞膜有電阻以及電容:



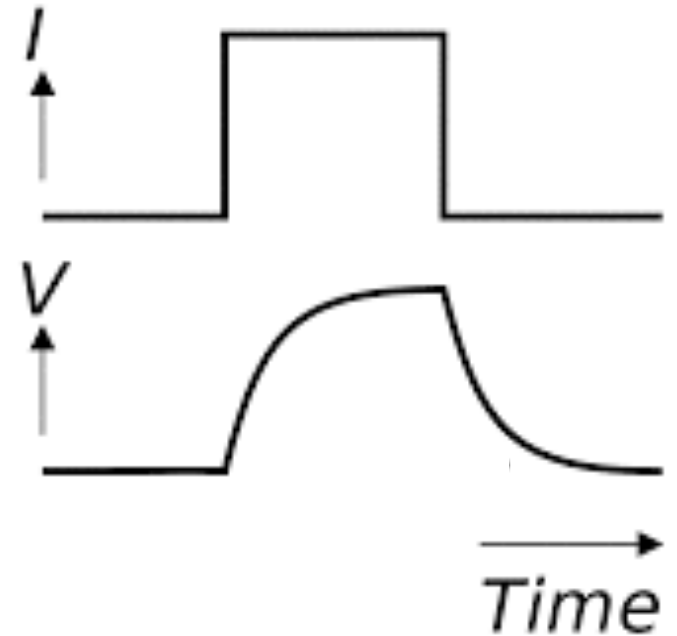
Resistive circuit

(A)

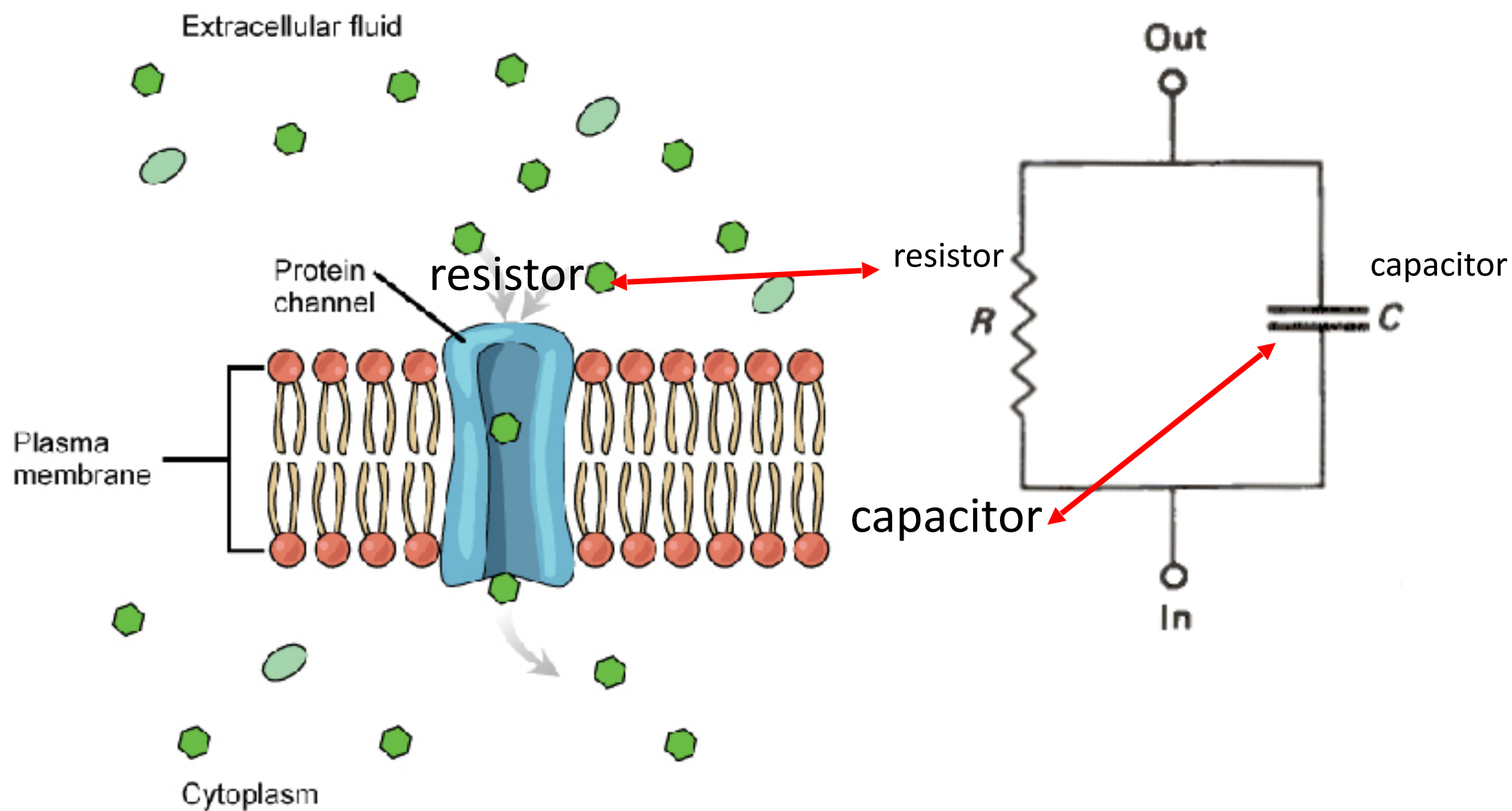


Resistive-Capacitive circuit

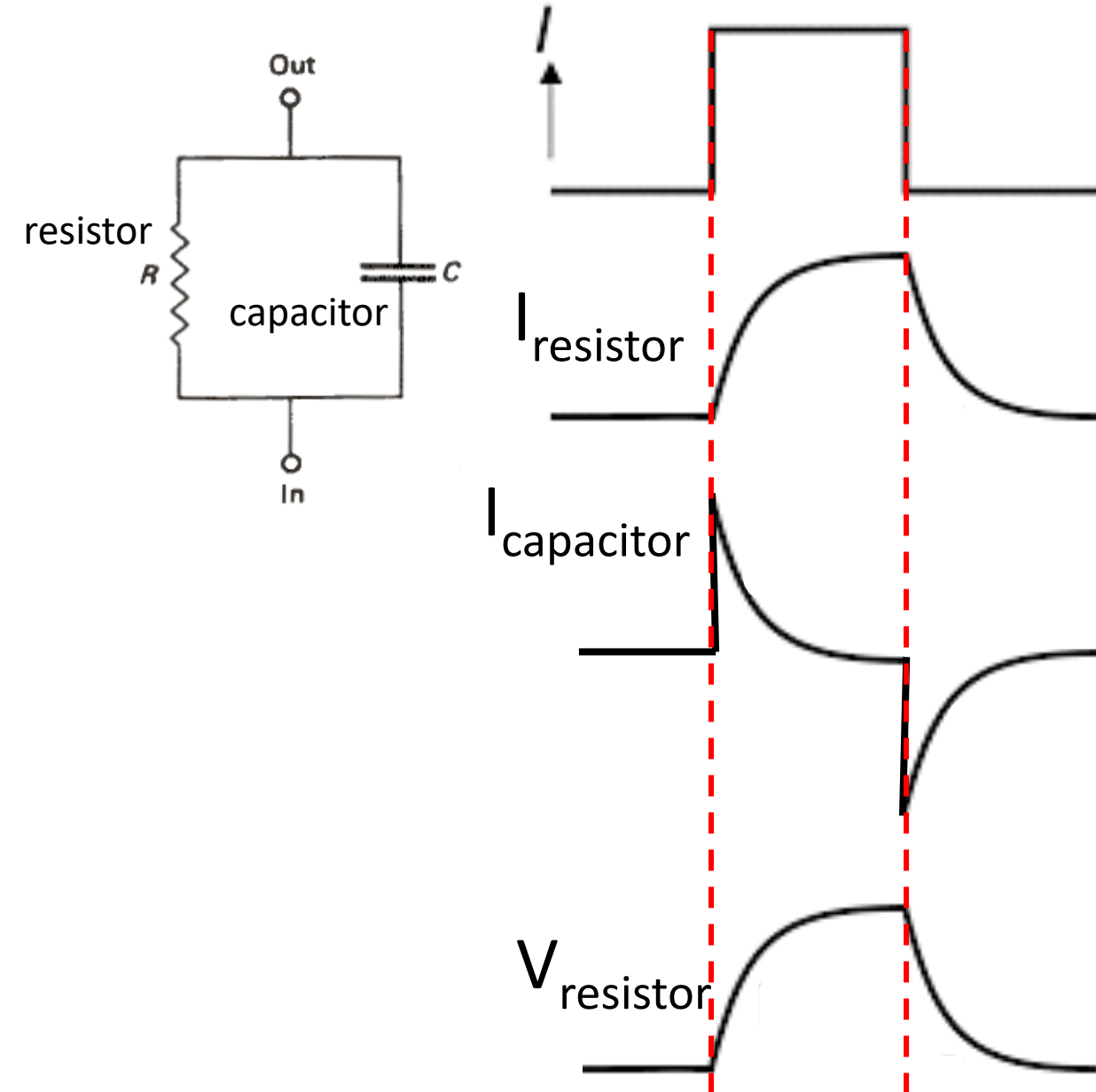
(B)



細胞膜有電阻以及電容:



Cell membrane as a RC circuit Time Constant



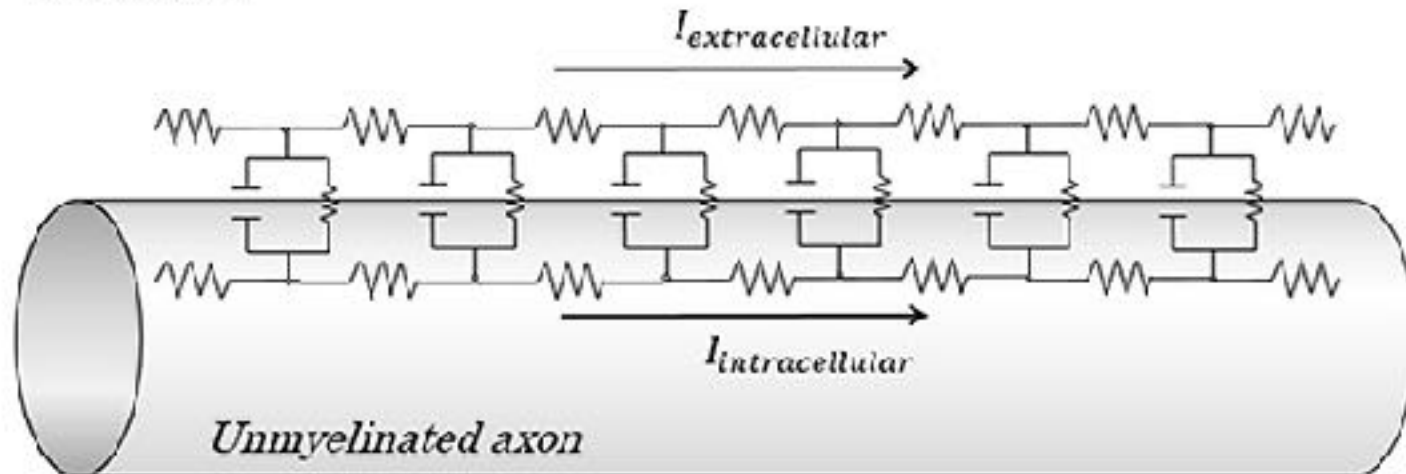
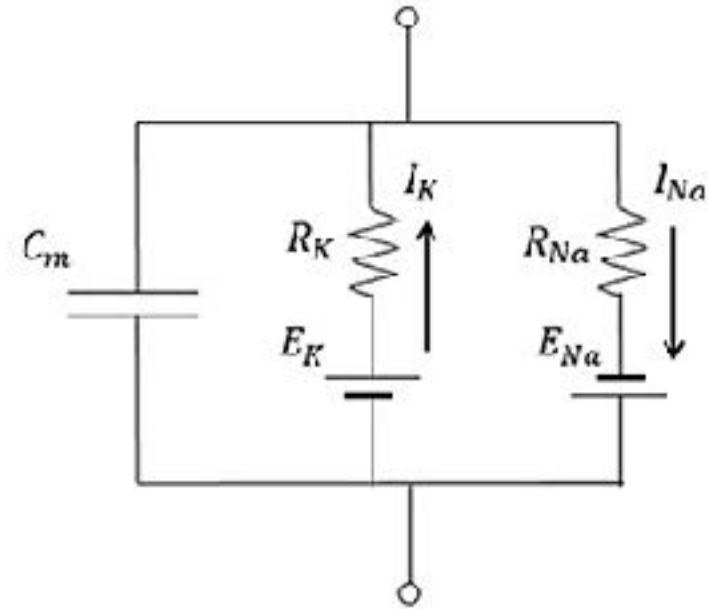
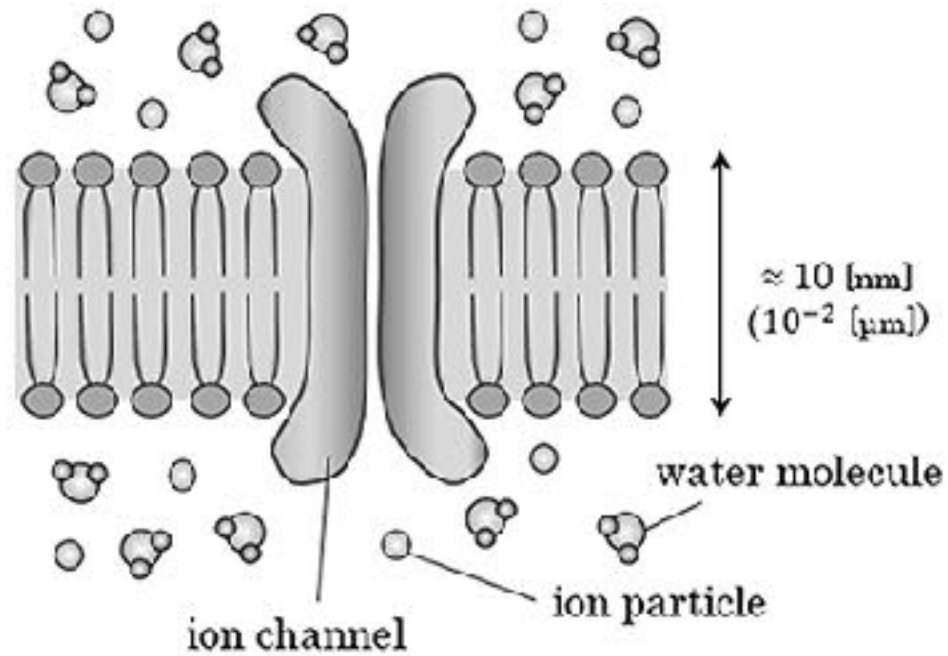
$$I_R = I_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right)$$

$$I_C = I_0 \left(e^{-\frac{t}{RC}} \right)$$

$$\text{As } V = IR,$$

$$V(t) = R I_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right)$$

動作電位傳導的數學模型:



髓鞘可增加動作電位傳導速度

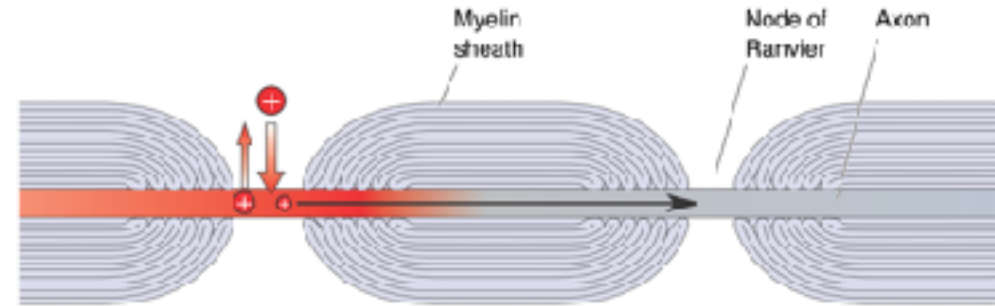
Un-myelinated axon: leaky pipe



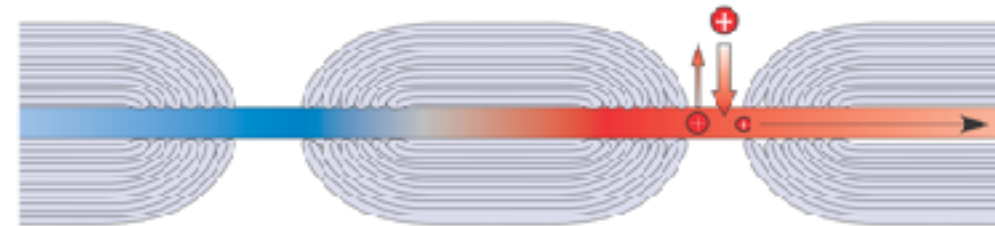
Using myelin “tape” to fix it



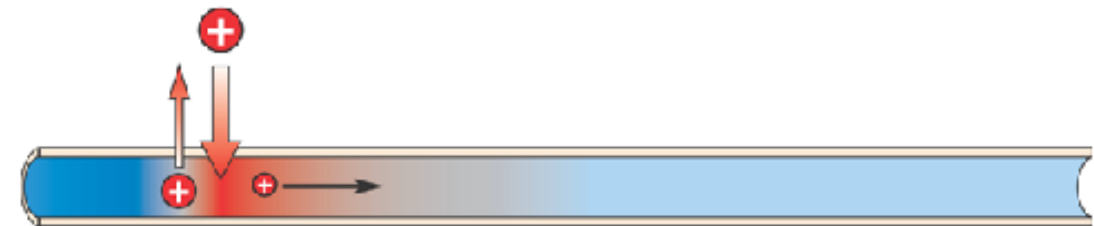
Saltatory conduction (Schwann cell)



Time zero



1 msec later

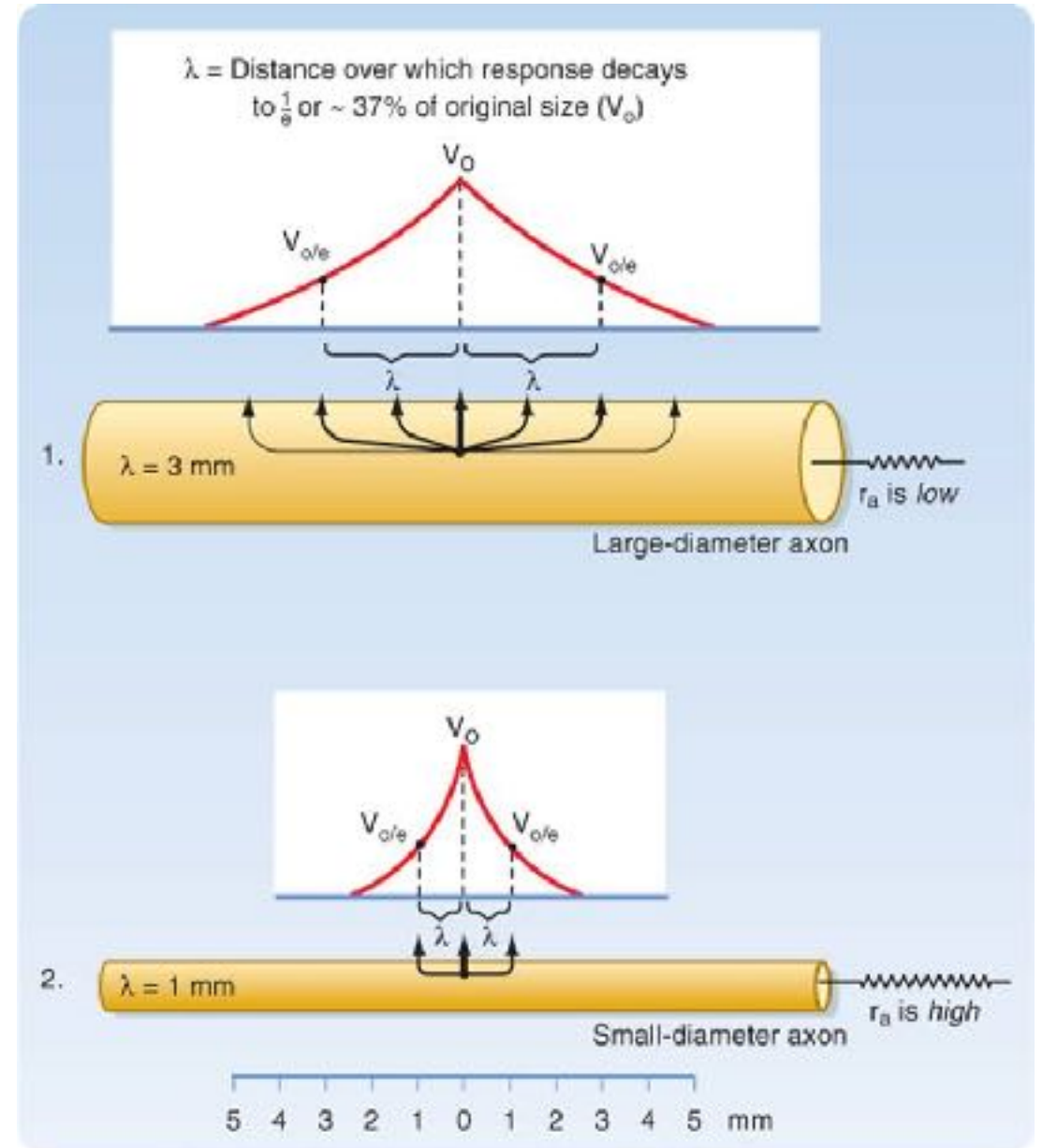
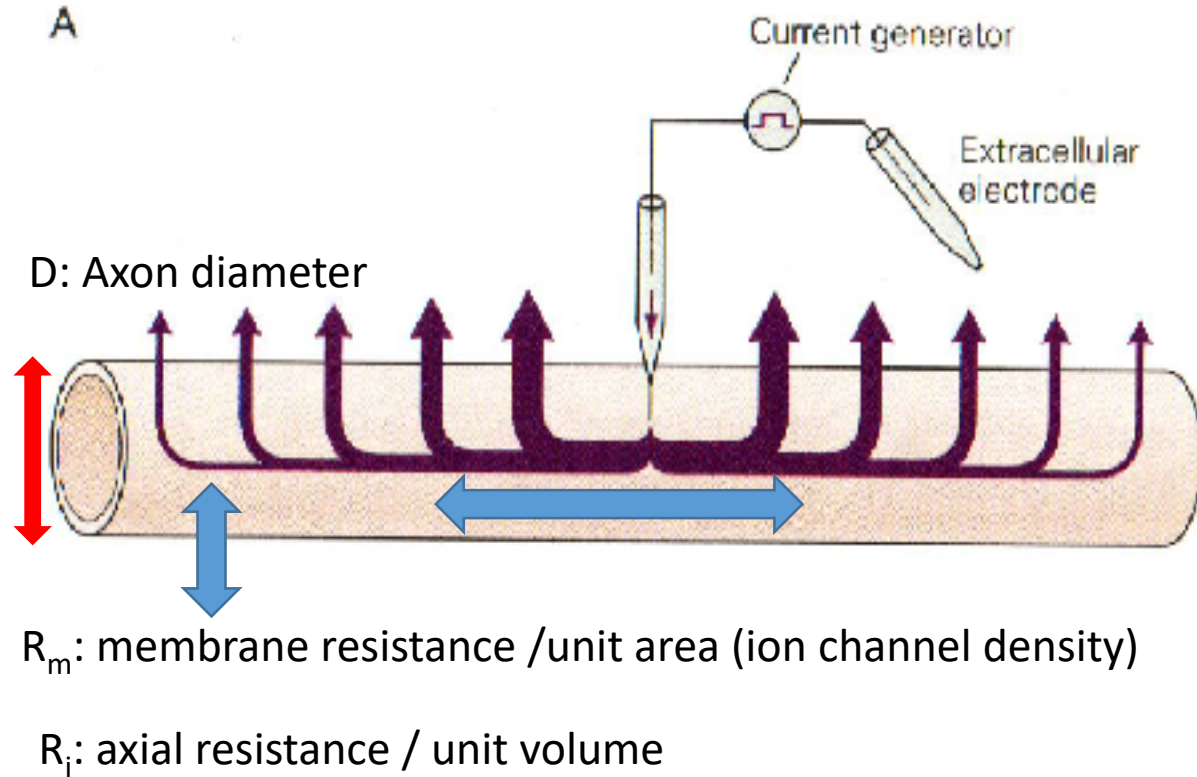


Time zero



1 msec later

Action potential propagation speed is depending on the ion channel density and axon diameter



常見的生物電訊號

細胞的膜電位
訊號非常細微
需要高解析度的儀器

專業錄音室



人體電訊號

心電圖

最強的人體電訊號
訊號規律 整齊劃一

合唱團



腦波圖

最複雜的人體電訊號

熱鬧的運動會



能快速運動（肉眼可見的速度）的植物：

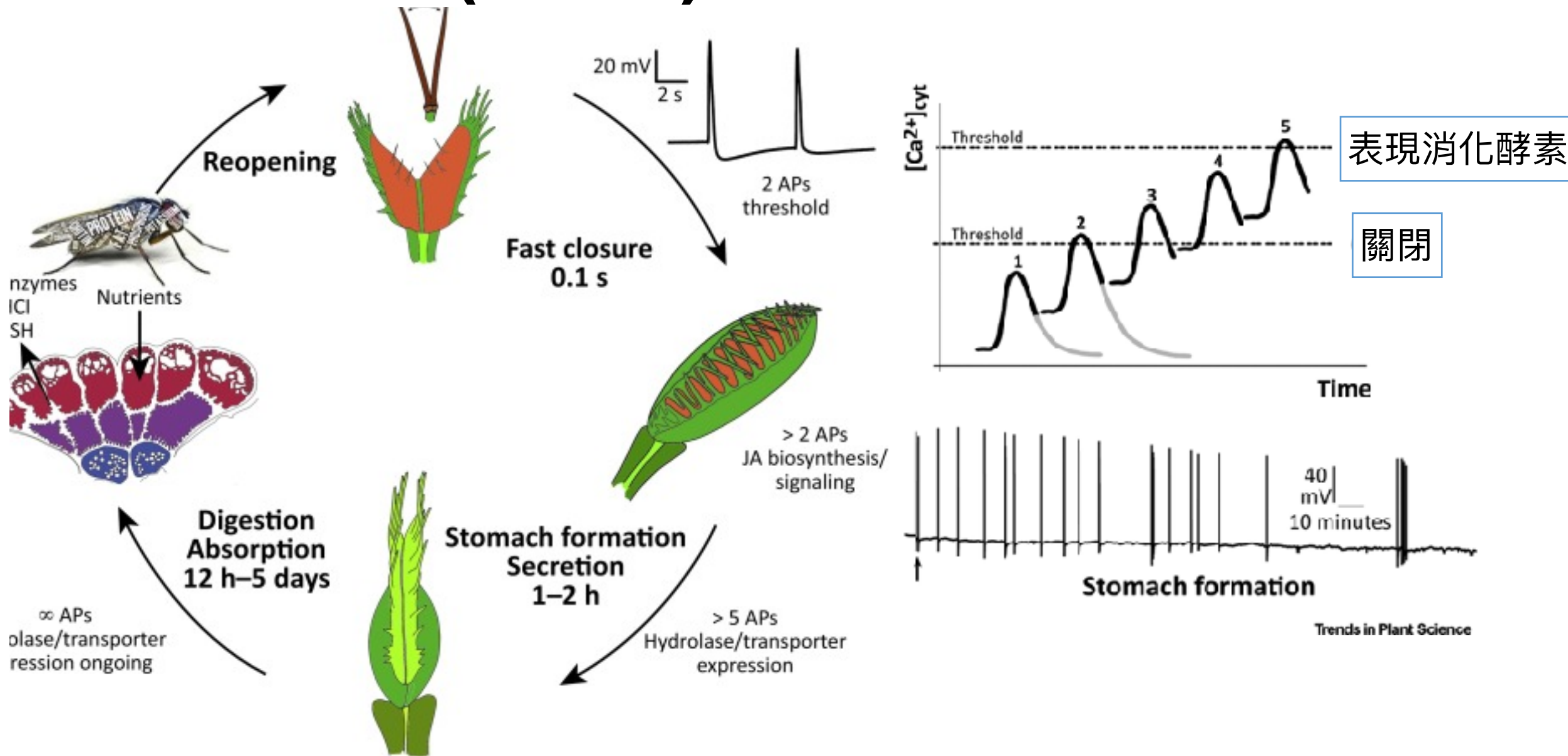
含羞草



補蠅草

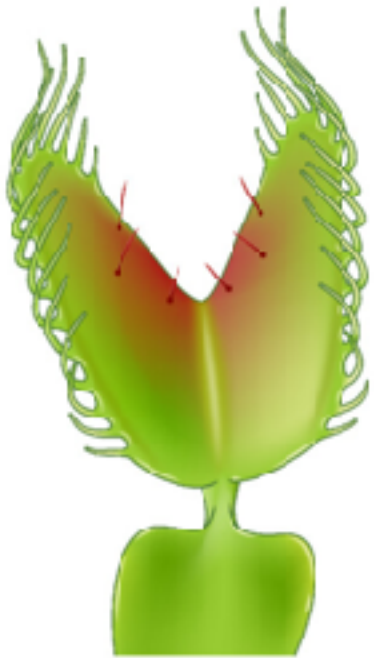


補蠅草：連續(<20秒)觸碰內壁的毛細胞：

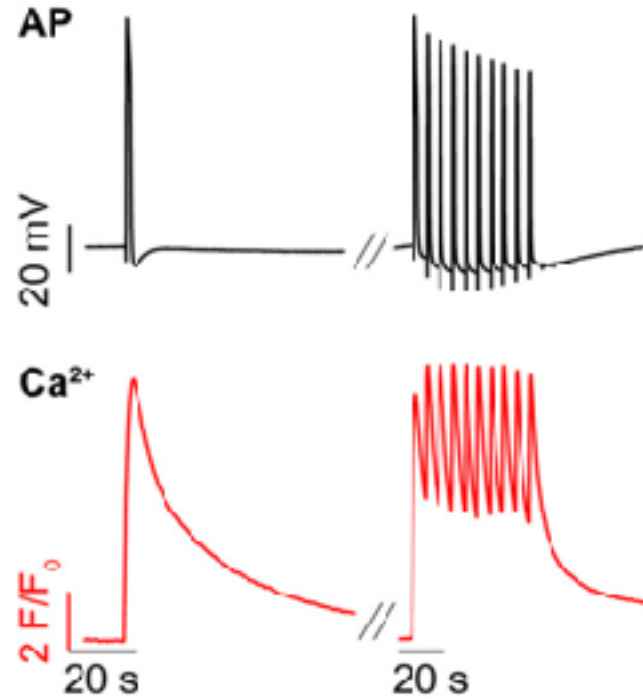


補蠅草：連續(<20秒)觸碰內壁的毛細胞：

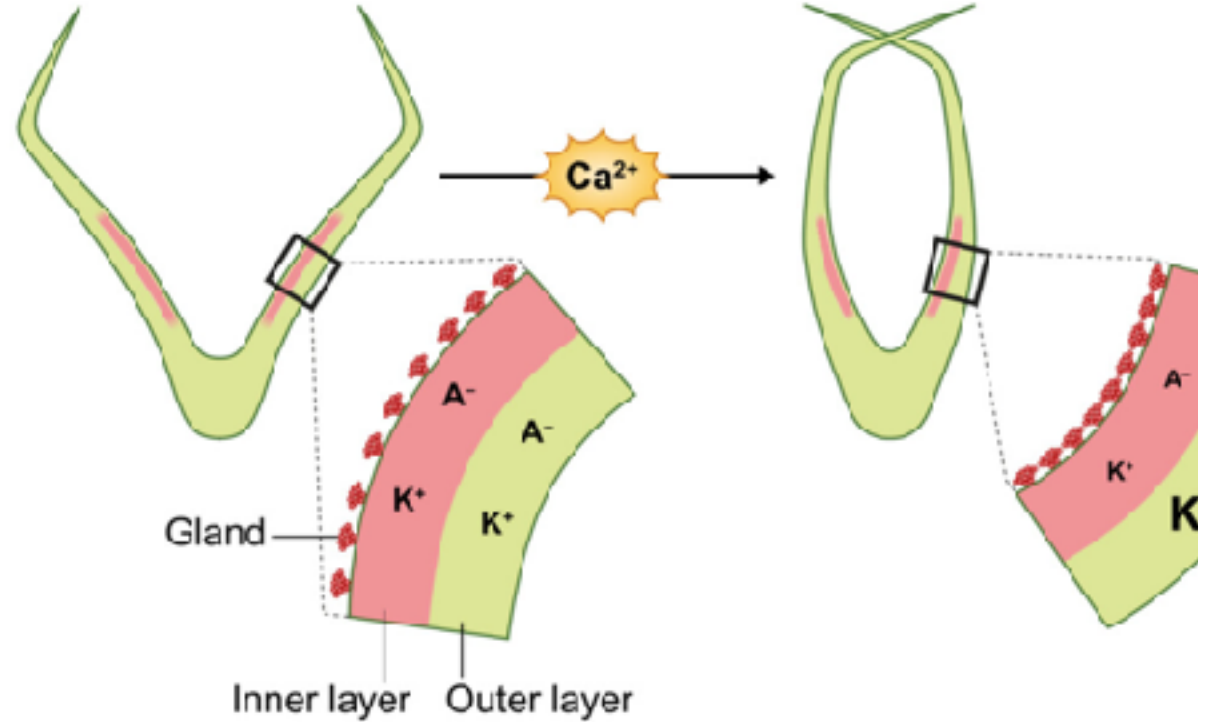
(a)



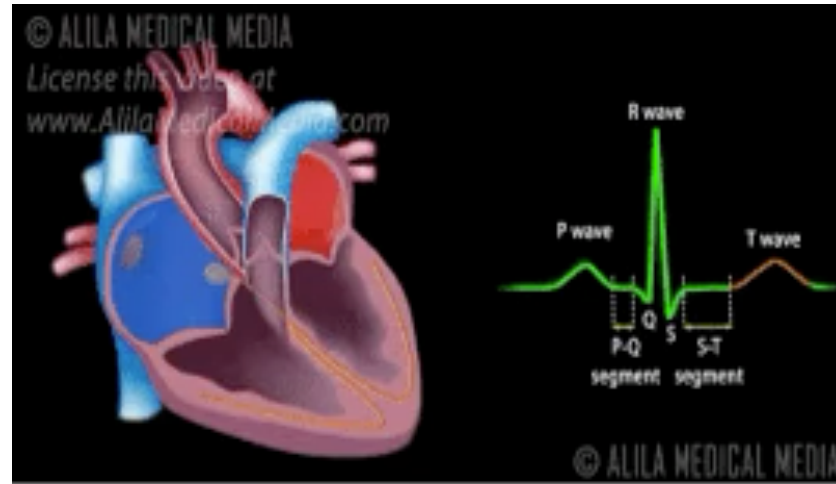
(b)



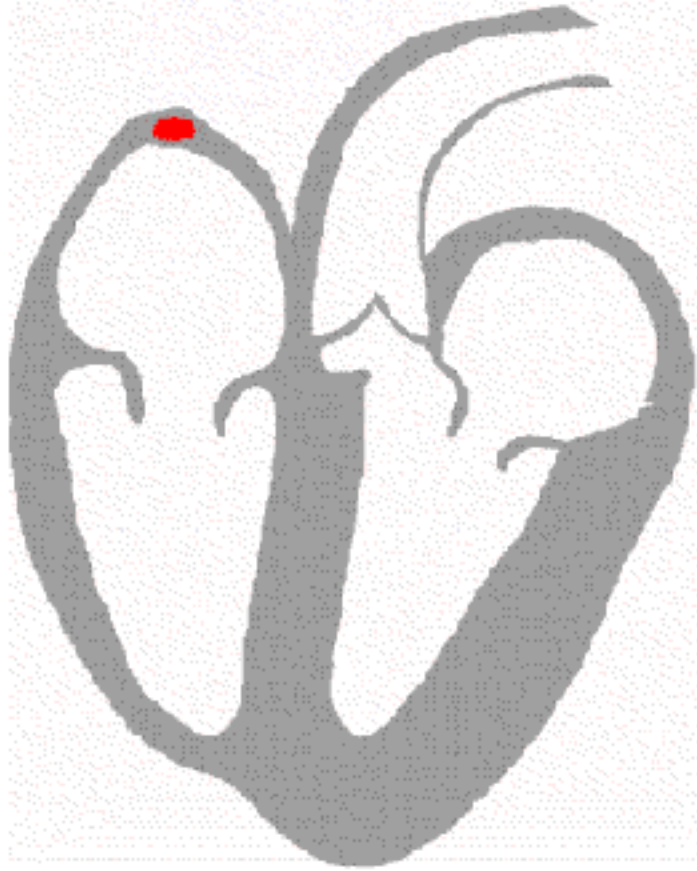
(d)



人體心臟無休止的產生規律的電訊號，來刺激心肌收縮



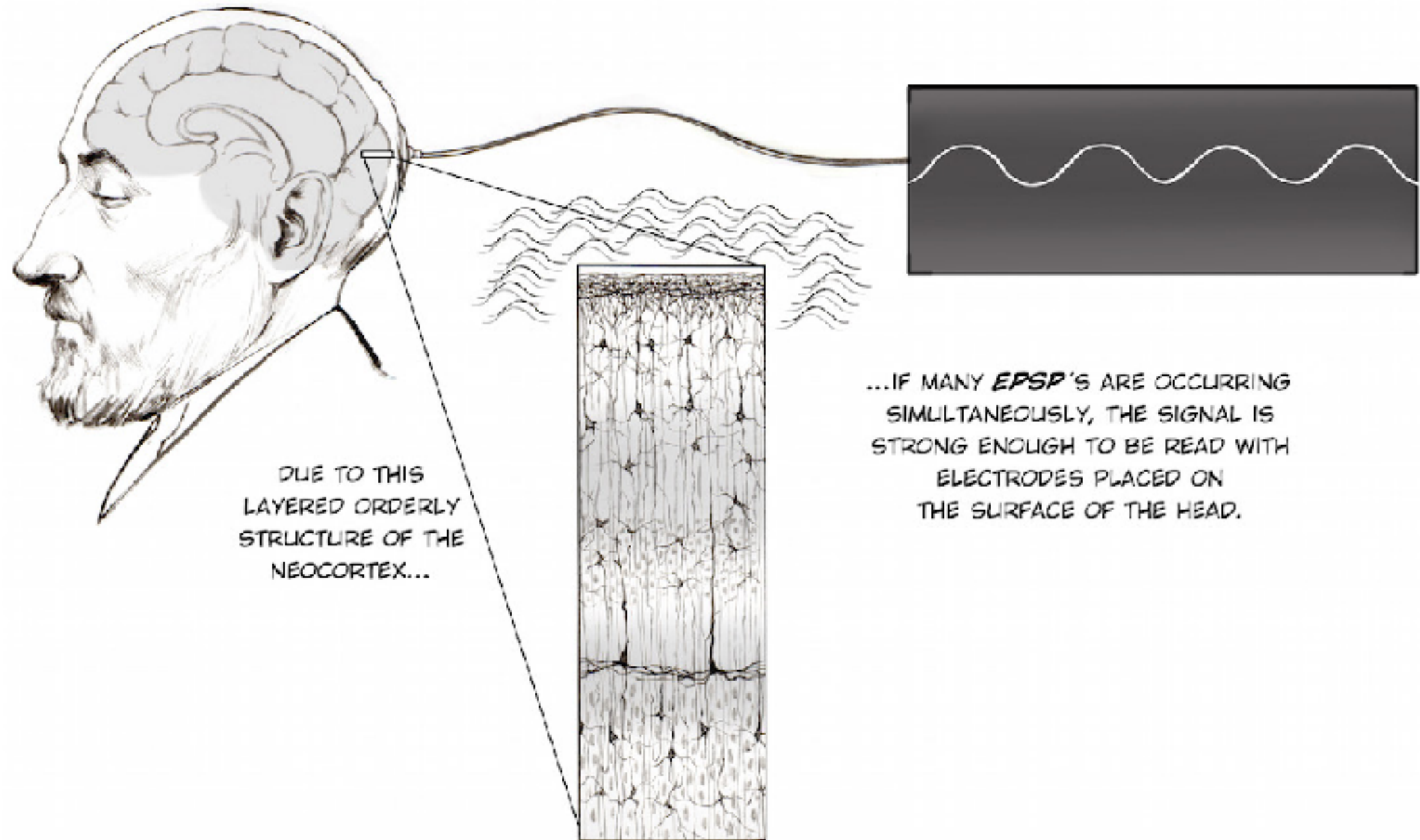
心電圖：人類體表最大的電訊號 非常規律



腦波：人體最複雜的電訊號



腦波：人體最複雜的電訊號



腦波：人體最複雜的電訊號



腦波：人體最複雜的電訊號

閉眼時產生alpha波

