

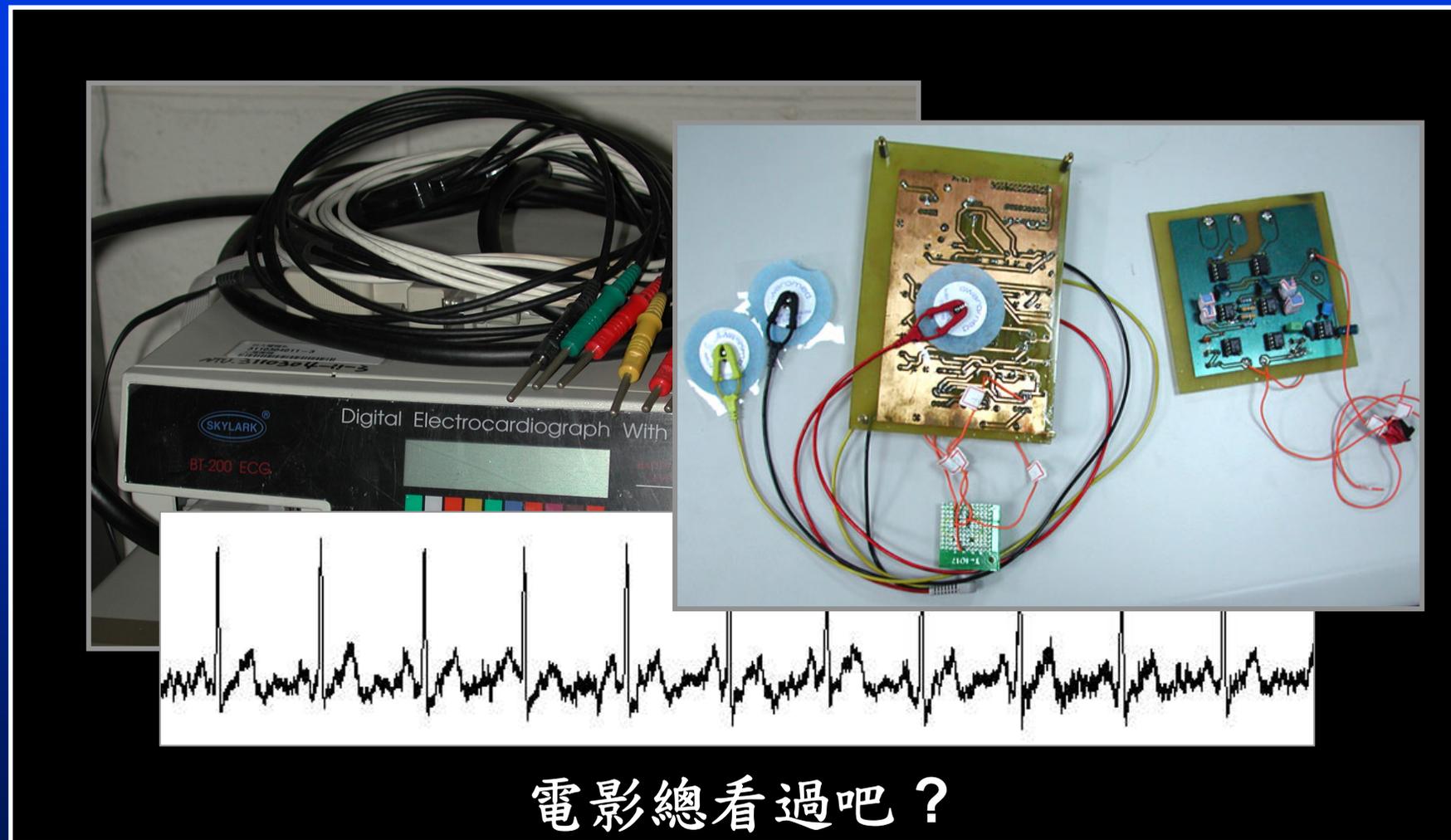
醫學量測儀器

Medical Instruments

鍾孝文 教授

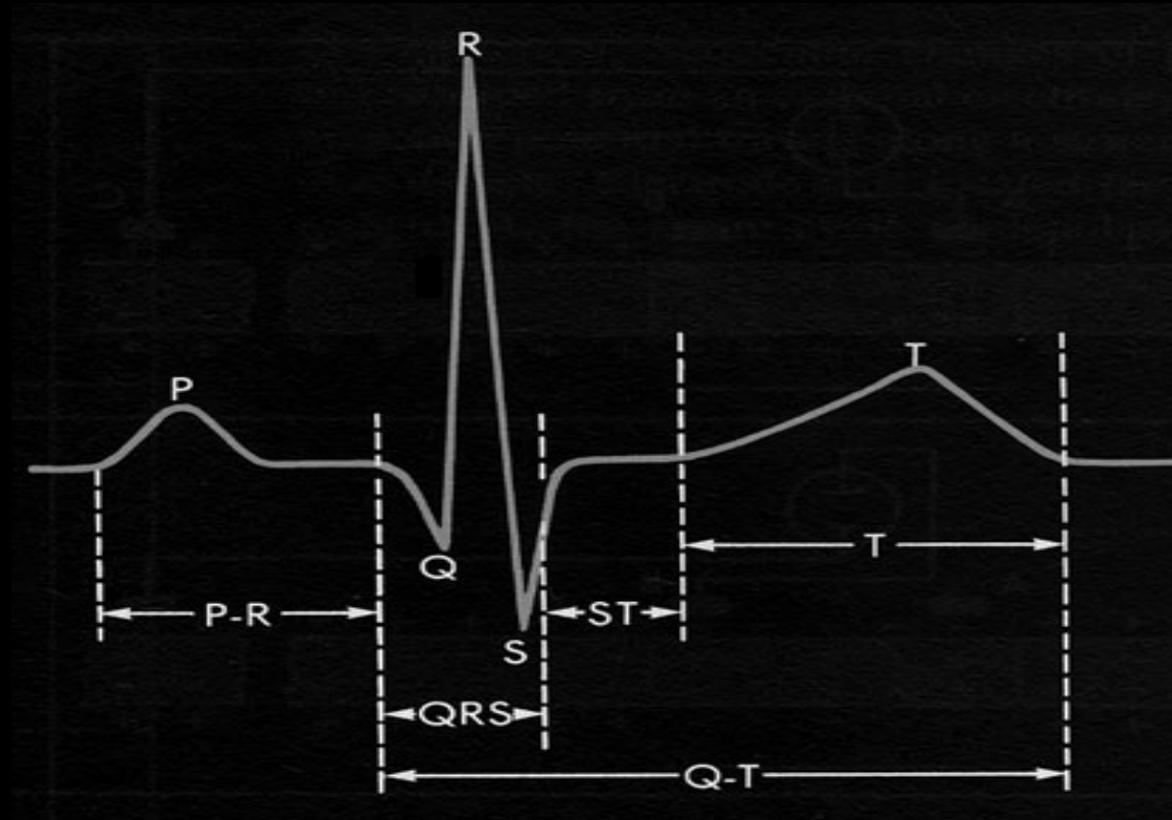
台大電機系 三軍總醫院放射線部

醫學量測儀器的例子：心電圖



電影總看過吧？

正常的心電圖波形



PQRST pattern

就從簡單的開始入手吧

- 心電圖 (Electrocardiography)
 - 如何量測心臟的電性？
 - 為什麼人體本身具有電性？
 - 心電圖反映出什麼疾病？

心電圖概念簡述

- 心肌受電刺激後產生收縮搏動
- 心肌電性變化反映至體表
- 振幅最大值約在 4 mV 左右
- 好，你給我量個心電圖出來 ...

量測儀器原理

Instrumentation

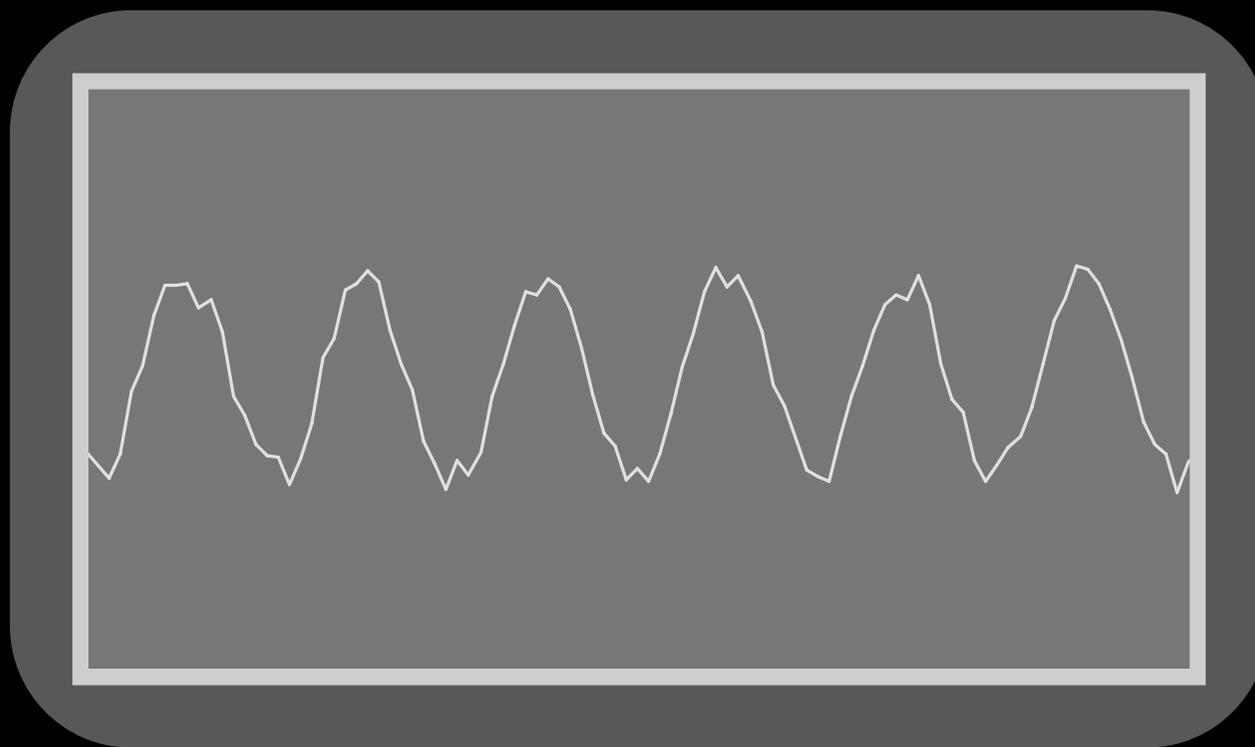
鍾孝文 教授

台大電機系 三軍總醫院放射線部

心臟成為電壓信號源

- 取左右手做為量測點
- 以示波器作為顯示幕
- 右手抓住探針頭，左手抓住地線
- 示波器顯示心電圖信號？

兩手接觸示波器探針的信號波形

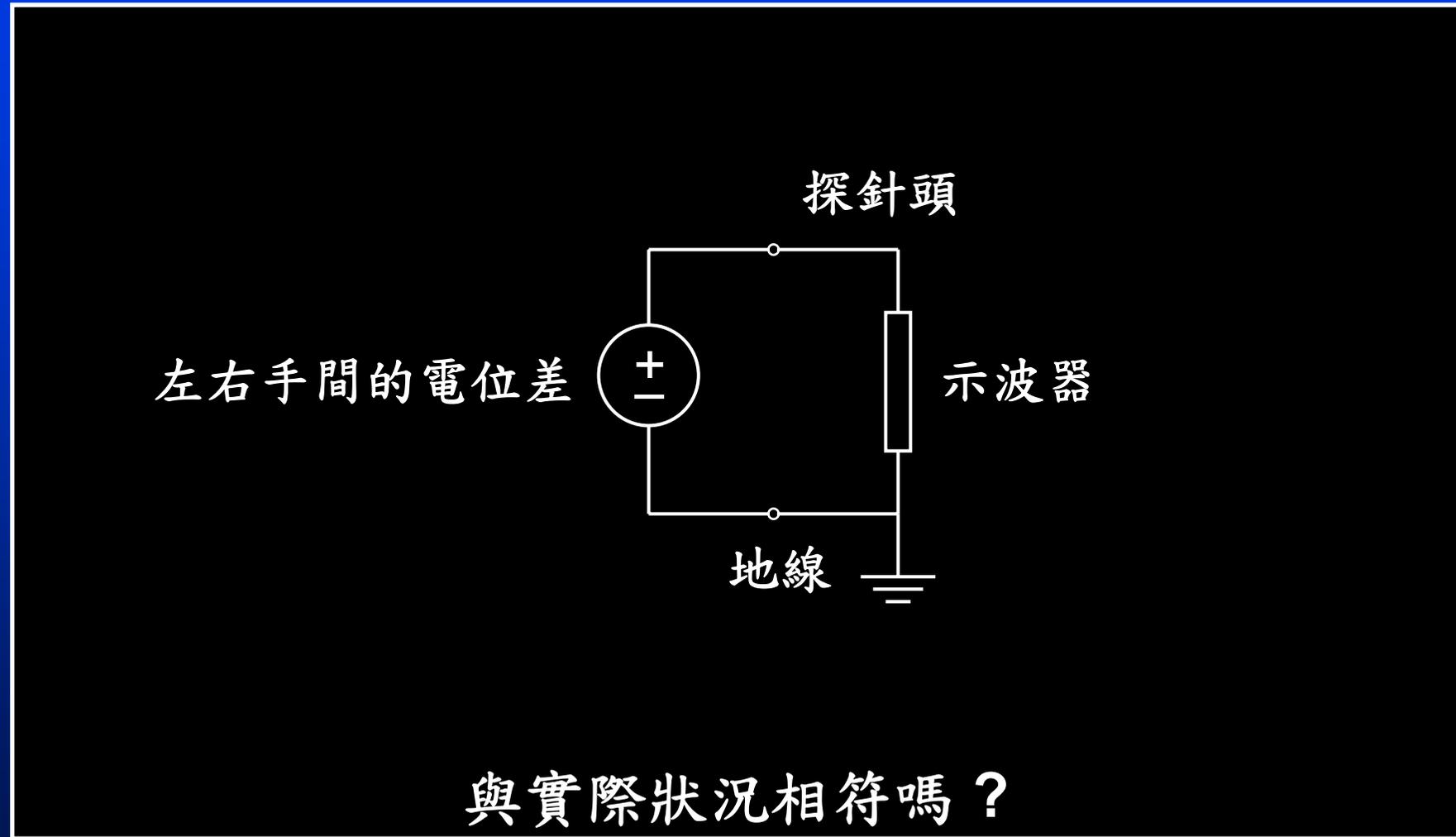


????

這個信號是什麼？

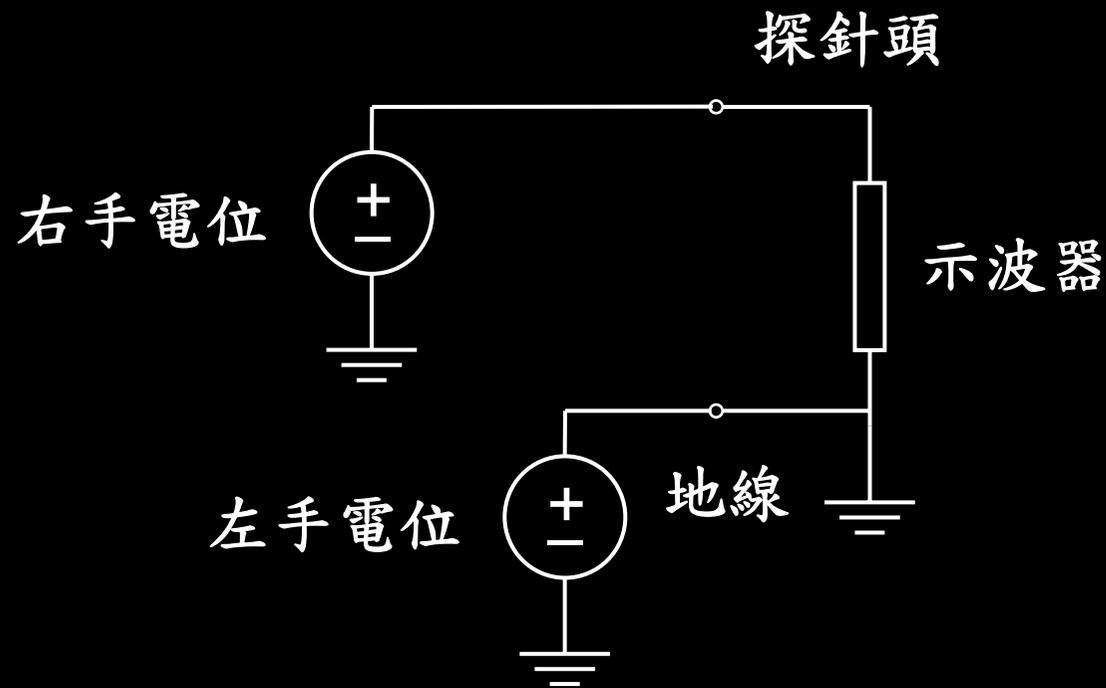
- 有反映心跳狀況嗎？
- 跟生理有關嗎？
- 既然不是心電圖，那麼哪裡錯了？

示波器量測一個信號源的等效電路



與實際狀況相符嗎？

示波器量測兩個信號源的等效電路



有沒有測到兩手之間的電位差？

測到的不是電位差

- 而是探針點的絕對電位
 - 包含共模信號等各種成份
- **60 Hz power line interference**
 - 一般而言遠大於生理電信號

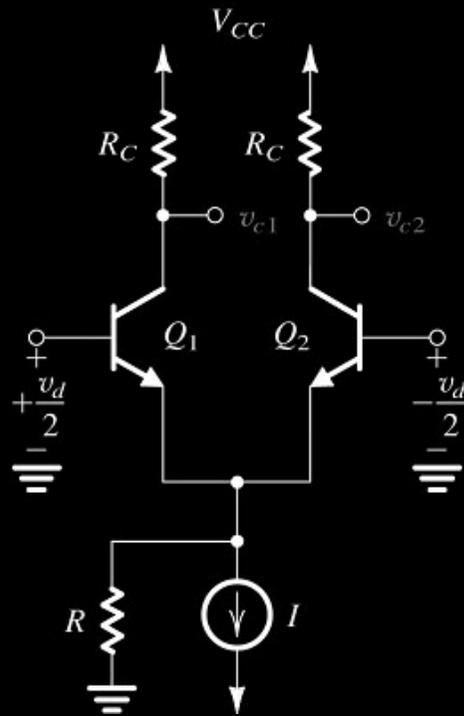
60 Hz 的來源

- 牆壁內的電源線等 (導體)
- 與人體 (導體) 不直接接觸：電容
- 60 Hz：交流電，可經由電容傳導
- 其他 coupling 方式也有，暫時不提

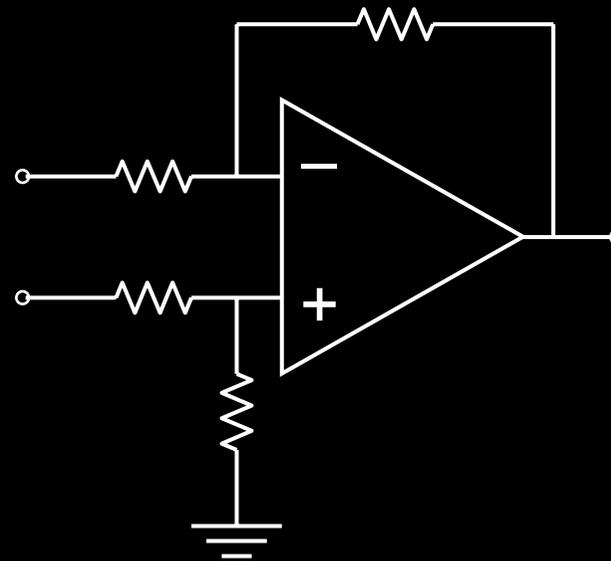
為什麼 60 Hz 是共模信號？

- 沒有人這樣說！
- 但是人體體表若視為導體，整體大致上可看成平行板中的一片
- 體表不同部位間差異有限

修正電路為 Differential Amplifier



BJT 版

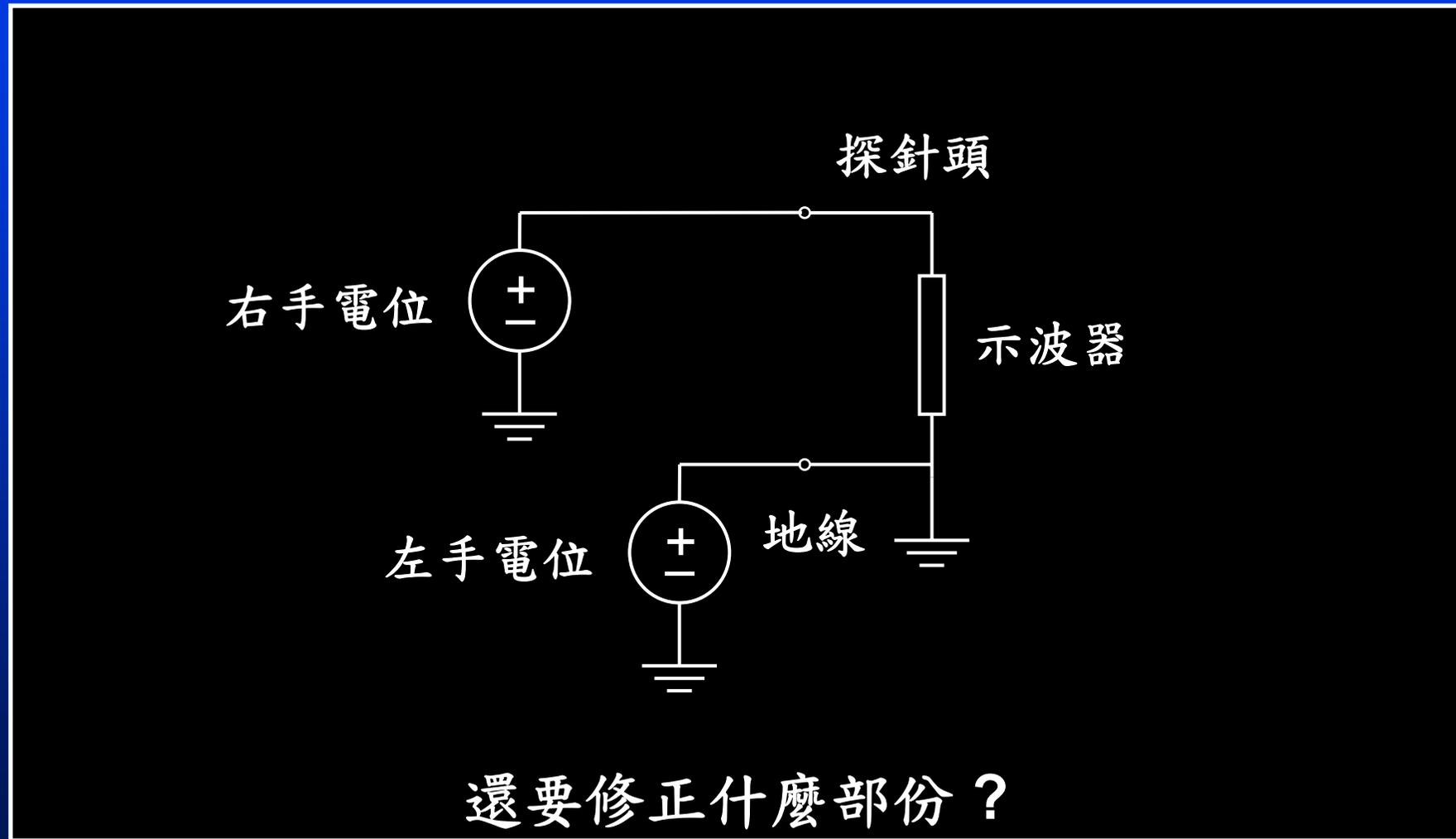


Op Amp 版

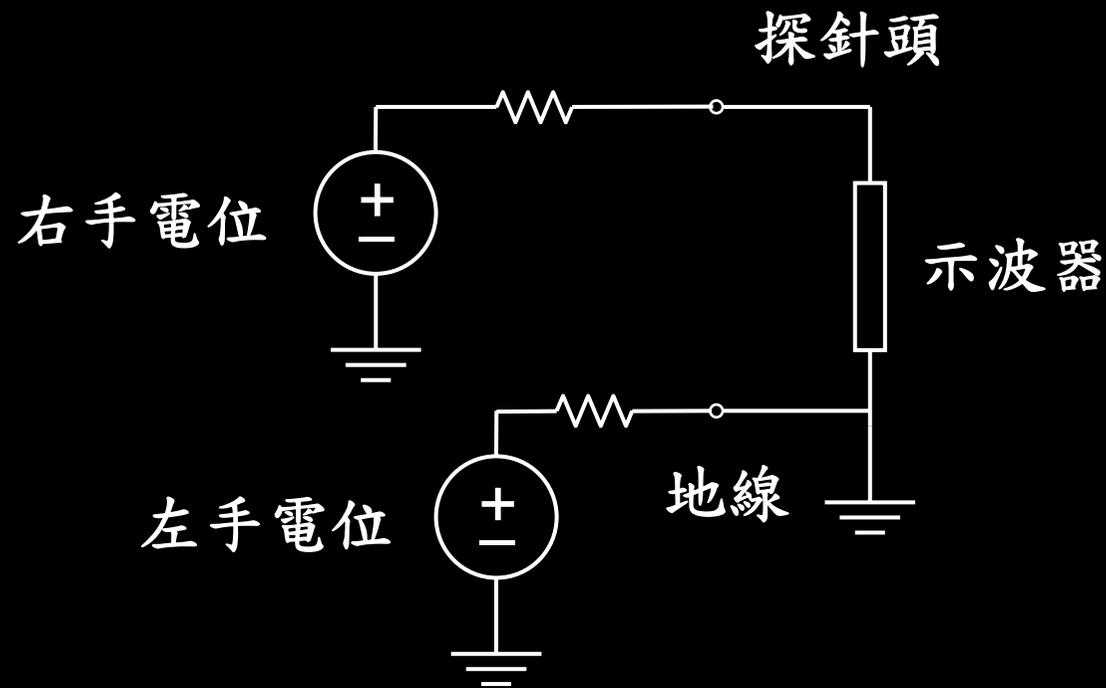
問題並沒有解決

- 如果去掉 60 Hz 就能解決，那當初的 60 Hz 至少應該疊加在 ECG 上
- 實驗結果是沒有疊加
- 那麼剛才的預測出了什麼問題？

示波器量測兩個信號源的等效電路



兩個不完美電壓信號源的等效電路

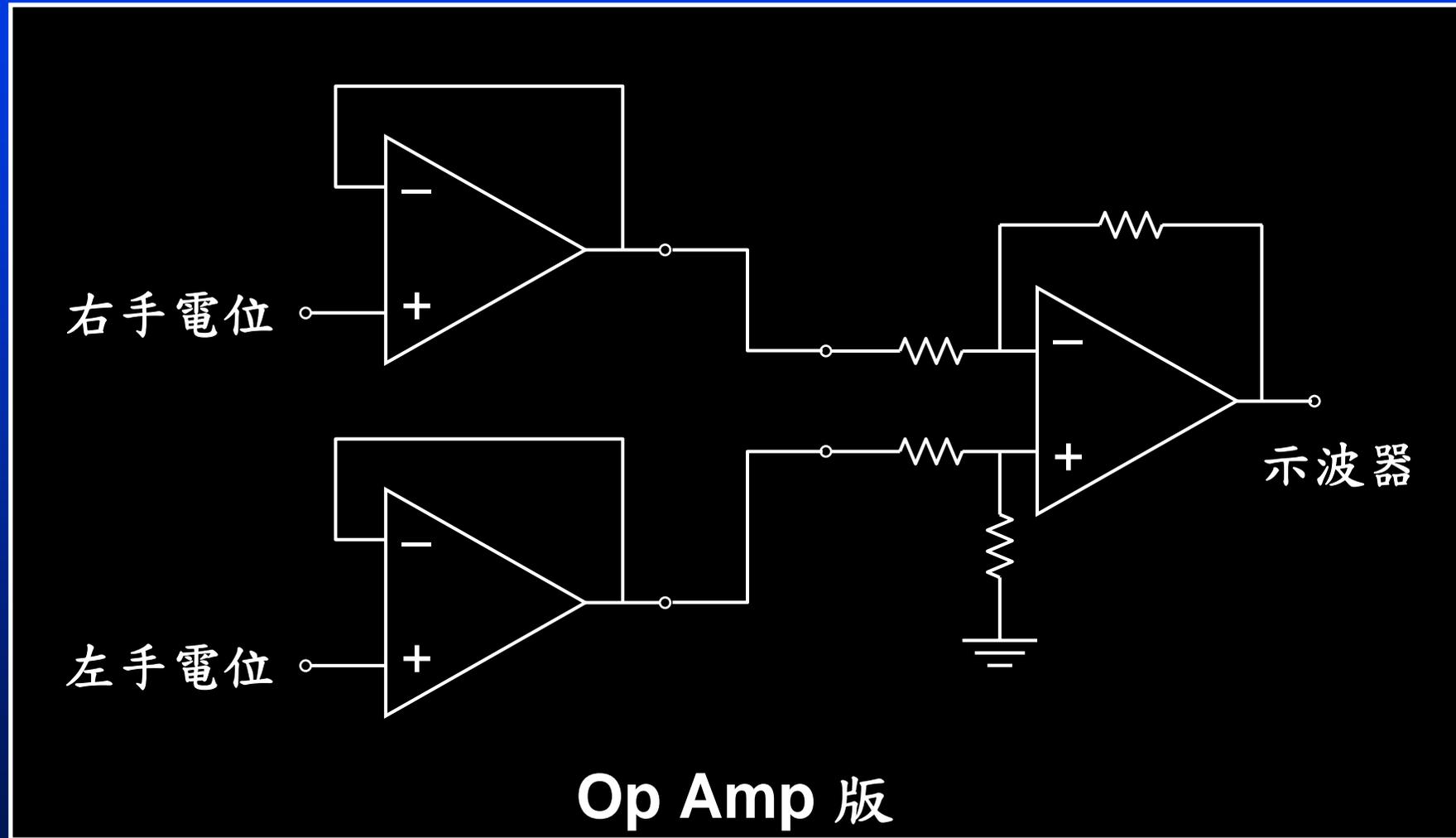


心電圖決非完美電壓信號

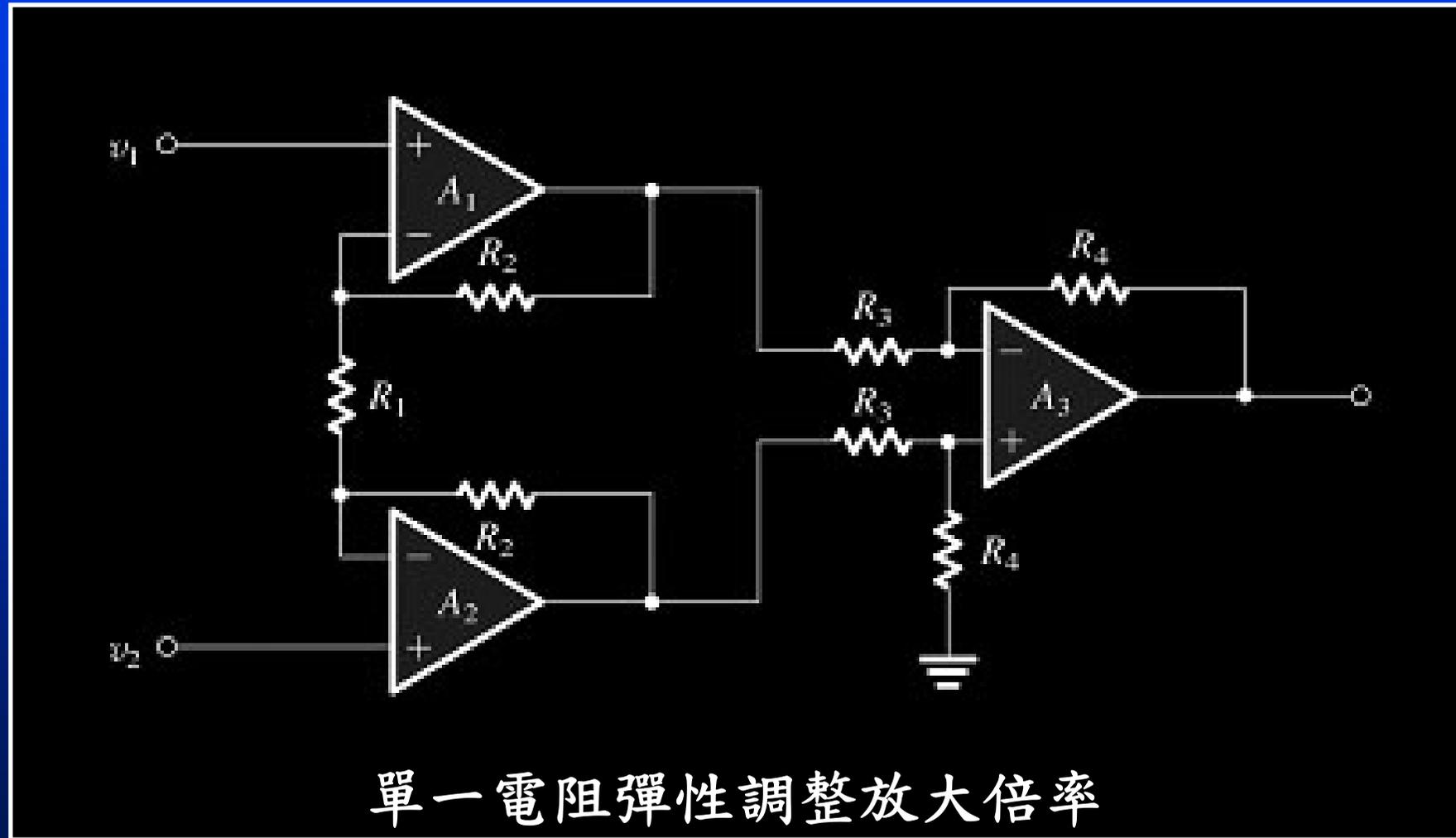
從定性到大約定量 ...

- 人體皮膚電阻幾何？ $10^5 \sim 10^6 \Omega$
- 示波器輸入阻抗多少？ $\sim 10^6 \Omega$
- 就算你不知道，至少也猜得出電路修正方式 → 提高輸入阻抗

修正電路：Voltage-buffered Diff Amp



再修正：儀表放大器



儀表放大器電路

- 三個 Op Amp 可組成，量測常用
- 輸入端兩側 Op 與電阻如何匹配？
- 做成單一一顆 monolithic IC
 - Analog Device, Burr-Brown

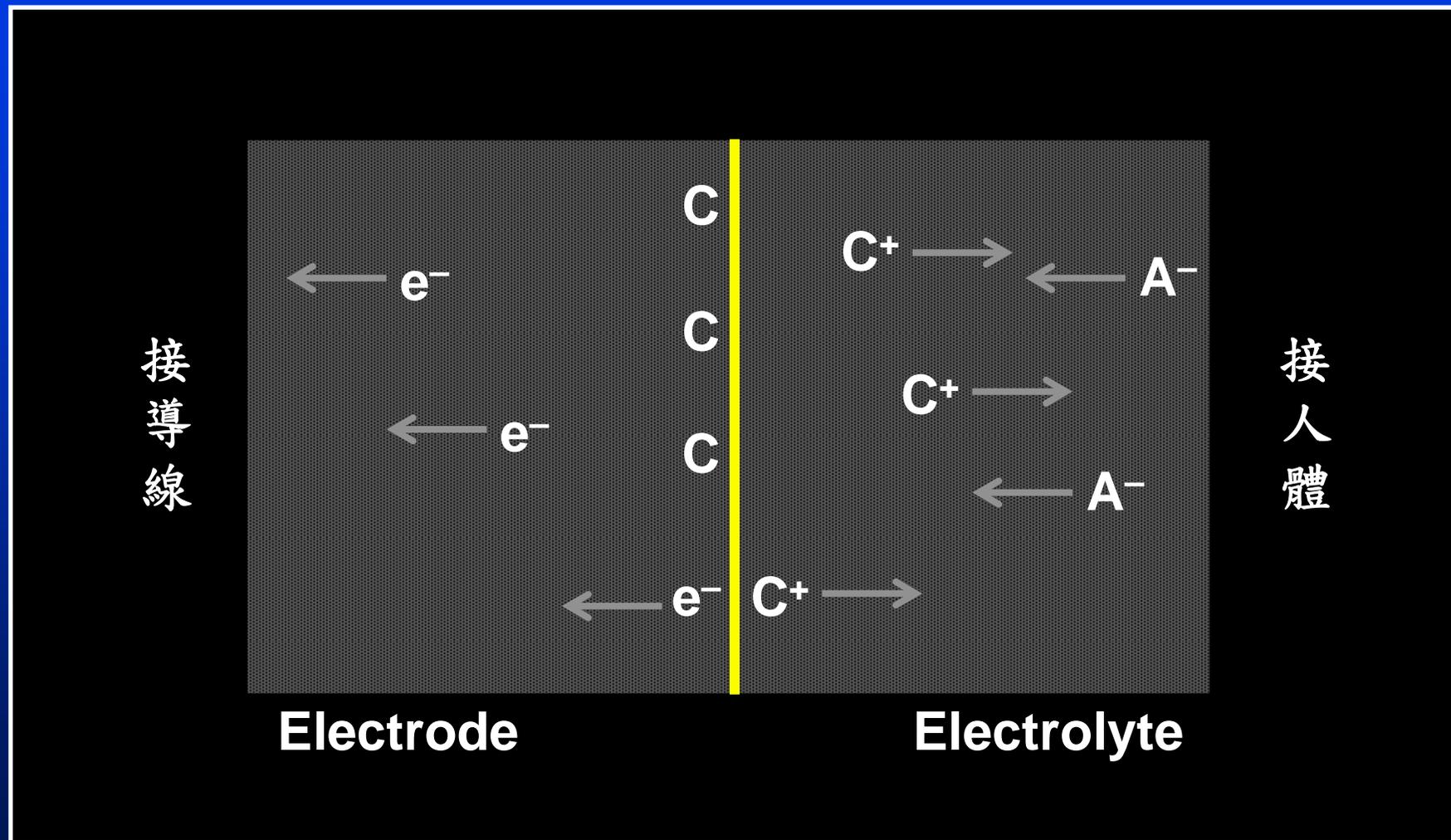
對不起，還沒結束

- 皮膚電阻 $\sim M\Omega$ 不是直接量測值！
 - 生理電信號來源：離子
 - 電路中的信號來源：電子
- 兩者如何轉換？

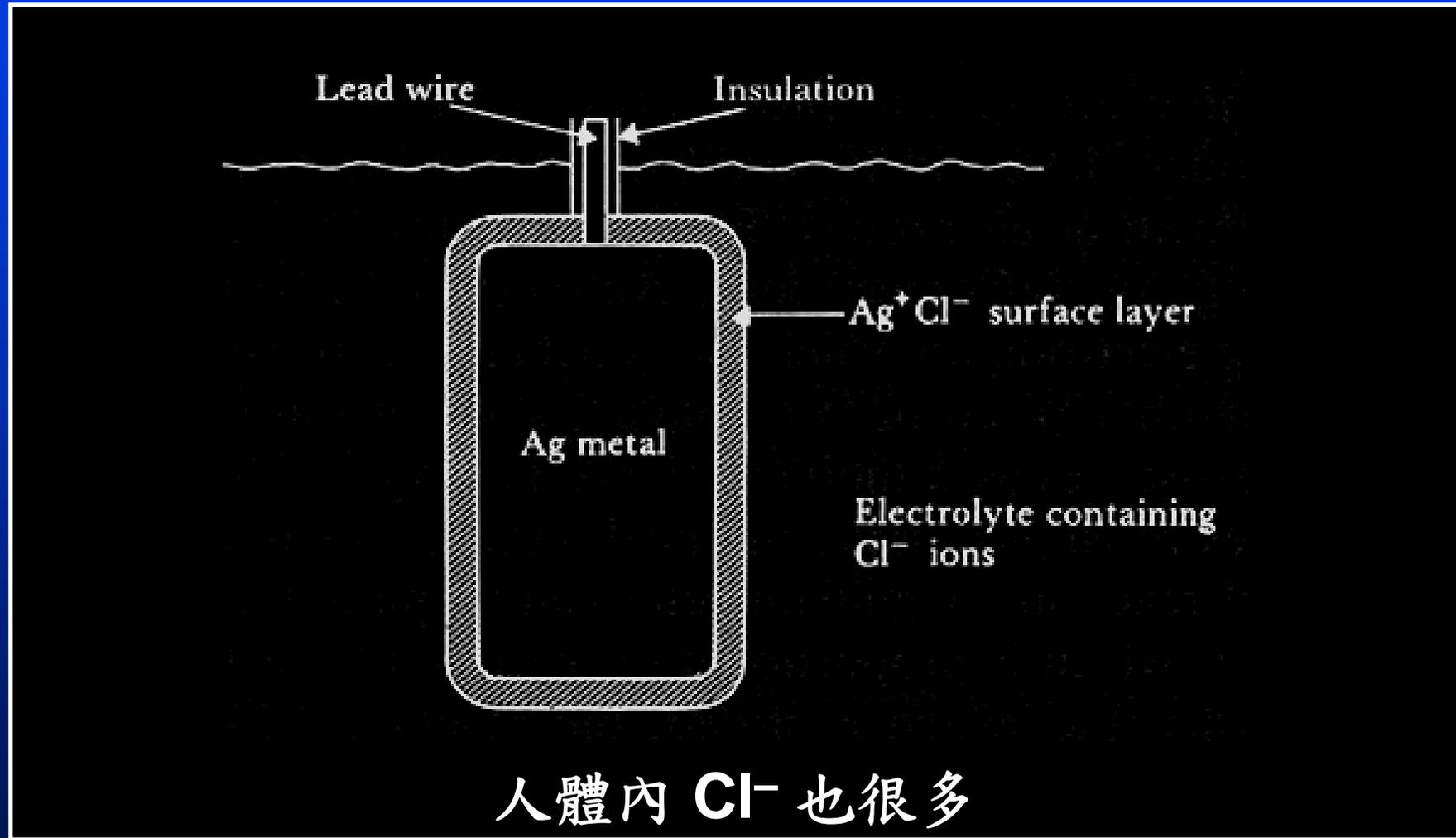
離子與電子流的轉換

- 如果沒有適當轉換 ...
- 離子無法流入導線，相當於放大器的電流極小 (電阻極大)
- 如何提供轉換？ 氧化還原反應

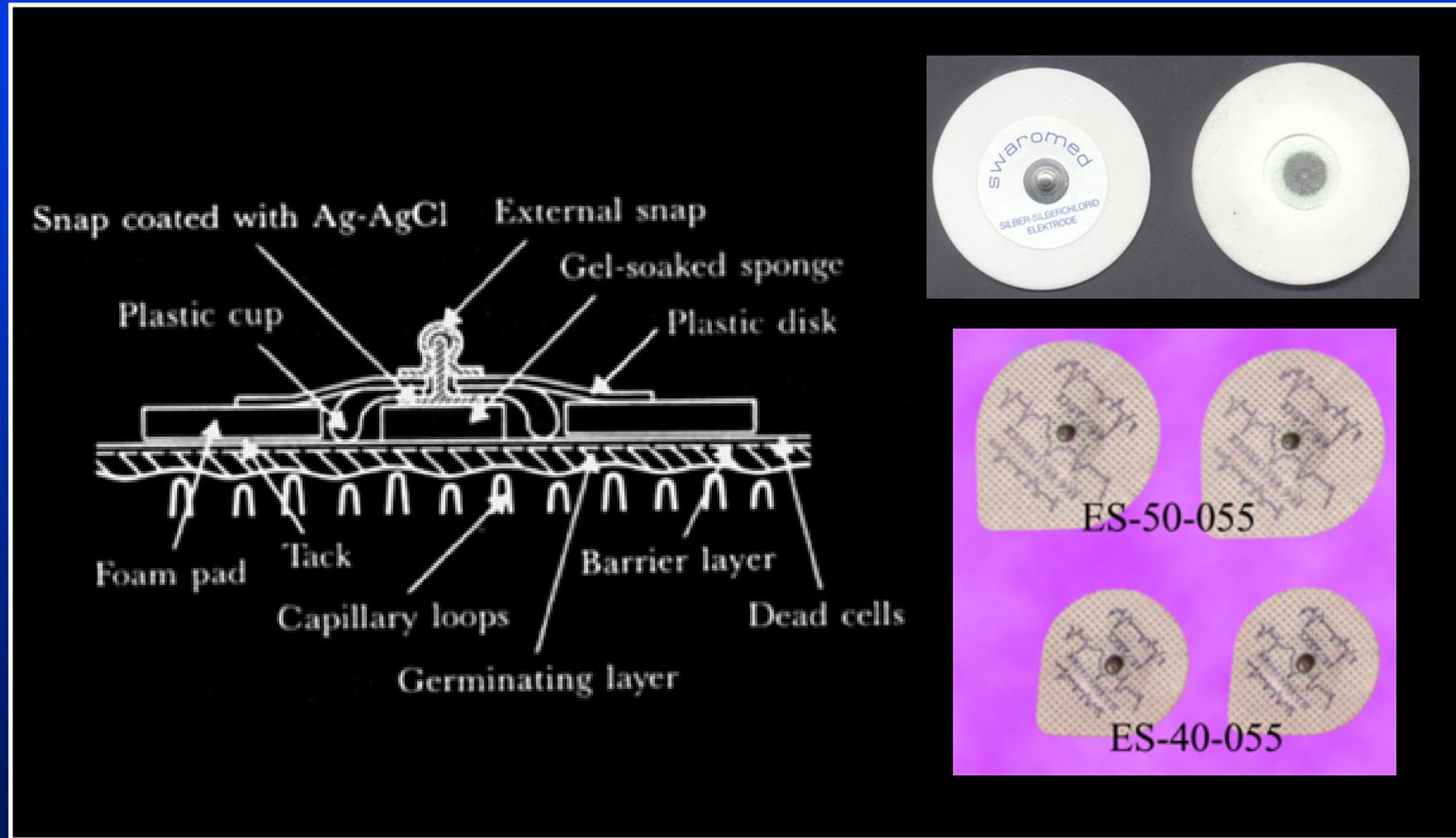
Ion-Electron Interface : 電極



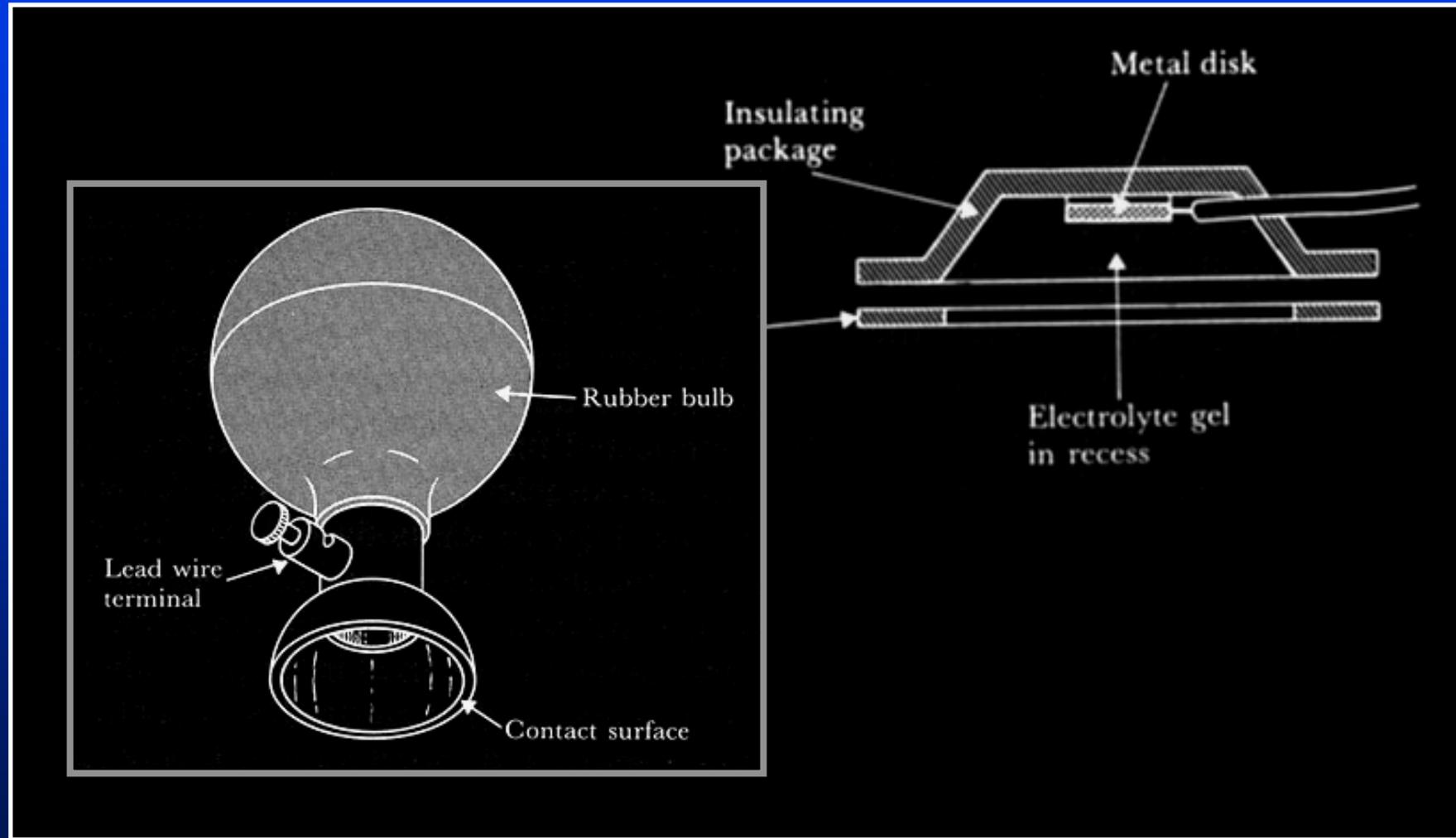
Ag/AgCl Electrode 示意圖



不同種類的電極



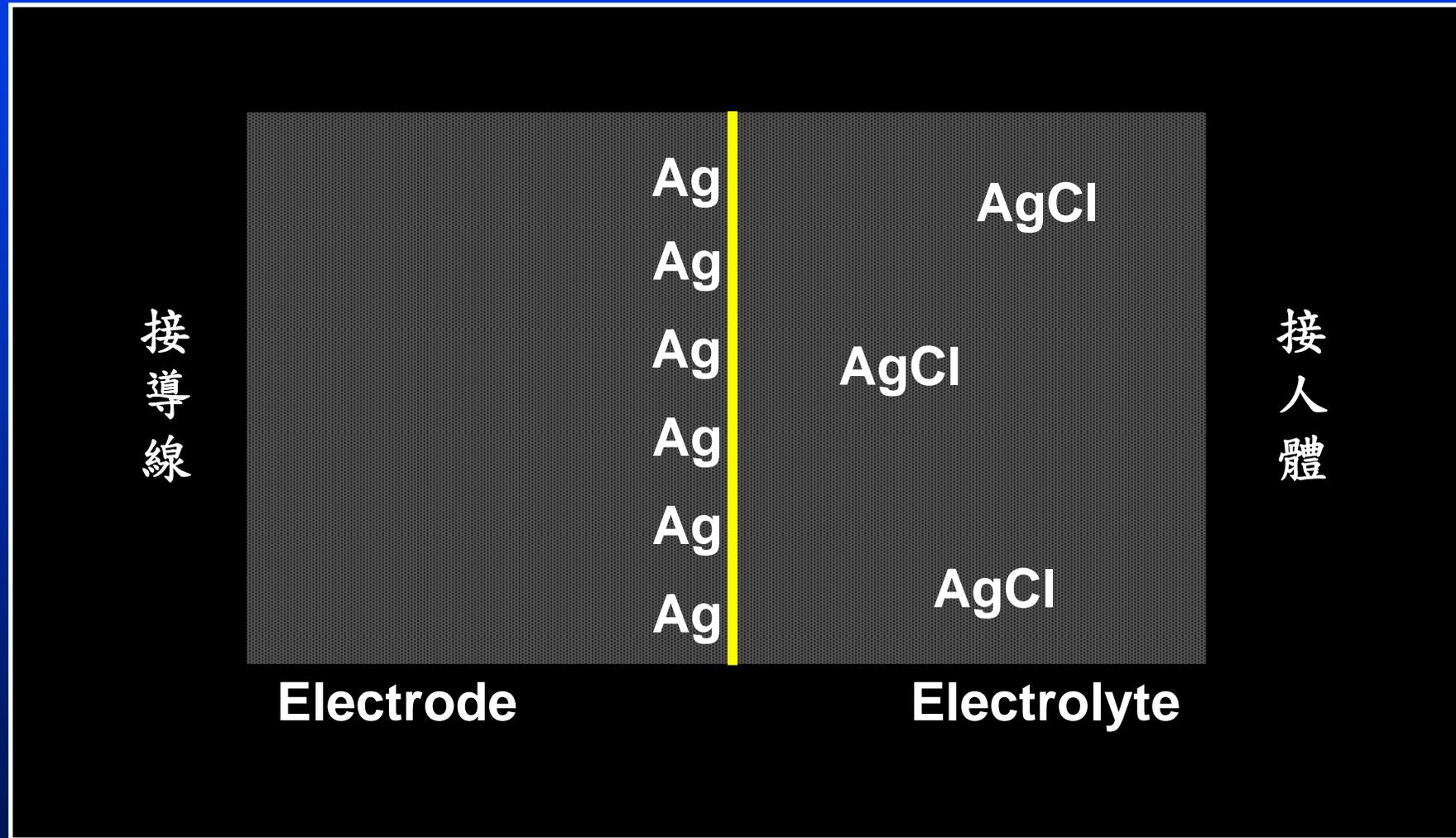
不同種類的電極



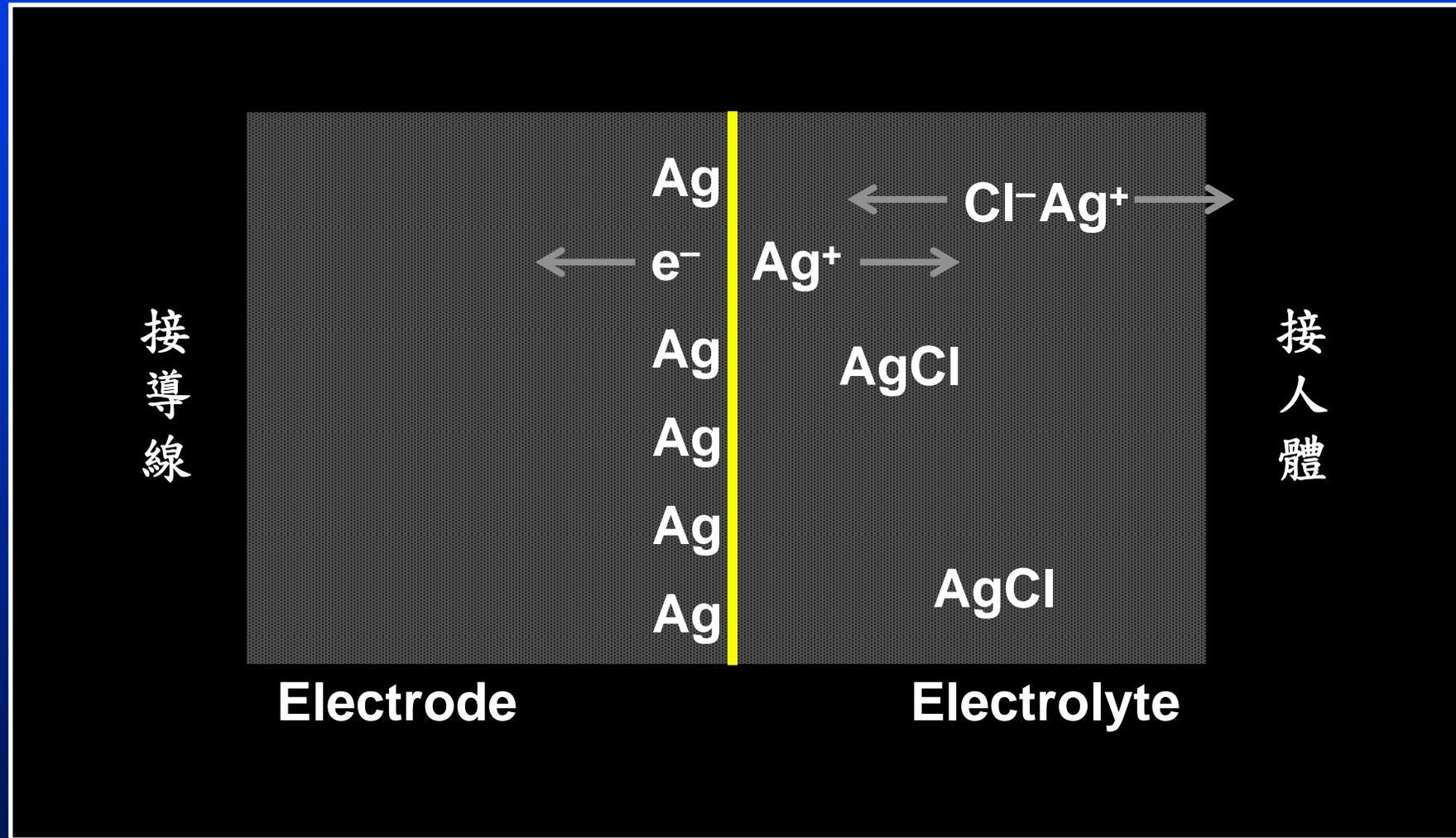
進一步改進導電性

- **Electrode-electrolyte interface**
加上導電膠 (溶液)，增加導電性
- 但是電極也引發別的問題
 - **Half-cell potential**

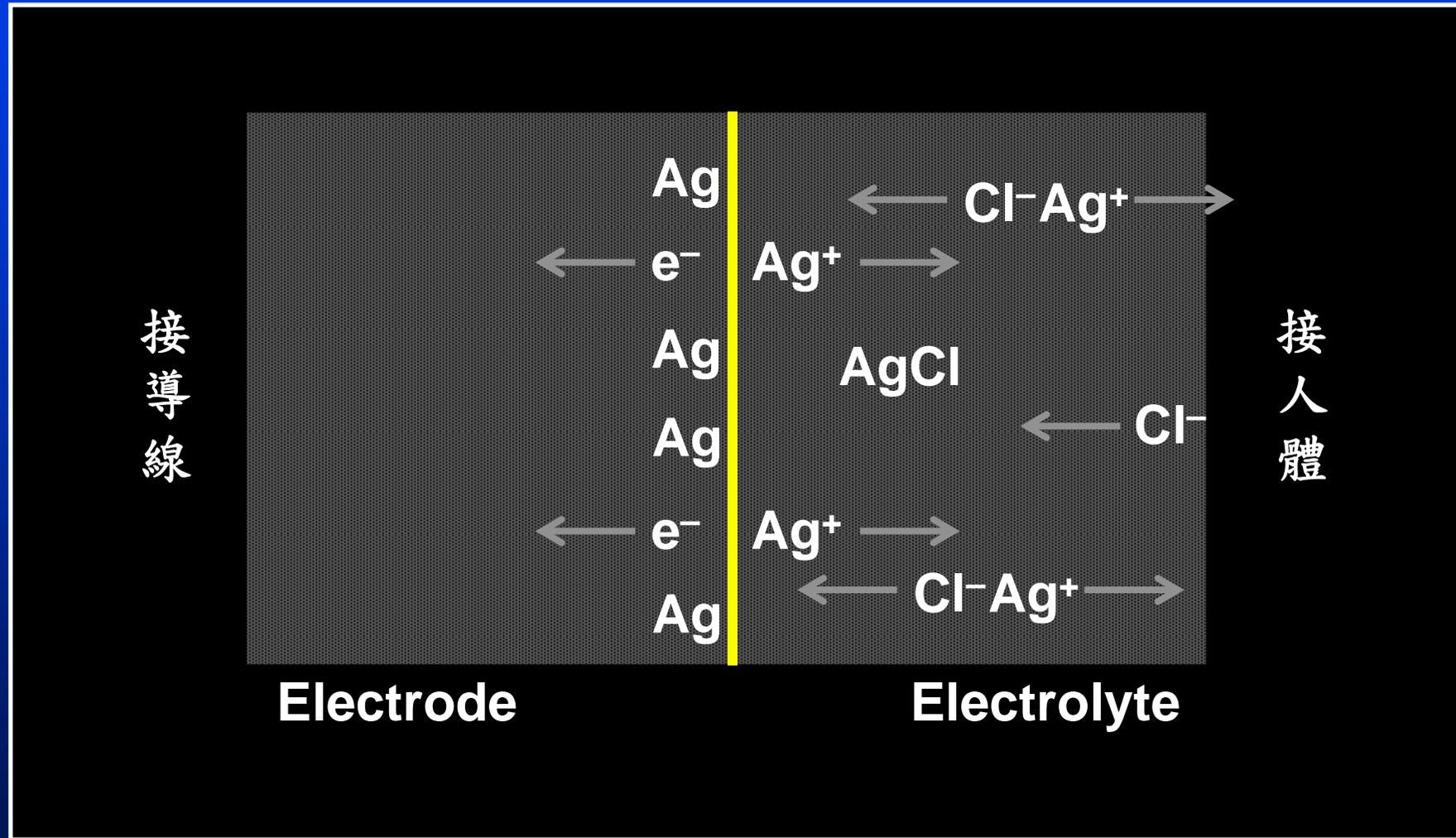
剛開始 ...



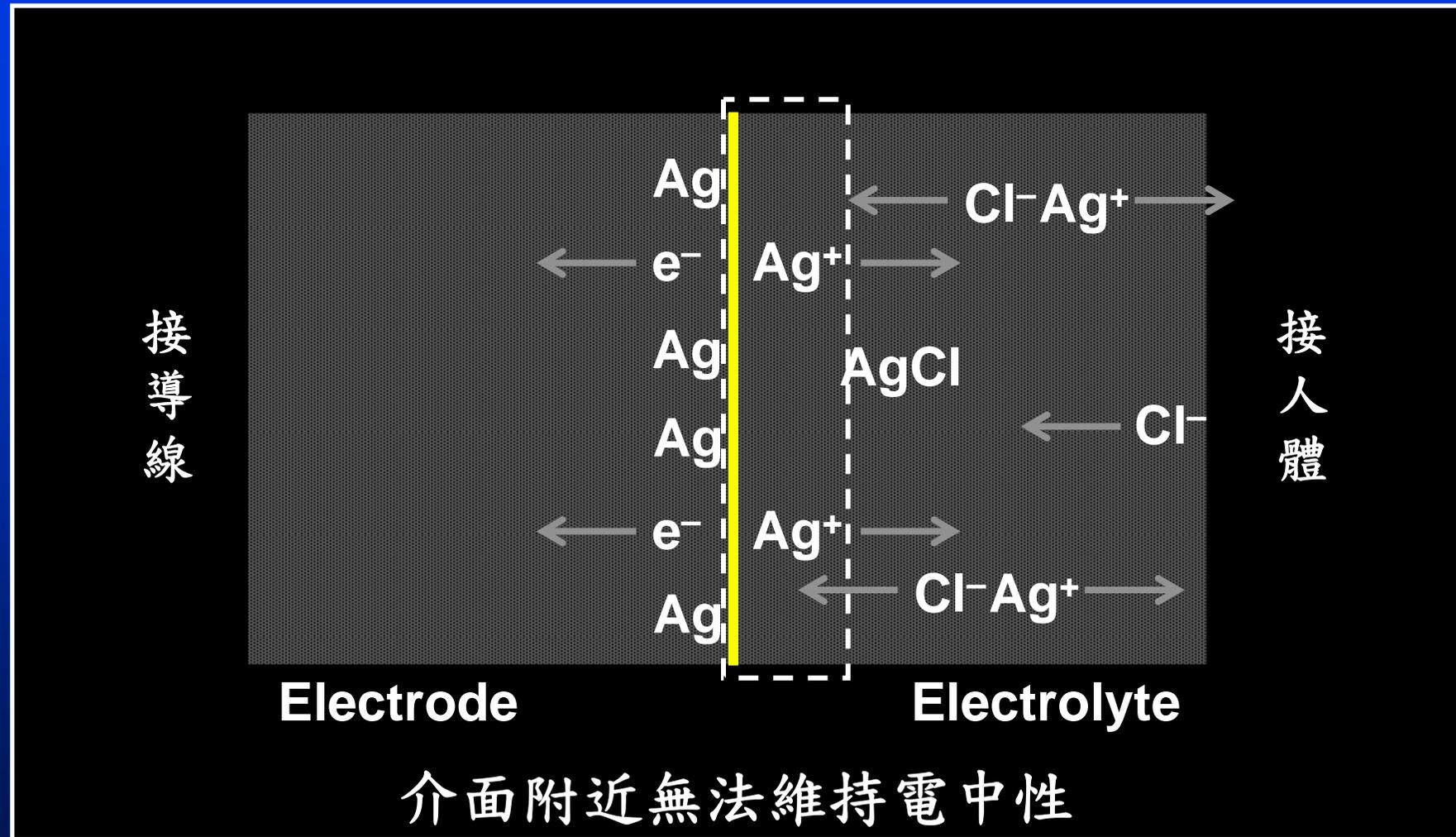
銀原子開始氧化 ...



銀原子繼續氧化 ...



Half-Cell Potential 的成因



Half-Cell Potential

- 顯然與金屬、離子濃度、溫度有關
 - 不外是化學反應平衡
 - 固定直流電壓
- 以高通濾波器電路濾除

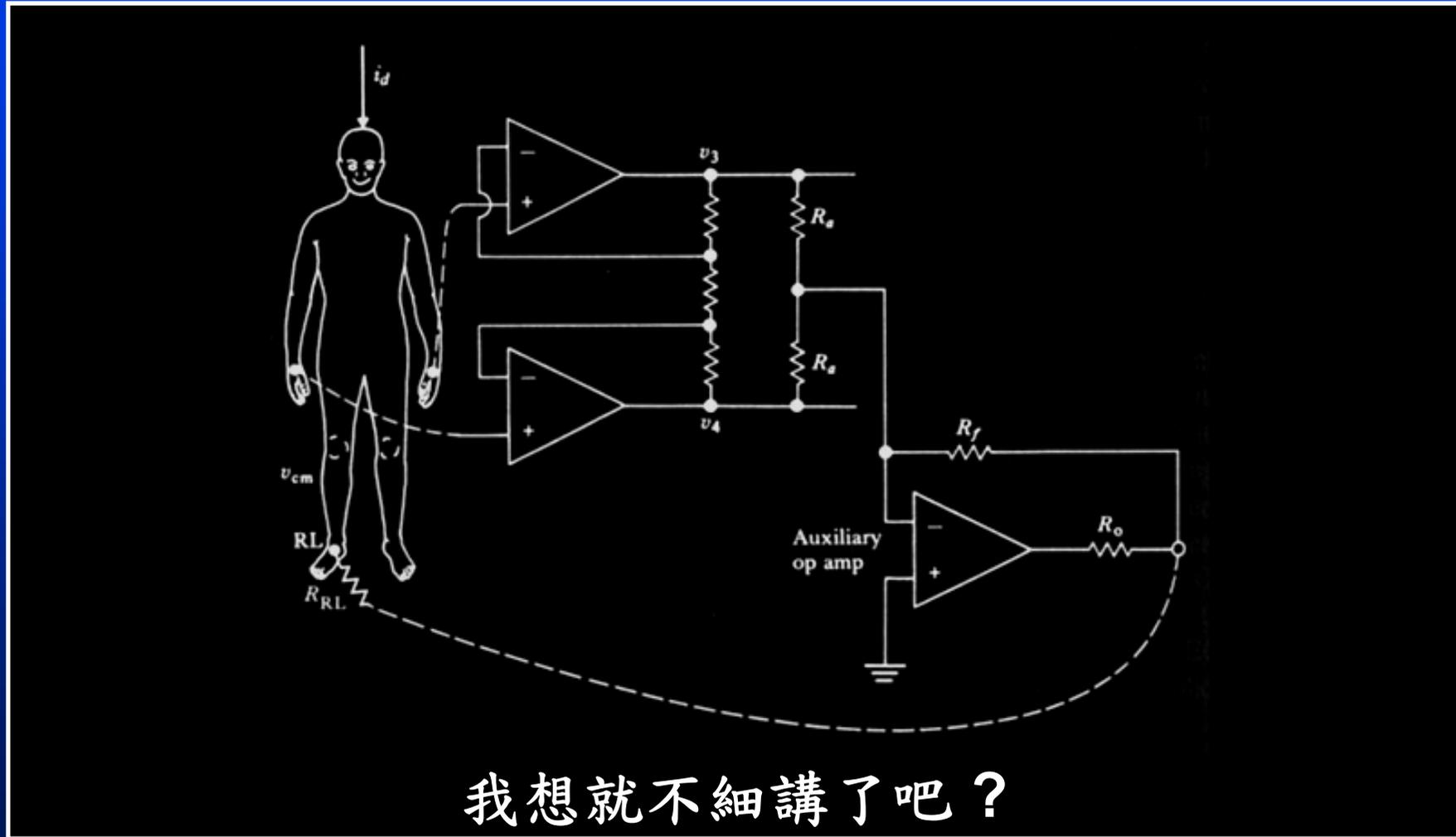
常用電極的 Half-Cell Potential

Metal & reaction	Potential (volts)
$\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3\text{e}^{-}$	-1.706
$\text{Cr} \rightarrow \text{Cr}^{3+} + 3\text{e}^{-}$	-0.744
$\text{Ni} \rightarrow \text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^{-}$	-0.230
$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^{+} + 2\text{e}^{-}$	0.000 (definition)
$\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^{-}$	0.340
$\text{Ag} \rightarrow \text{Ag}^{+} + \text{e}^{-}$	0.799
$\text{Au} \rightarrow \text{Au}^{3+} + 3\text{e}^{-}$	1.420

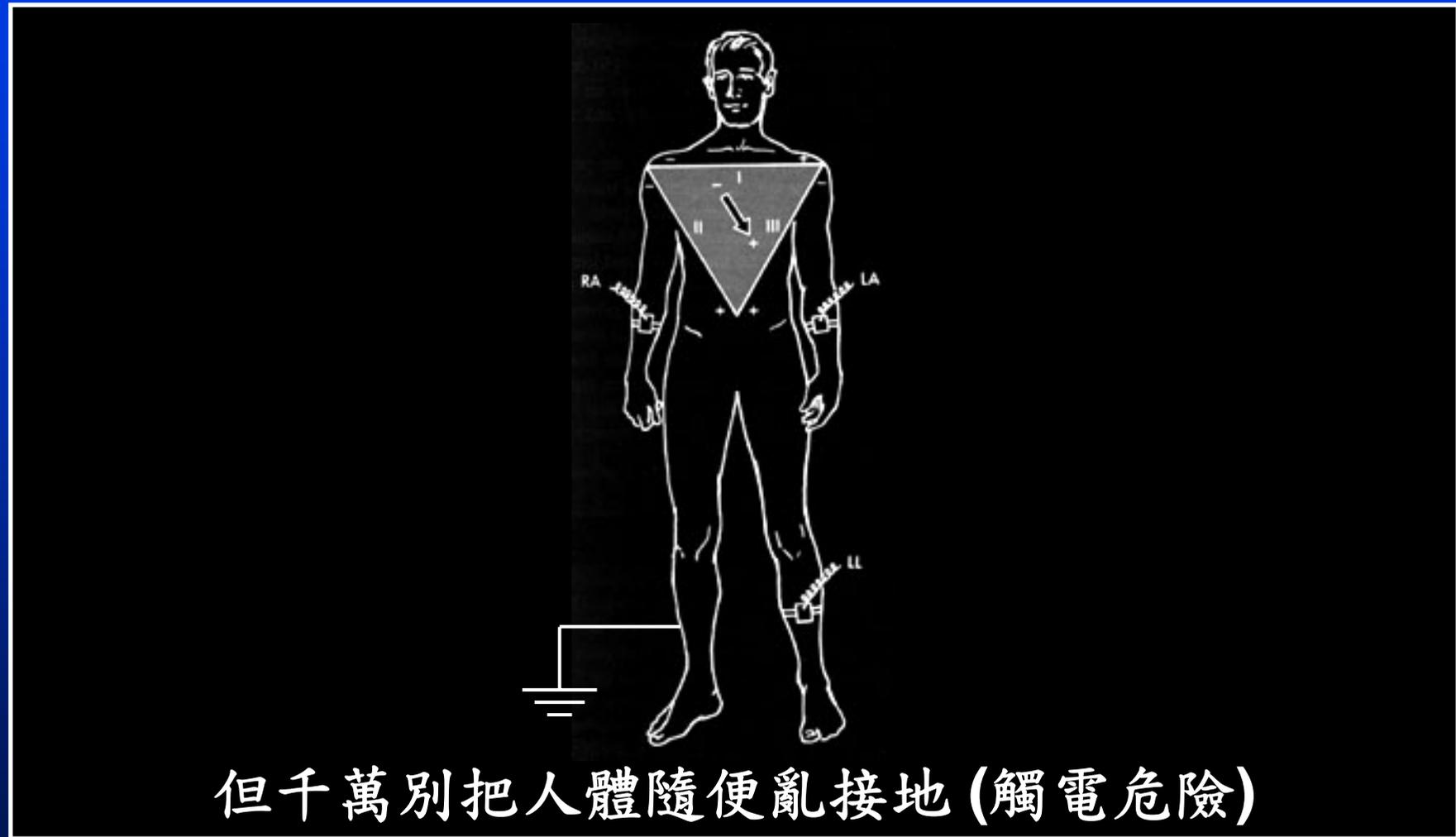
對不起，ECG 還沒結束

- 兩點量測 ECG，60 Hz 依然相當強
- 三點量測 ECG：右腳等效接地
 - Driven right leg
 - Common-mode feedback

Driven Right Leg Circuit

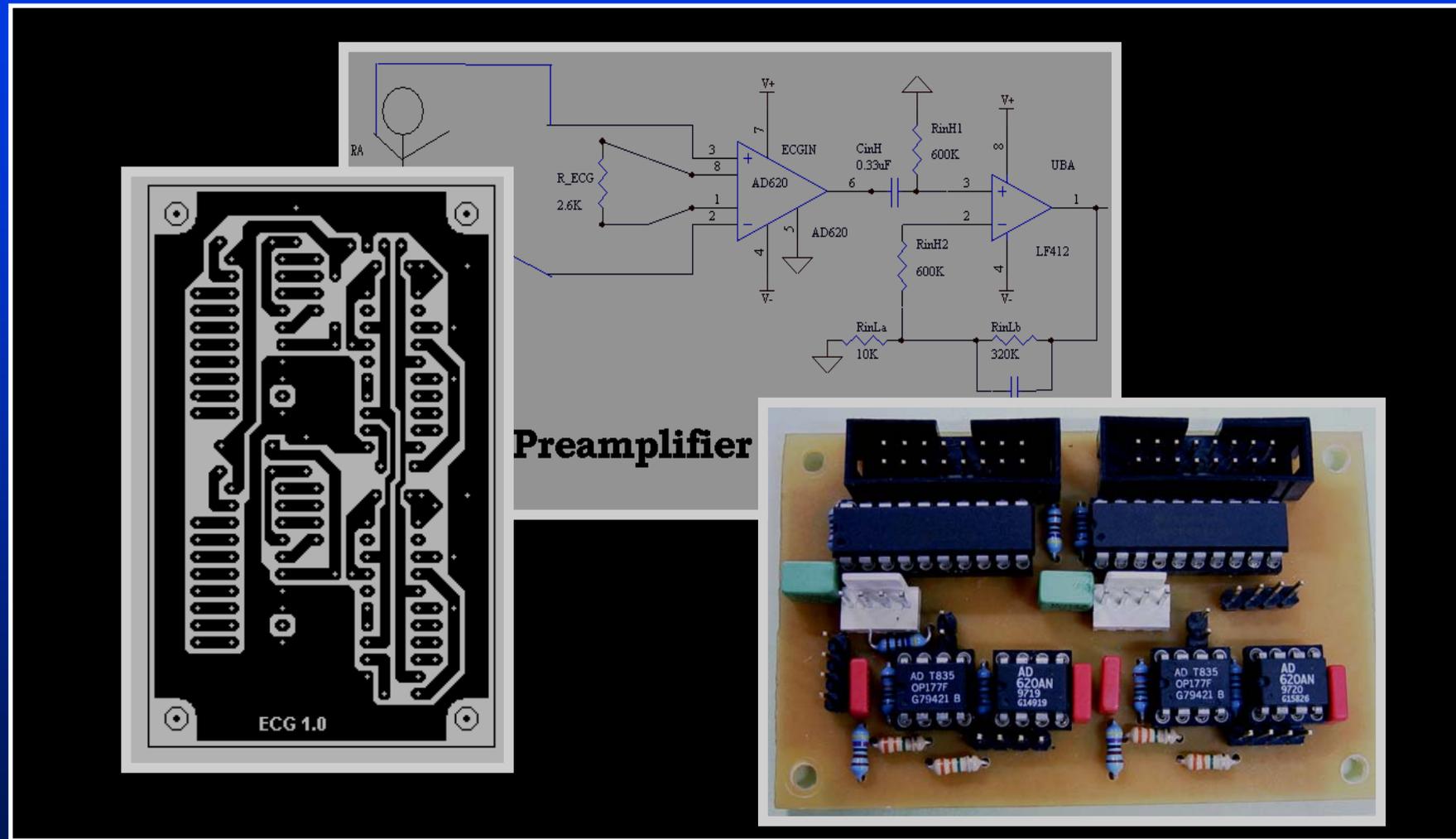


生理學課本都直接畫接地

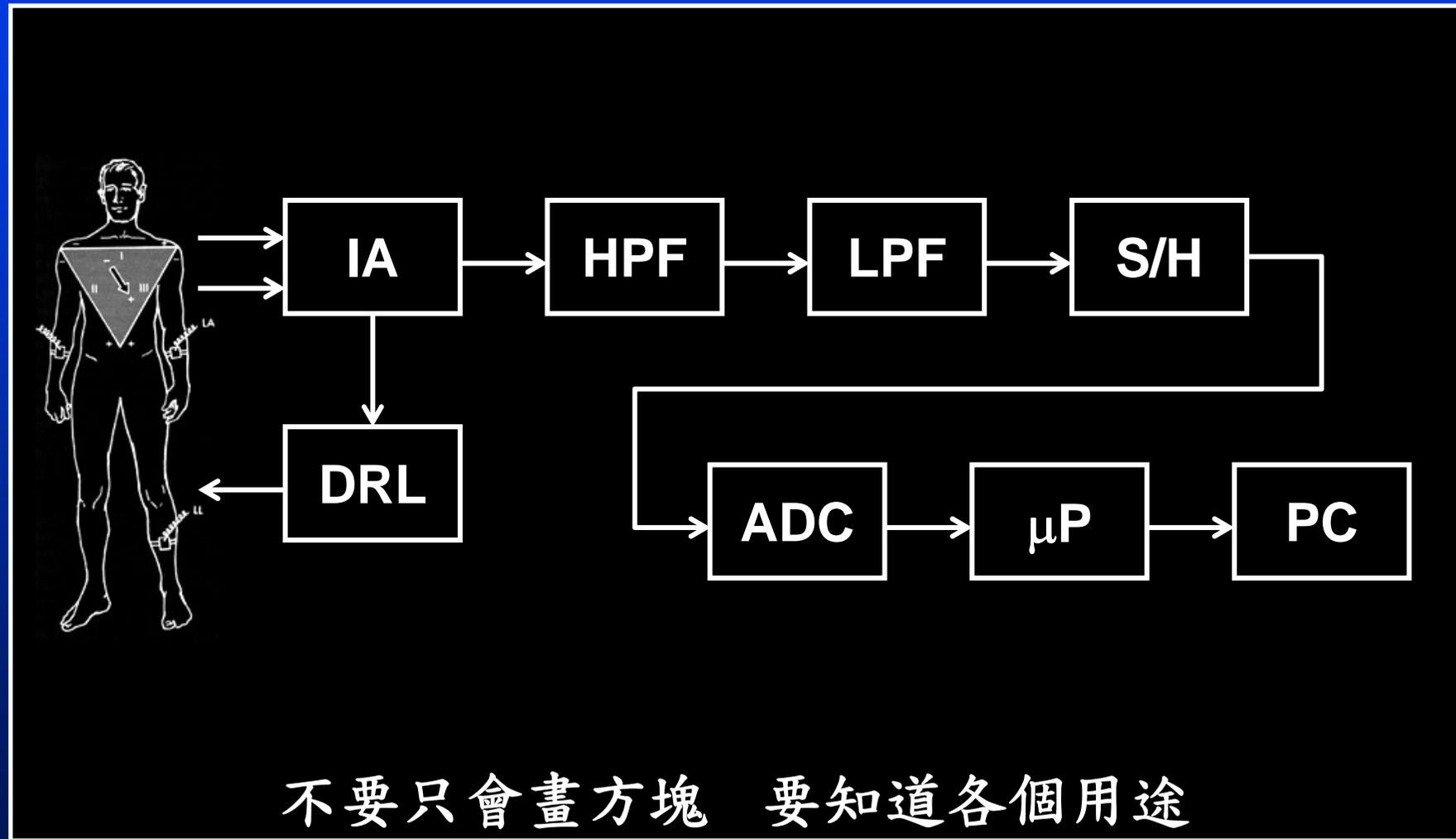


但千萬別把人體隨便亂接地 (觸電危險)

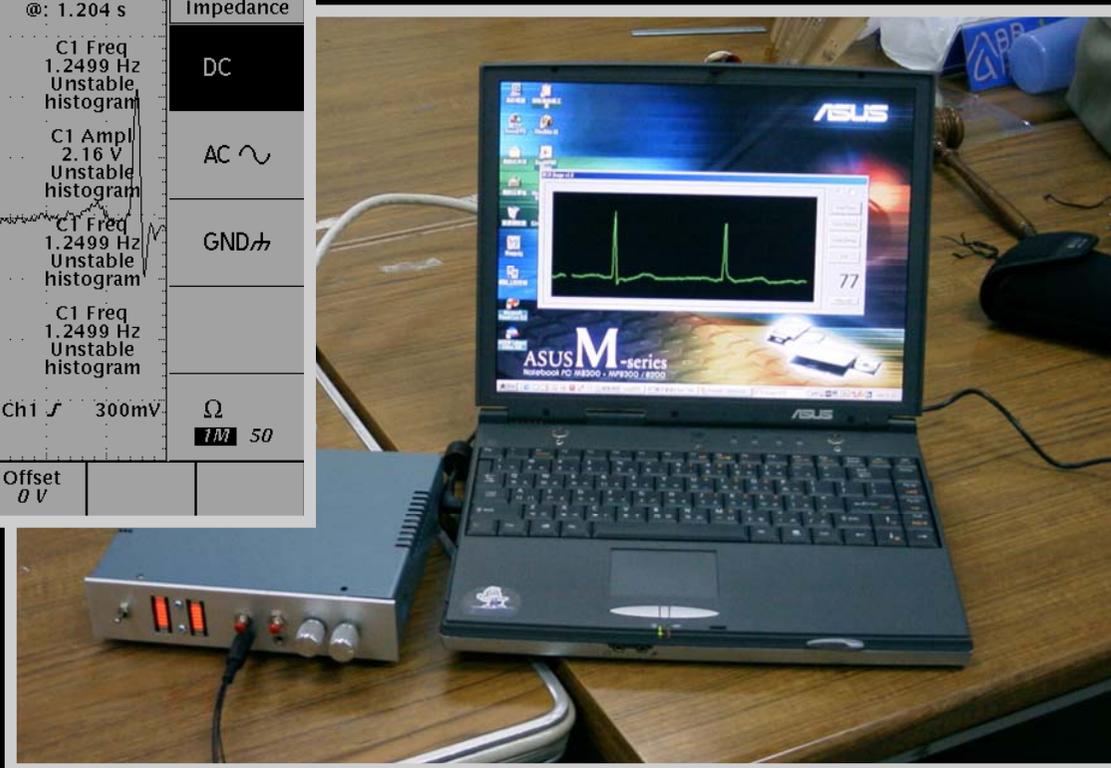
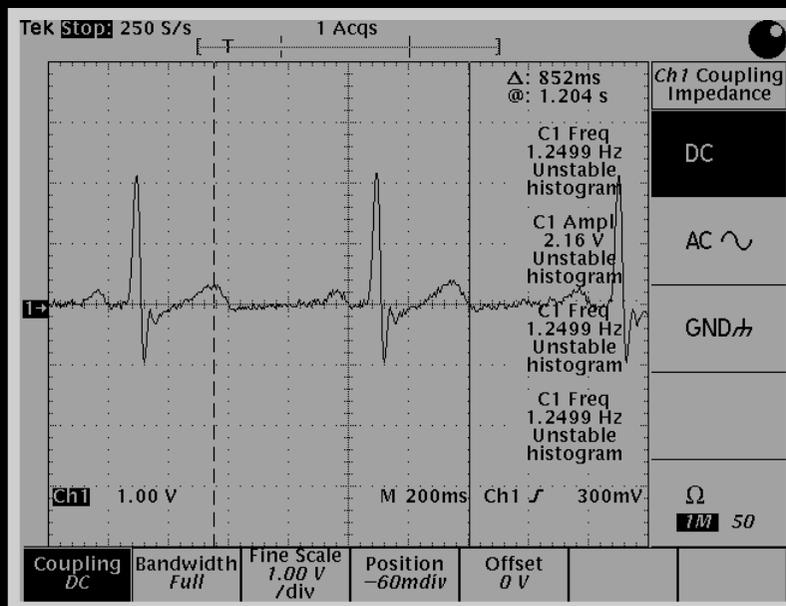
終於，ECG 電路初步完成 ...



再多加一些 ...



用這種電路可以量到的 ECG 信號



大學部三年級專題研究成果

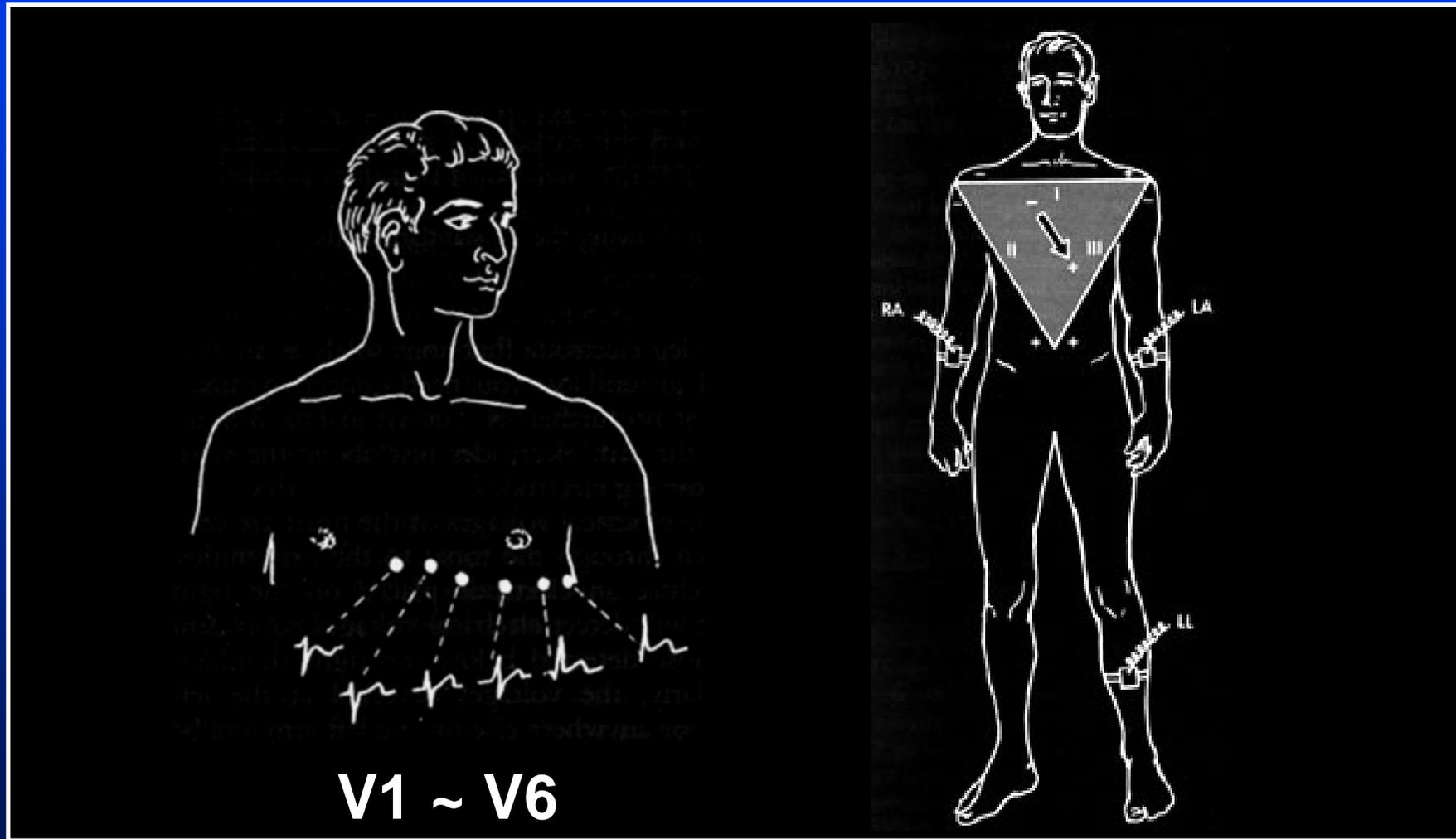
臨床儀器還有更多

- Isolation amplifier
- Lead-fail detection
- Baseline restoration
- Auto-calibration ...

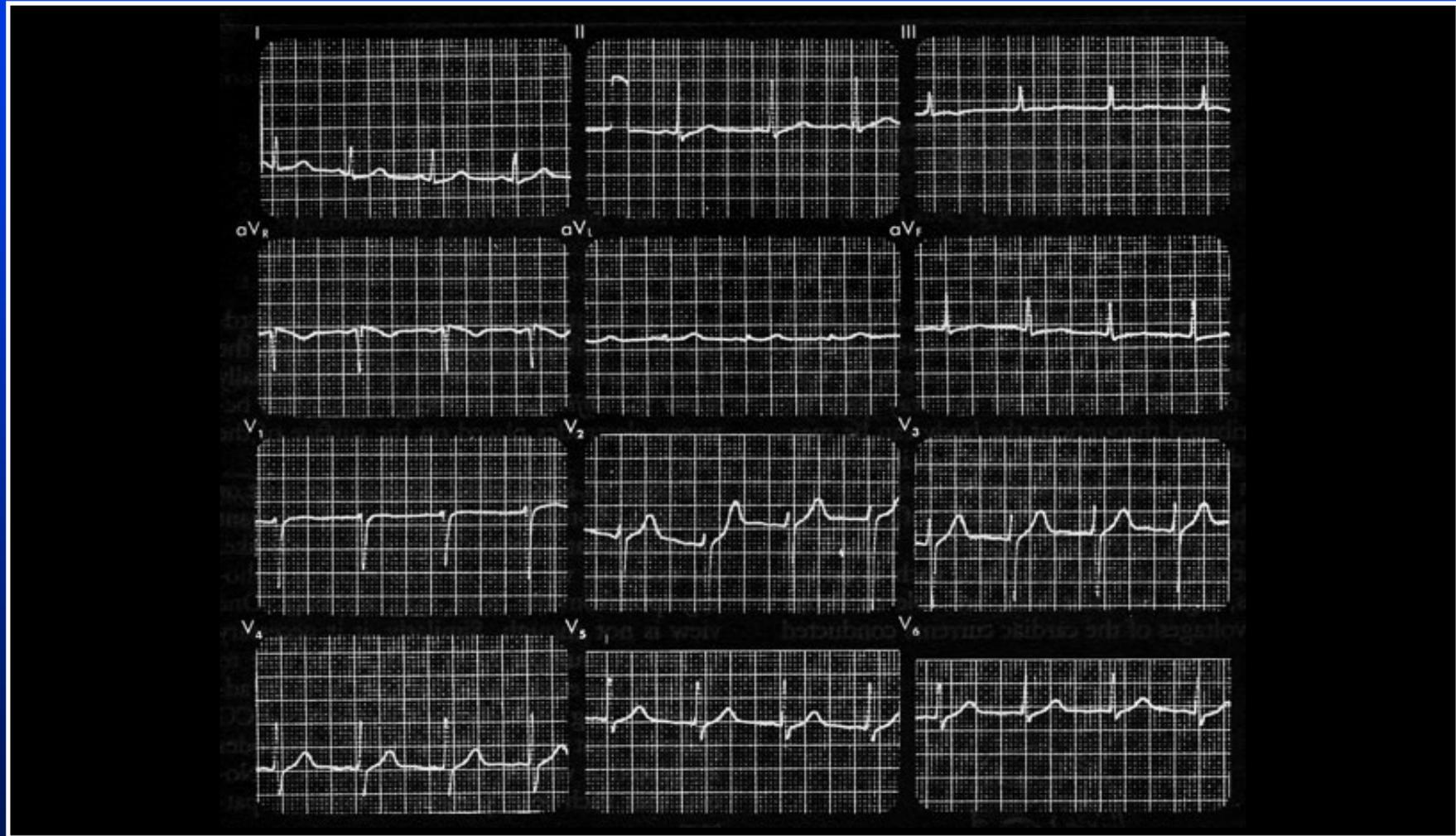
這樣只完成單通道 ECG

- **Multi-channel ECG**
- **6 標準胸導 (chest leads)**
- **3+3 標準肢導 (limb leads)**
 - **Einthoven's triangle**

Chest leads & Einthoven's Triangle



標準 12 通道心電圖 (不再詳談)



ECG 完成後呢？

- Electromyography 肌電圖
- Electroencephalography 腦電圖
- EOG、EGG、...
- 量測原理類似，難度稍有不同

More on Circuits ...

- 下週李百祺教授待續

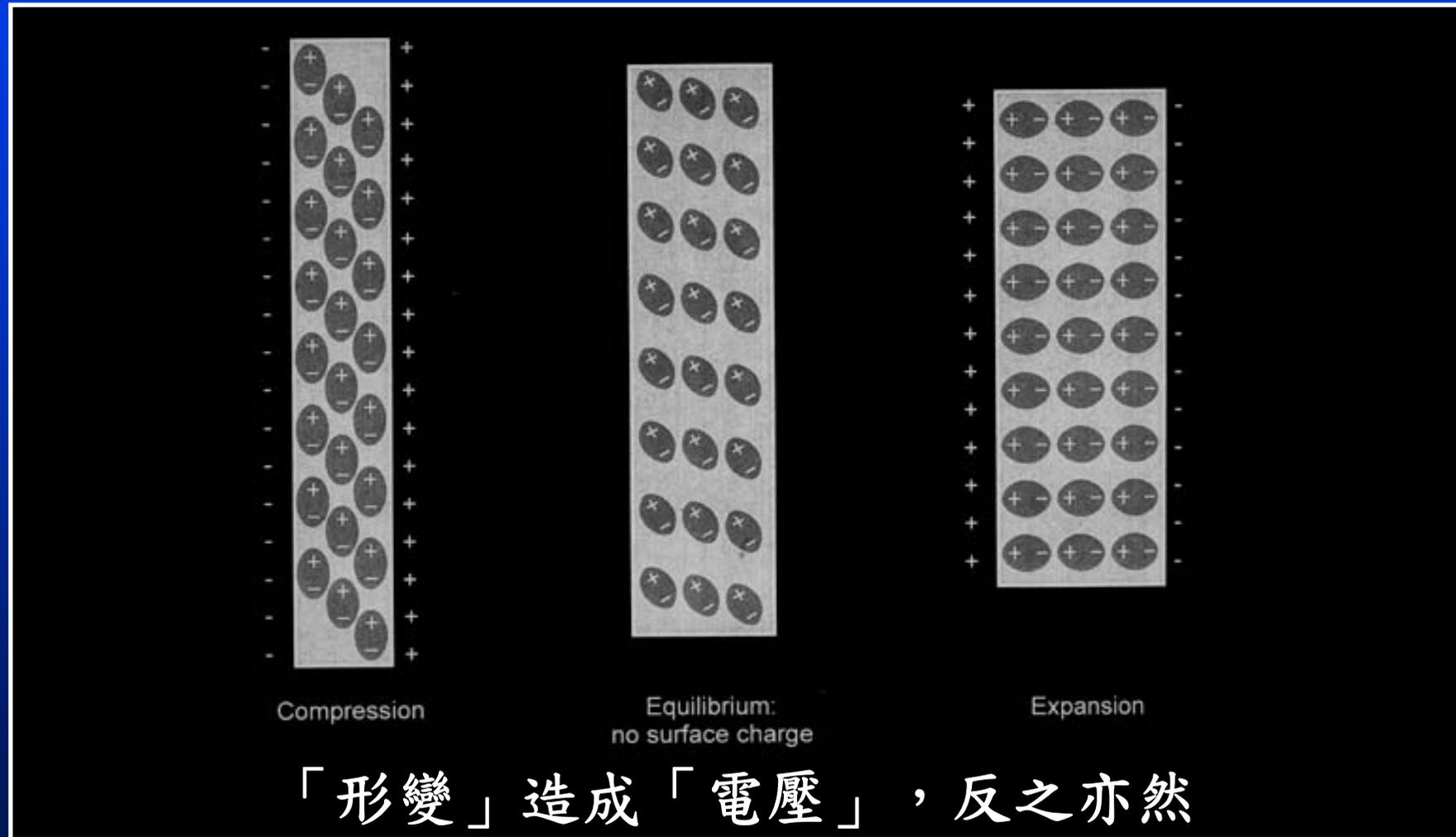
非電性生理信號量測？

- **Sensors (感測器) 與 transducers (換能器) 的使用**
- **各種物理量轉為電壓或電流信號**
- **Bridge circuit 的配合**

例一：位移或振動

- Piezoelectric crystal
- 壓電晶體 (超音波曾經上過)
- 機械形變 \leftrightarrow 電壓差
- 電壓信號直接接儀表放大器

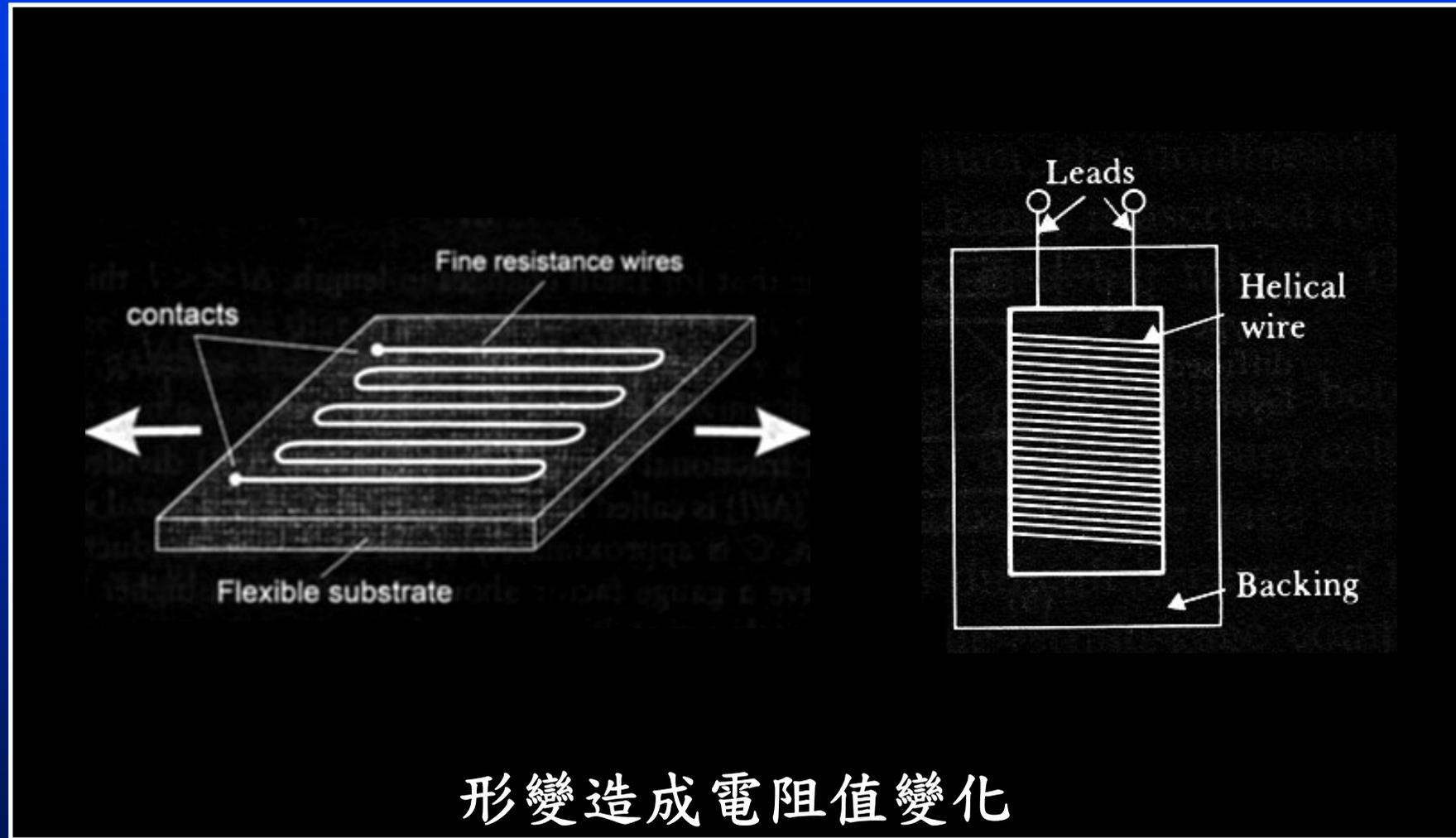
壓電效應材料示意圖



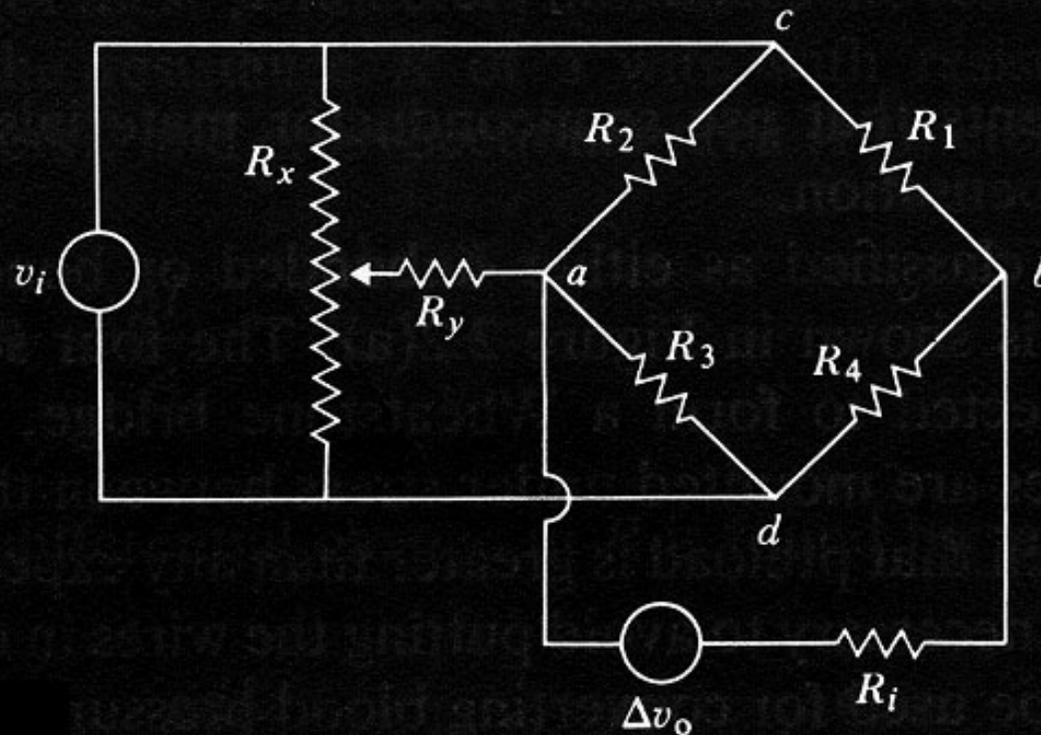
例二：位移

- **Strain gage sensors**
- 導線拉長：長度增加、面積減小
 - 電阻提高
- 提升敏感度：多繞幾圈

Strain Gage Sensors



Bridge Circuit (Wheatstone 電橋)



將電阻值變化轉為電壓變化

More on Sensors ...

- 下週李百祺教授待續

回到心電圖 ...

- 如何量測心臟的電性？
- 為什麼人體本身具有電性？
- 心電圖反映出什麼疾病？

基礎電生理學

Electrophysiology

鍾孝文 教授

台大電機系 三軍總醫院放射線部

到這裡才進入課本 Ch.3

- 很不幸地也不會教太多
- 3.1~3.2 簡介歷史發展
- 3.3 神經細胞結構
- 3.5~3.6 電生理模型

剛才提到人體電性 ...

- 生理電信號來源：離子，為什麼？
- 神經細胞：半通透性膜、浸泡在富含電解質的水溶液中
- 光是這樣，細胞內外便產生電位差

先看一種離子 K^+ 就夠了 (數學表示法)

$$J_K(\text{diffusion}) = -D \frac{d[K^+]}{dx} \quad J_K(\text{drift}) = -\mu Z[K^+] \frac{dv}{dx}$$

$$J_K(\text{diffusion}) + J_K(\text{drift}) = 0 \quad D = \frac{kT\mu}{q}$$

$$-\frac{kT}{q} \mu \frac{d[K^+]}{dx} - \mu Z[K^+] \frac{dv}{dx} = 0 \quad \Rightarrow \quad dv = -\frac{kT}{q} \frac{d[K^+]}{[K^+]}$$

$$E_K = v_i - v_o = \frac{kT}{q} \ln \frac{[K^+]_o}{[K^+]_i}$$

這是什麼意思？

- 細胞外離子濃度若偏高，趨勢必然是離子由細胞外往內流 (擴散)
- 如果平衡時仍然是細胞外離子濃度高，那一定是因為電位推回來的

這個電位差 ...

- 稱為 **Nernst potential**
- 各種離子在細胞內外的濃度不同，因此 **Nernst potential** 也各異
- 但細胞內外的電位差只有一個啊？

幾個 Typical Nernst Potential

Ion	Cytoplasm (mM)	Extracellular fluid (mM)	Nerst potential (mV)
K ⁺	400	20	- 74
Na ⁺	50	440	+ 55
Cl ⁻	52	560	- 60

都是在 squid giant axon 的情形

現在看兩種離子的情形

$$E_K = \frac{kT}{q} \ln \frac{[K^+]_o}{[K^+]_i} = E_{Cl} = \frac{kT}{q} \ln \frac{[Cl^-]_i}{[Cl^-]_o}$$

$$\frac{[K^+]_o}{[K^+]_i} = \frac{[Cl^-]_i}{[Cl^-]_o}$$

嗯！這次很容易 ...

欲求離子濃度，可再加上空間電中性條件

這種離子濃度平衡式 ...

- 稱為 **Donnan equilibrium**
- 給定特定情形下，得以求出平衡時的細胞內外離子濃度
- 例：課本 **Example 3.1**

課本 Example 3.1

Outside cell :
[KCl] = 400 mM

Inside cell :
[KCl] = 100 mM
[RCl] = 500 mM

$$\begin{array}{lll} [K^+]_i + [K^+]_o = 500 & [K^+]_i + 500 = [Cl^-]_i & \frac{[K^+]_o}{[K^+]_i} = \frac{[Cl^-]_i}{[Cl^-]_o} \\ [Cl^-]_i + [Cl^-]_o = 1000 & [K^+]_o = [Cl^-]_o & \end{array}$$

$$[K^+]_i = 167 \quad [K^+]_o = 333 \quad [Cl^-]_i = 667 \quad [Cl^-]_o = 333 \quad E_K = 18 \text{ mV}$$

From initial condition to steady state

再把細胞膜對離子的通透性加入

$$E_K = \frac{kT}{q} \ln \frac{[K^+]_o}{[K^+]_i} = E_{Cl} = \frac{kT}{q} \ln \frac{[Cl^-]_i}{[Cl^-]_o}$$

$$V_m = \frac{kT}{q} \ln \frac{P_K [K^+]_o}{P_K [K^+]_i}$$

$$V_m = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{P_K [K^+]_o + P_{Cl} [Cl^-]_i}{P_K [K^+]_i + P_{Cl} [Cl^-]_o} \right)$$

$$V_m = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{P_K [K^+]_o + P_{Cl} [Cl^-]_i + P_{Na} [Na^+]_o}{P_K [K^+]_i + P_{Cl} [Cl^-]_o + P_{Na} [Na^+]_i} \right)$$

直接推廣到不只兩種離子

這個電位差 V_m ...

- 稱為 **resting potential**
- 公式稱為 **Goldman equation**
- 描述神經細胞未受刺激時所具有的電位 (稱為 **polarization**)

若細胞膜通透性改變

- 某一離子通透性遠大於其他離子時
- **Resting potential** 接近該離子的 **Nernst potential**
- 舉個例子吧 ...

先再看一次 Goldman equation

$$V_m = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{P_K [K^+]_o + P_{Cl} [Cl^-]_i + P_{Na} [Na^+]_o}{P_K [K^+]_i + P_{Cl} [Cl^-]_o + P_{Na} [Na^+]_i} \right)$$

Ion	Cytoplasm (mM)	Extracellular fluid (mM)	Nerst potential (mV)
K ⁺	400	20	- 74
Na ⁺	50	440	+ 55
Cl ⁻	52	560	- 60

電位差由通透性最高者主導

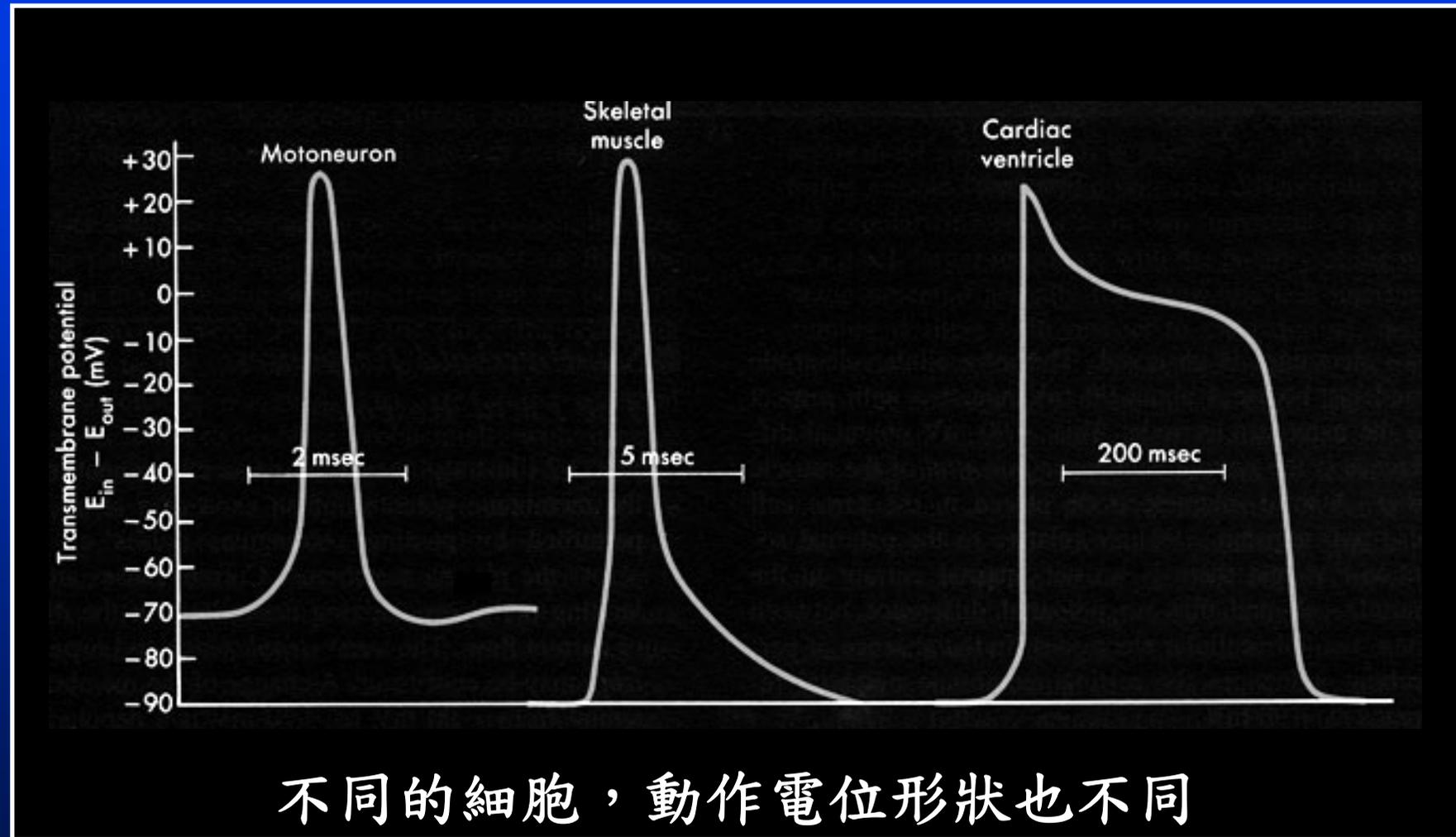
Goldman Equation

- Squid giant axon : -60 mV
 - 這是歷史淵源了 ... (0.5 mm)
- Nernst potential (Na^+) : $+55$ mV
- 想改變膜內電位 \rightarrow 改變 Na^+ 通透性

Action Potential 的產生

- 神經細胞受刺激，瞬間大幅改變細胞膜對 Na^+ 的通透性
- Na^+ 大量進入細胞內，提高其電位
- 稱為 de-polarization

Action Potential 示意圖



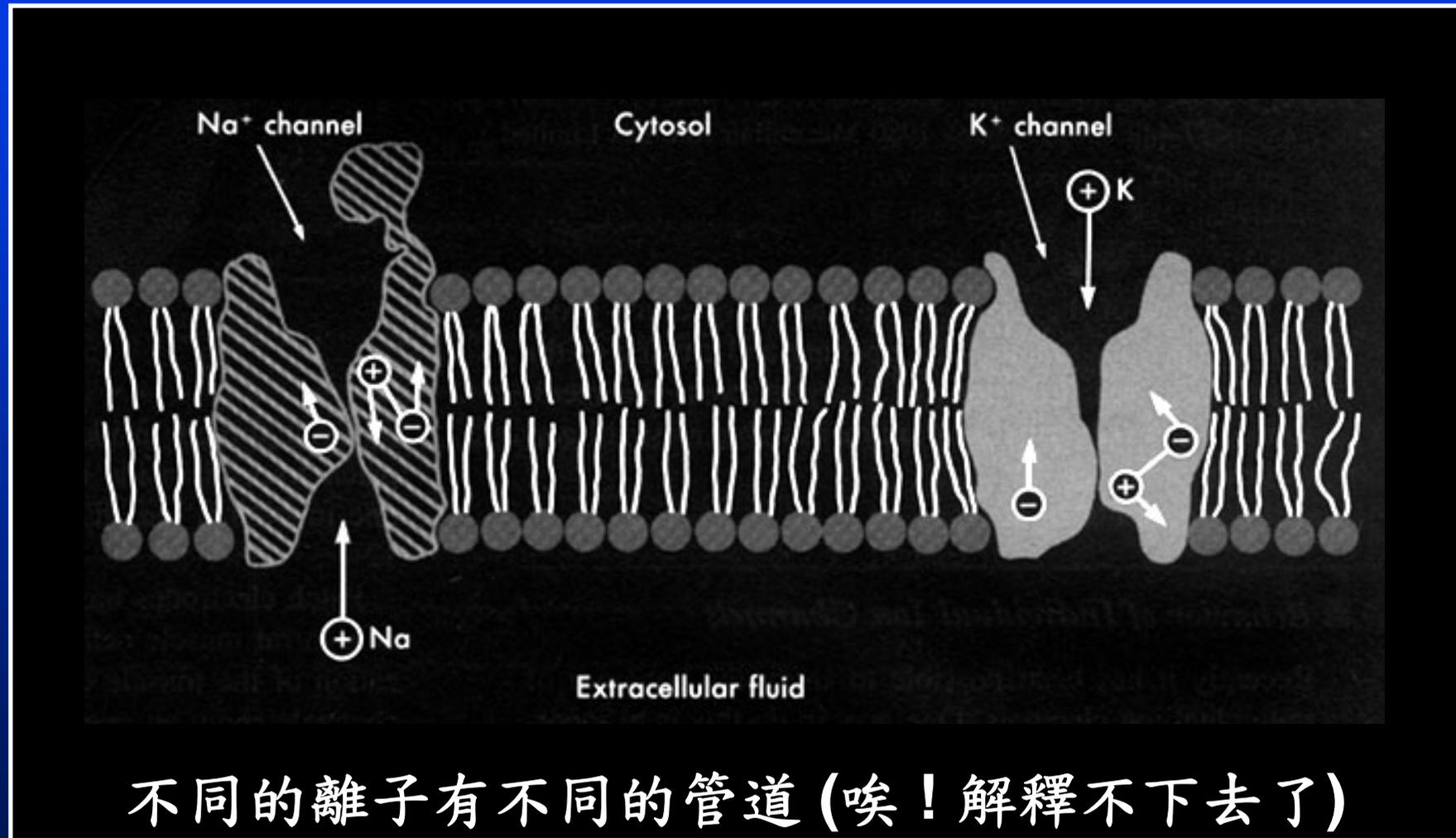
稍等 ...

- Action Potential 的產生
 - 神經細胞受刺激，瞬間大幅改變細胞膜對 Na^+ 的通透性
- 多探討一些吧！

首先 ...

- 選擇性只改變對 Na^+ 的通透性？
- 細胞膜的 ion channels (離子通道)
 - Passive ion channels
 - Active ion channels

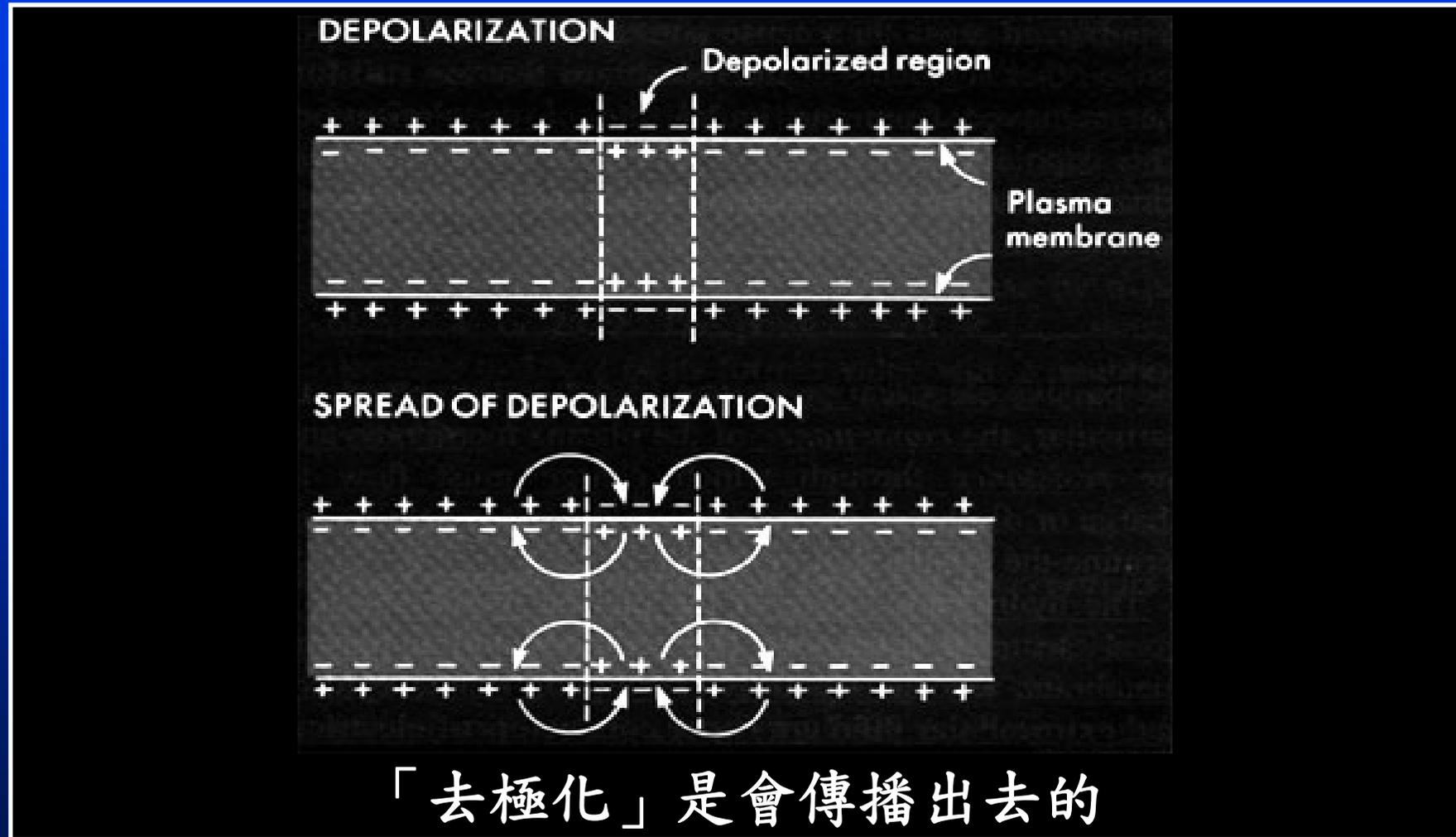
Ion Channel 示意圖



再來 ...

- 神經細胞受什麼樣的刺激，才會改變細胞膜的通透性？
 - 電刺激 (例如旁邊的細胞膜)
 - 化學反應 (神經鍵結處)

神經傳導示意圖

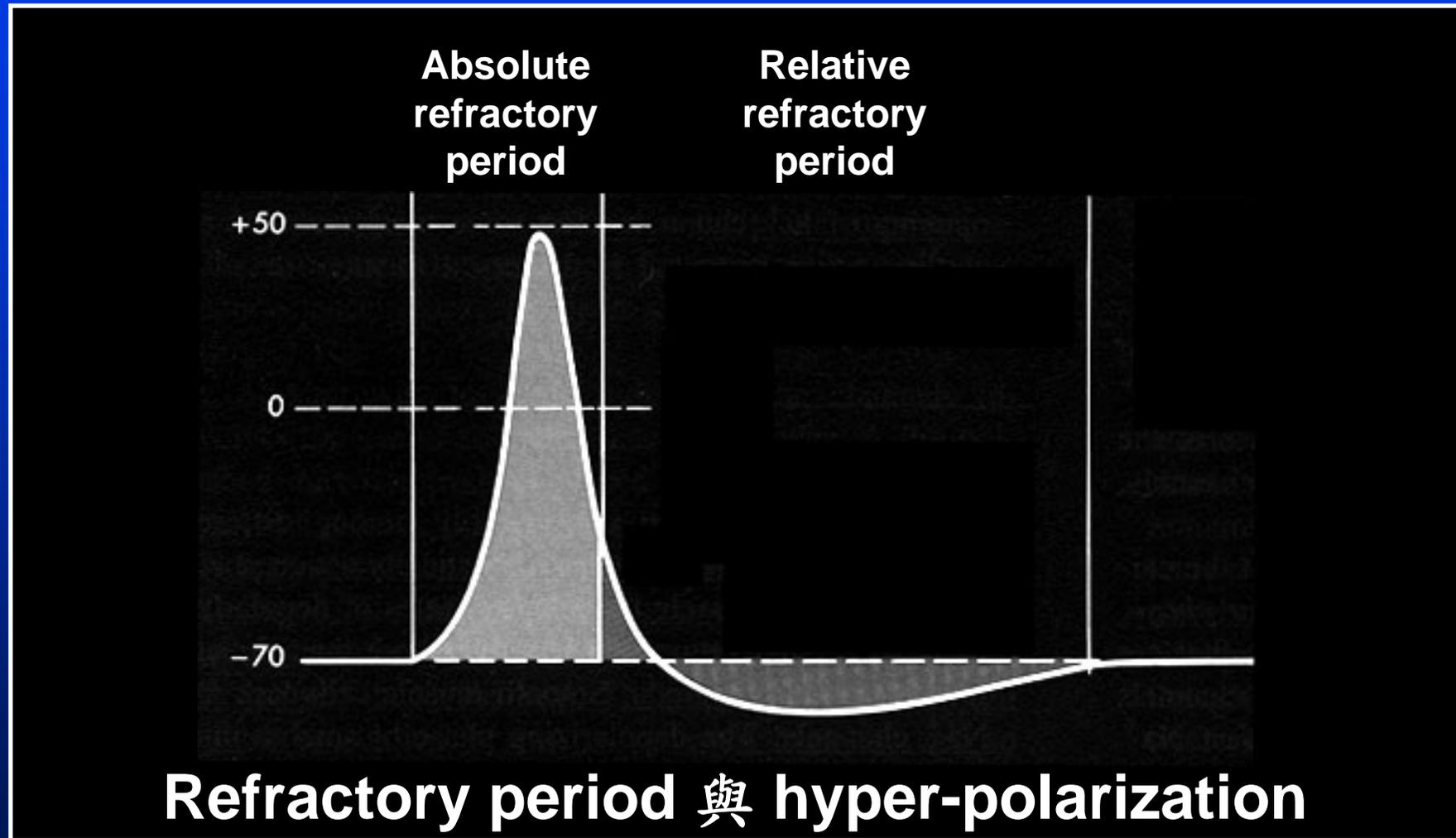


「去極化」是會傳播出去的

電位的回復

- 離子通道關閉，恢復 resting 電位
— 稱為 re-polarization
- 同時有一段 refractory period
- 實際上牽涉多種離子通道的開與關

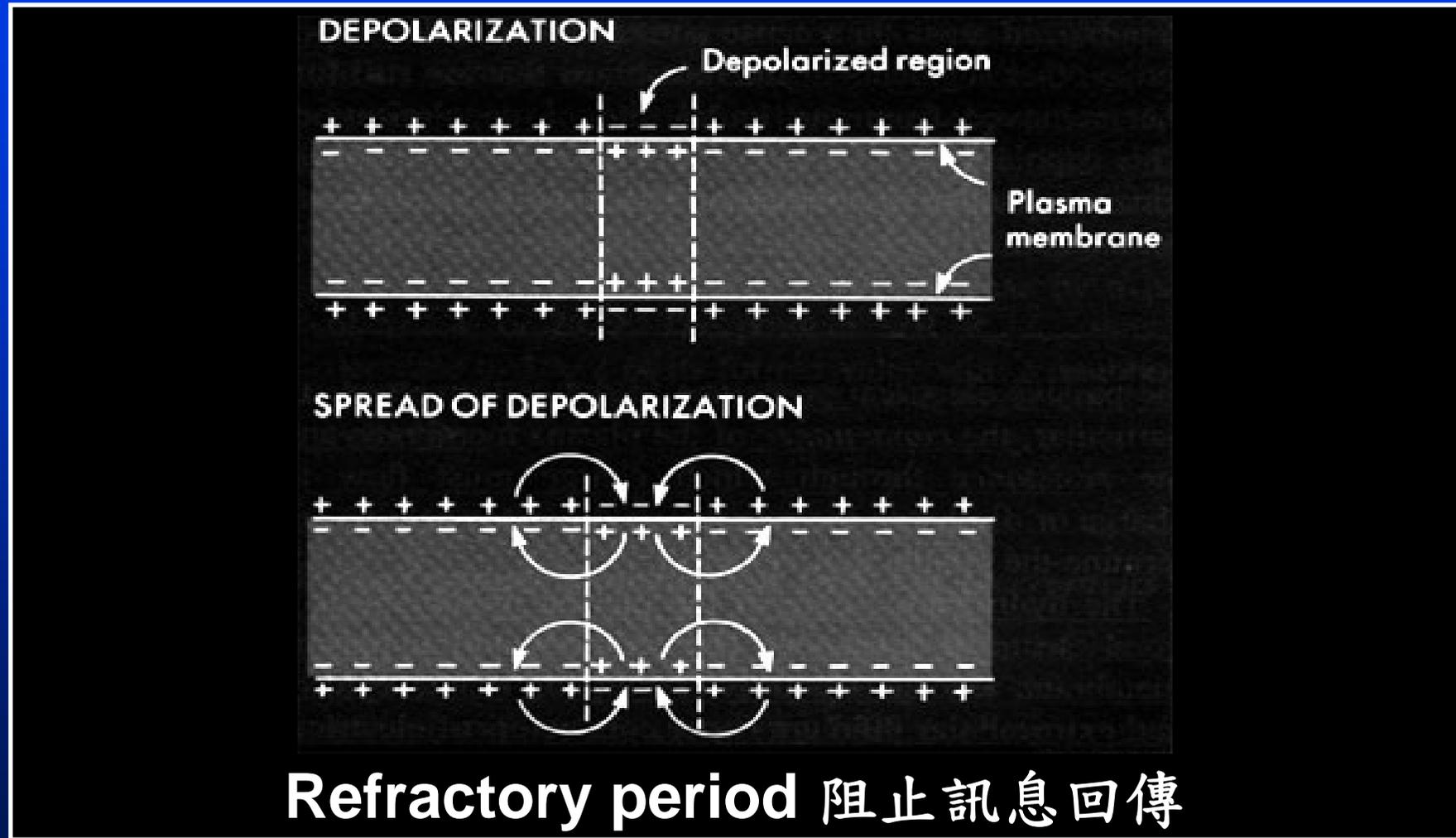
Action Potential 示意圖



由此可知 ...

- 動作電位是可以在單一神經細胞
(纖維) 內傳遞的
 - 並且是單向傳遞
- 也可以在鄰近神經細胞傳遞

神經傳導單向傳遞示意圖



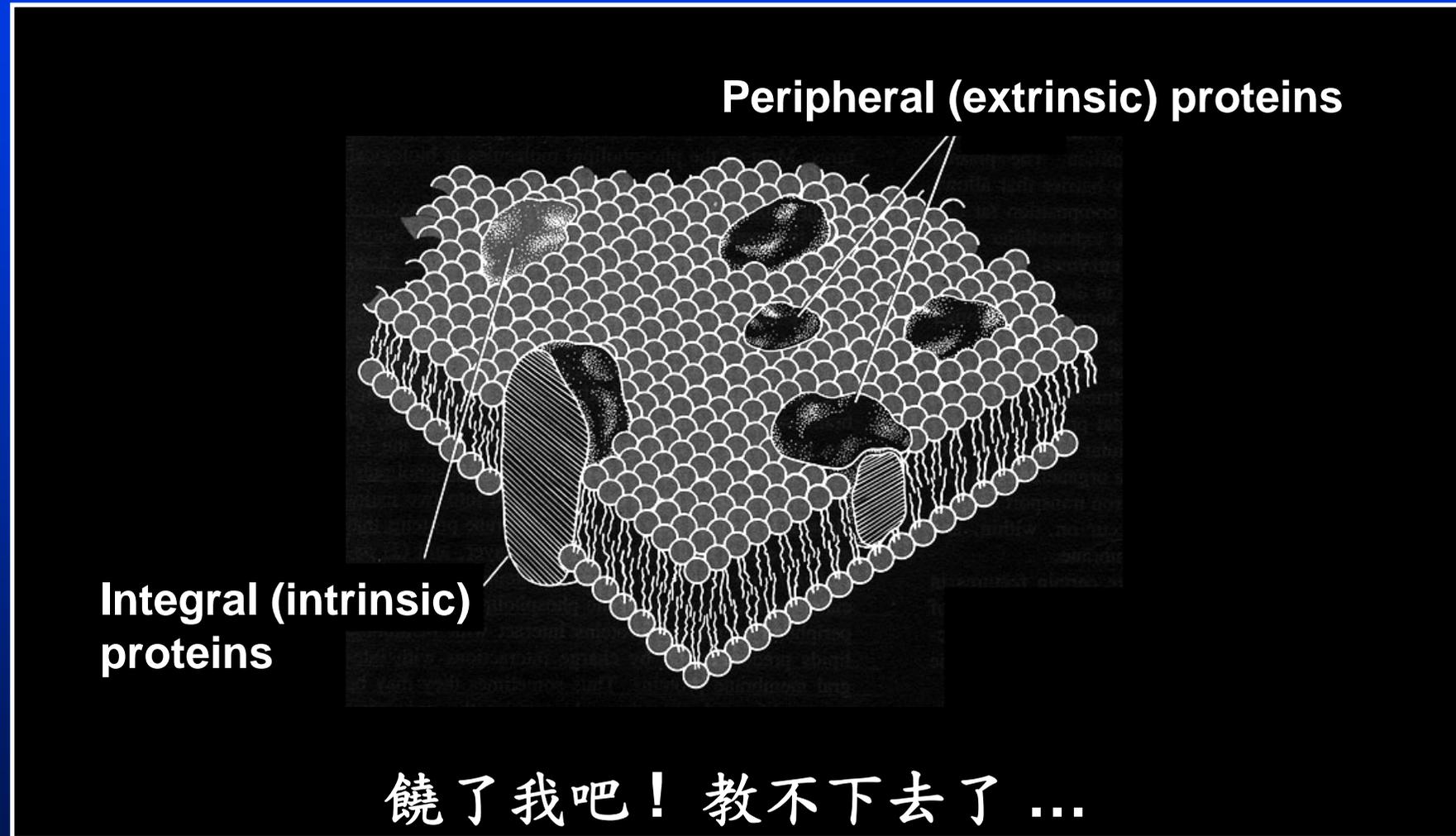
回頭一下 ...

- 我現在知道離子通道一打開， Na^+ 就會大量流入神經細胞內，但是當初為什麼 $[\text{Na}^+]_o \gg [\text{Na}^+]_i$??
 - Ion pump

簡單地說

- **Ion pump** 主動將離子往某方向輸送
- **Sodium pump** : 持續將 Na^+ 由胞內送往胞外，並換 K^+ 進來
- **$\text{Na}^+-\text{K}^+-\text{ATPase}$** (一種細胞膜蛋白質)

什麼又是細胞膜蛋白質？



饒了我吧！教不下去了...

稍微岔開一下

- 那如果細胞無法產生能量怎麼辦？
- Ion pump 失效， Na^+ 大量進入胞內
- Na^+ 濃度增加，改變滲透壓，再帶一堆水分子進入胞內 → swelling

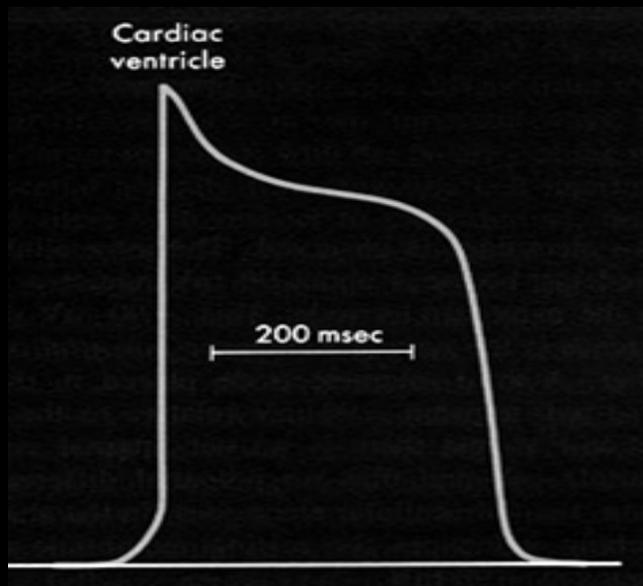
回來：肌肉中的動作電位

- 刺激肌肉的收縮（而非傳遞訊息）
- 動作電位的發生，確保整個肌肉細胞同時收縮（不然沒用）
- 原理同樣是離子通道的開啟閉合

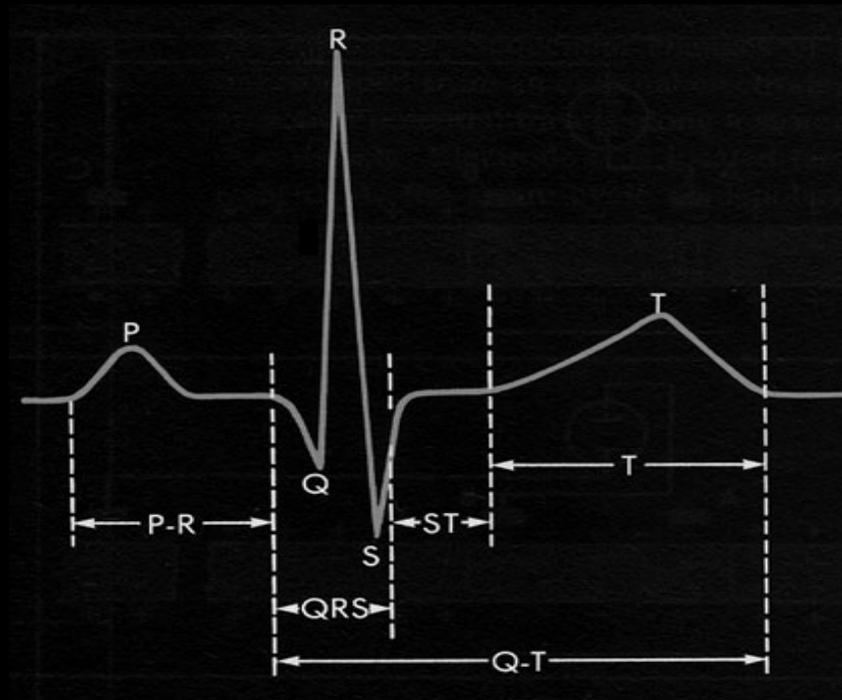
所以只要能給電刺激

- 肌肉就能收縮，心臟就能搏動
- 功能性電刺激 (FES; functional electrical stimulation) 用於復健
- 人工心律調節器 (pacemaker)

心肌的 Action Potential & ECG



Action potential

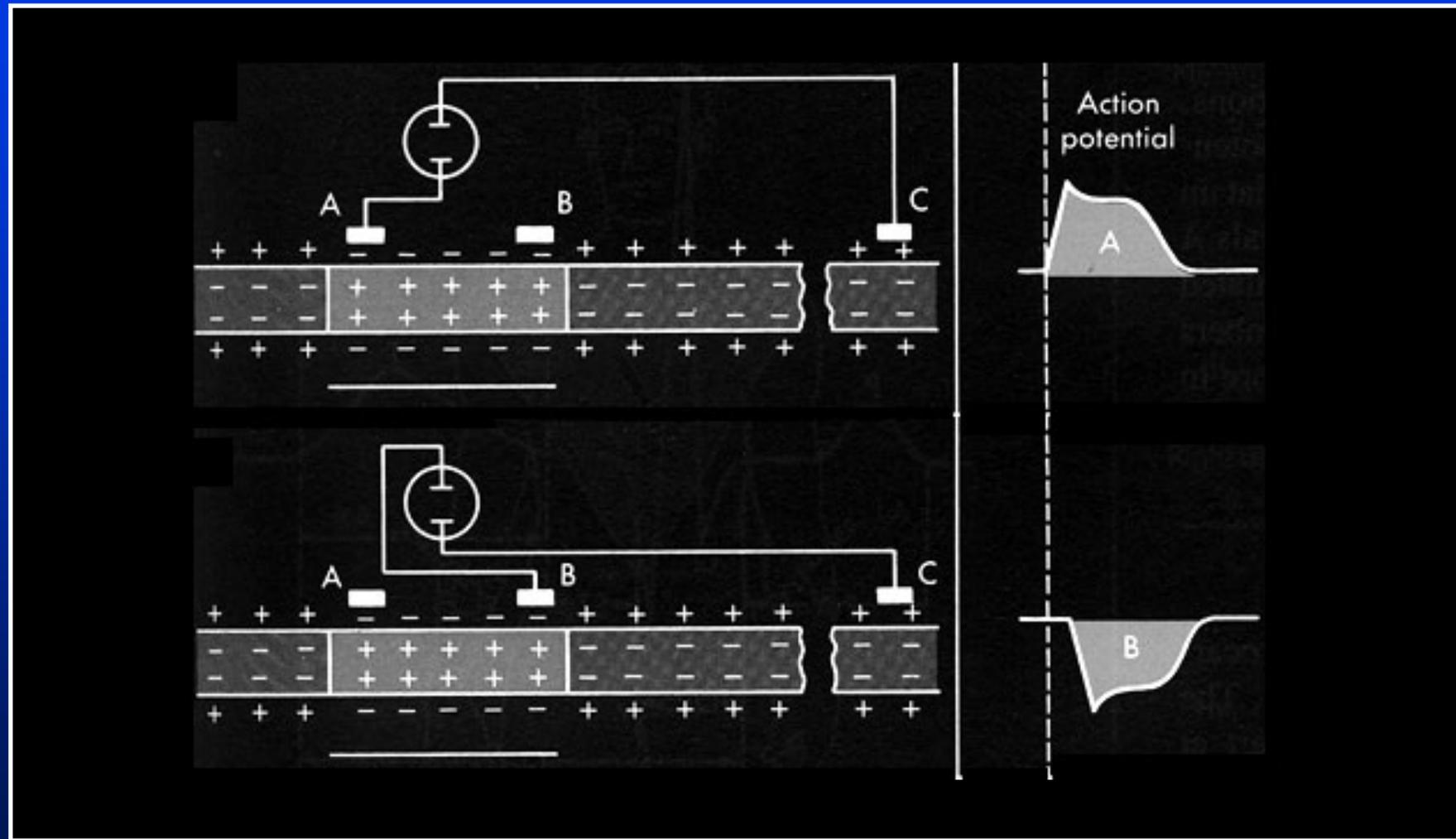


ECG's PQRST pattern

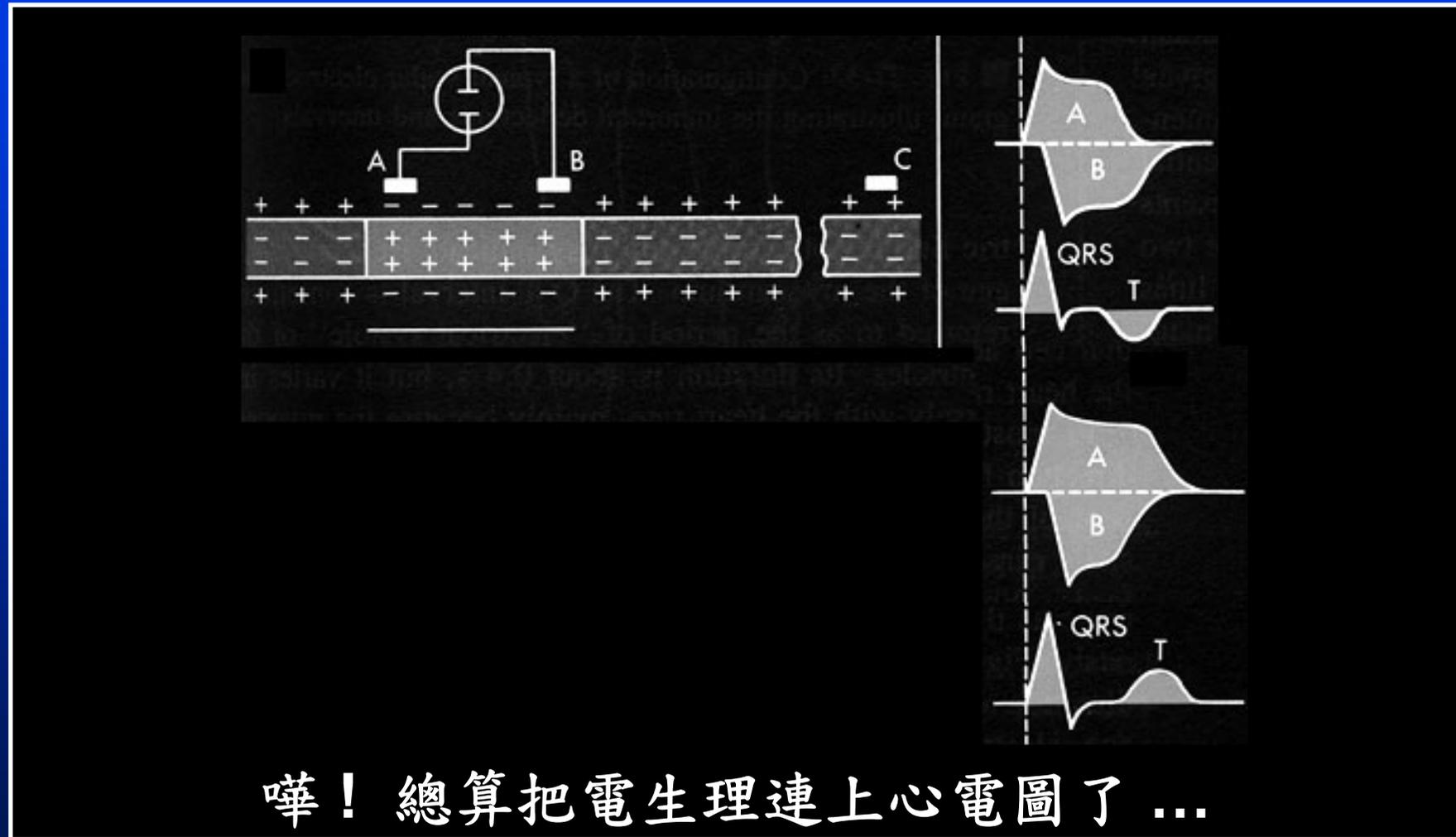
心肌與心電圖

- 心肌的動作電位波形，長得一點也不像 ECG 呀??
- 體表測得的電位，是多處的綜合
- 那麼動作電位如何「疊加」？

不同量測點所得到的動作電位



量測兩點電位差時 ...



嘩！ 總算把電生理連上心電圖了 ...

特別注意

- 顧及在座同學可能背景差異懸殊
- 電生理說明已經過高度的簡化
- 生理學中至少橫跨 5~10 章！
 - 細胞膜、神經傳導、肌肉收縮 ...

但即使如此

- 也可以說明心電圖的意義了
 - 如何量測心臟的電性？
 - 為什麼人體本身具有電性？
 - 心電圖反映出什麼疾病？

由基礎到診斷應用 ECG Interpretations

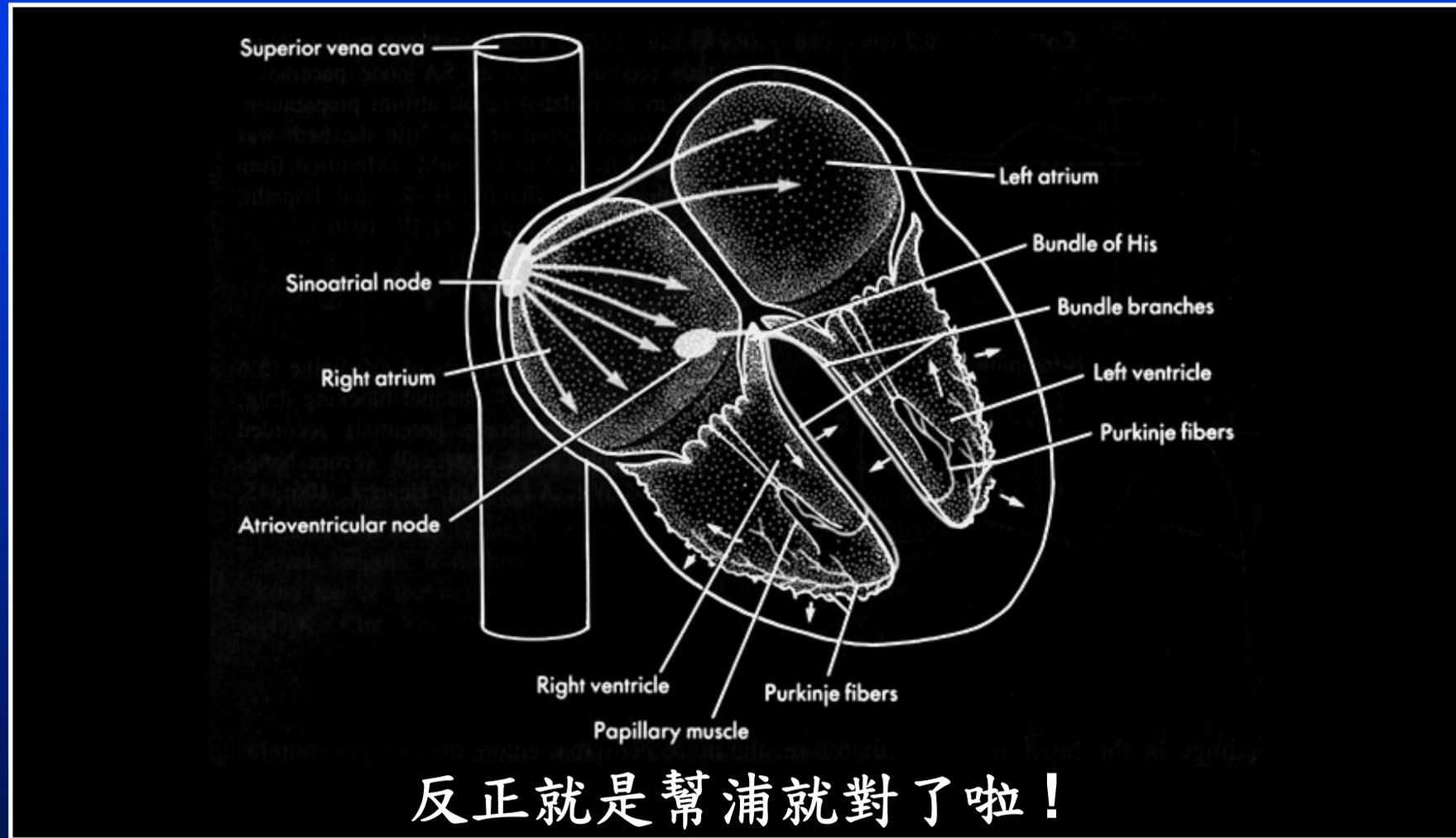
鍾孝文 教授

台大電機系 三軍總醫院放射線部

ECG 預備知識

- 基本心臟功能總不能不知道吧？
 - 左右心房、左右心室
- 誰先收縮？誰又是最大？
- 循環系統和心房心室的關係？

最簡單的心臟功能說明



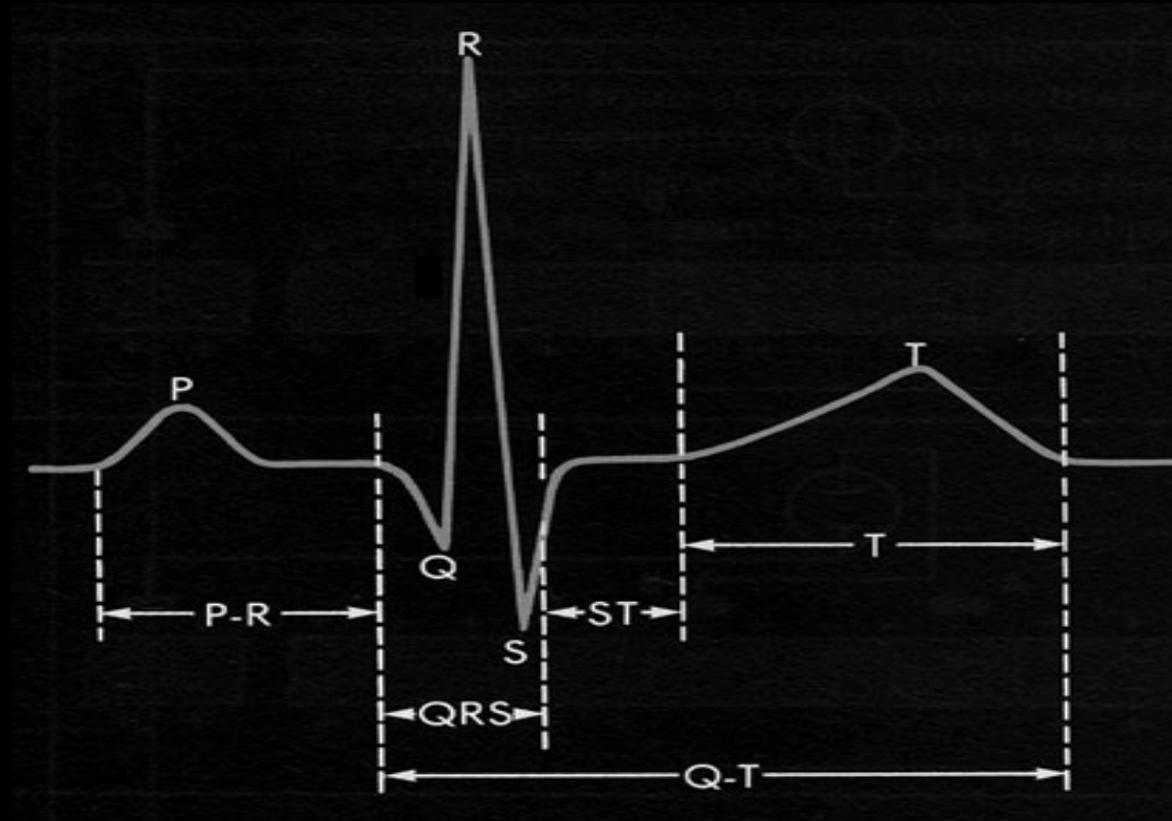
基本心臟功能

- 左心室 → 體循環 → 右心房 → 右心室 → 肺循環 → 左心房
- 心房先收縮，其次才是心室收縮
- 左心室負責體循環，心室壁最厚

心臟功能與心電圖

- Depolarize 收縮，repolarize 舒張
- 左心室動作電位主導大部份 ECG
- 心房則只佔有小部份
 - 但是動作電位會領先心室

正常的心電圖波形



QRS 為波形最明顯部份，P 領先 QRS

所以波形的意義

- **P wave** : 心房收縮
- **QRS-complex** : 心室收縮
- **T wave** : 心室舒張
- 心房舒張波形被 **QRS** 蓋過

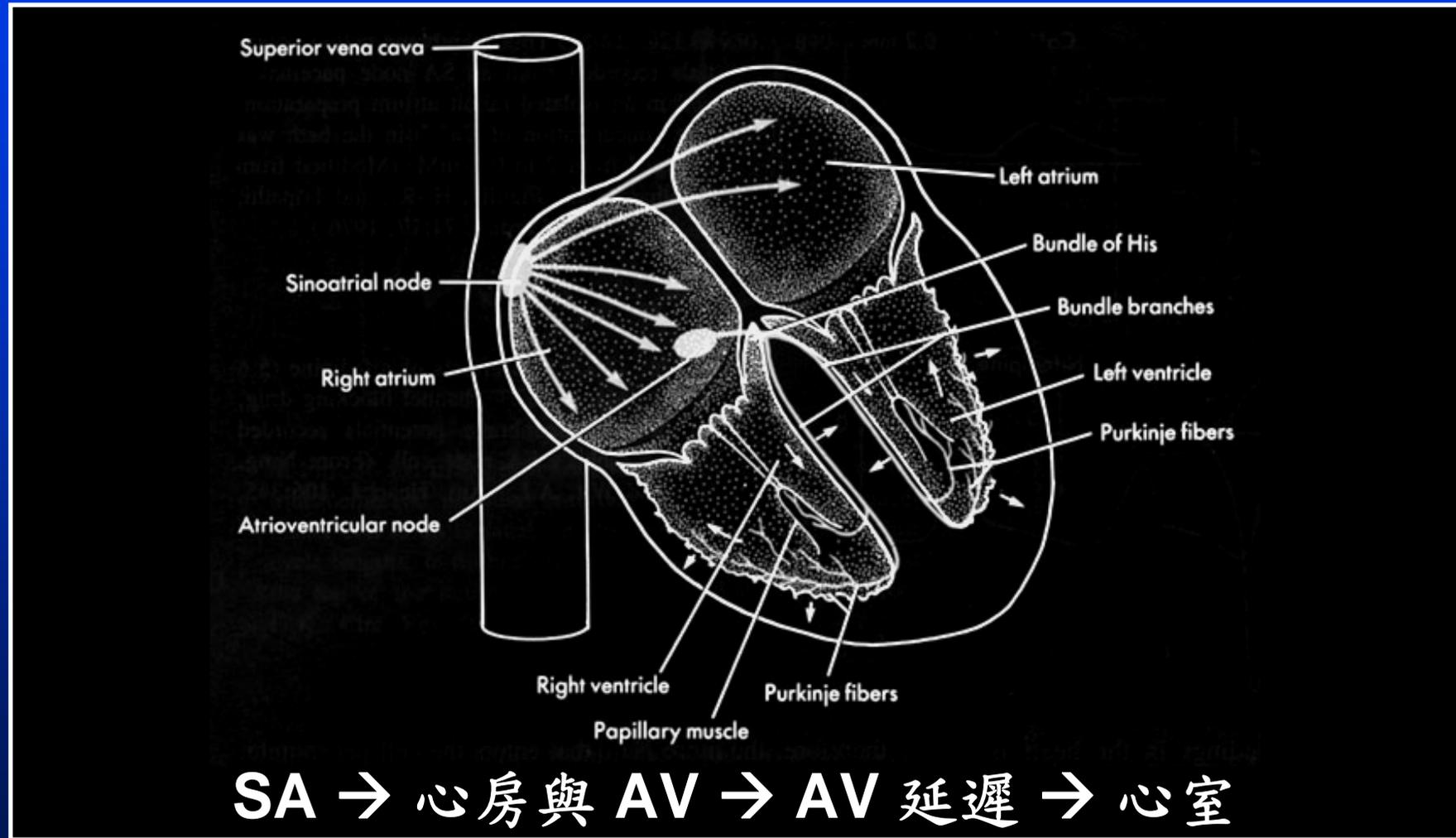
簡單地說 ...

- P-wave 異常：心房的問題
- QRS-complex 異常：心室的問題
- 但是這樣的簡化有點太過火了，需要再多談一些心臟節律發生的原理

心臟規律收縮的源頭

- 心肌每個部位都會發出規則的動作電位而收縮 (每個部位都是節律點)
- 也都能傳導下去讓別人跟著收縮
- 正常情況下由竇房結發號施令

心率調節系統



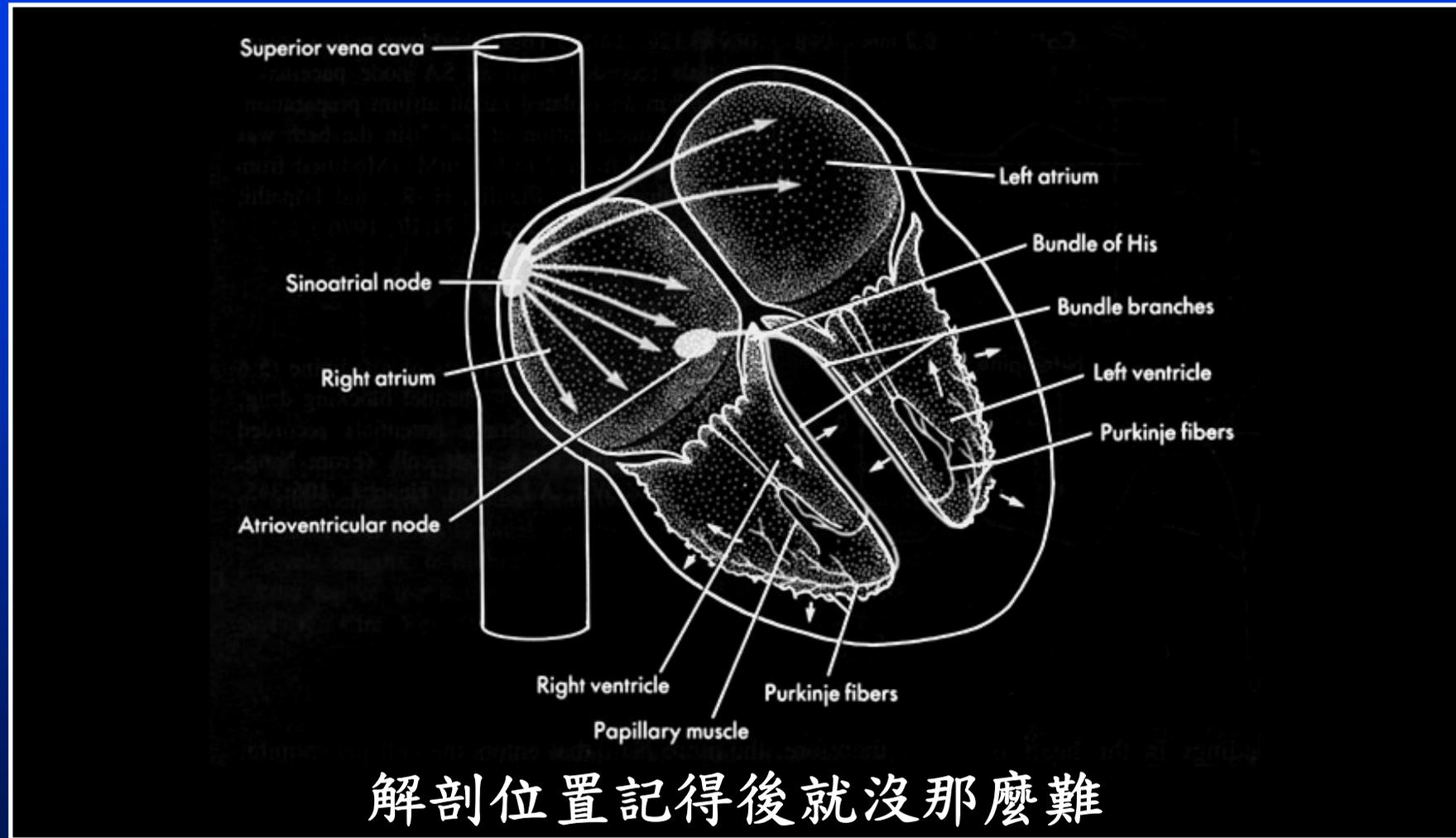
解剖名詞解釋

- 竇房結：Sinus-Atrium (SA) node
 - Sinus：竇－孔洞、靜脈
 - Atrium：心房
- 表示位置介於靜脈與心房之間

同理 ...

- 房室結：Atrium-Ventricle node
 - Atrium：心房
 - Ventricle：心室
- 表示位置介於心房與心室之間

再看一遍心率調節系統



解剖位置記得後就沒那麼難

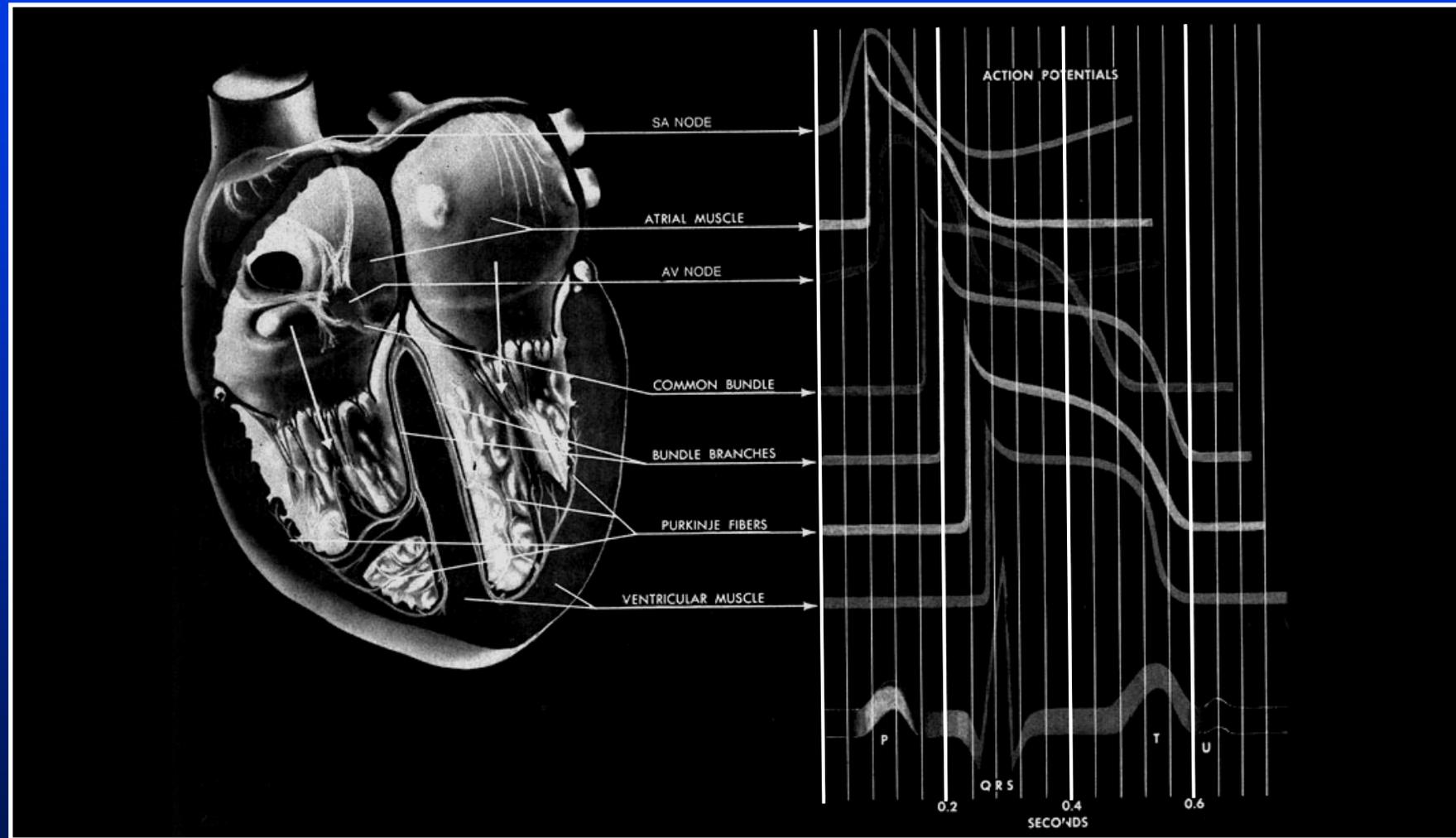
正常的心臟節律

- SA node 發出規律脈動，經由 interatrial tract 傳至心房、internodal tracts 傳至 AV node
- AV node 延遲一段短時間 (0.1s)

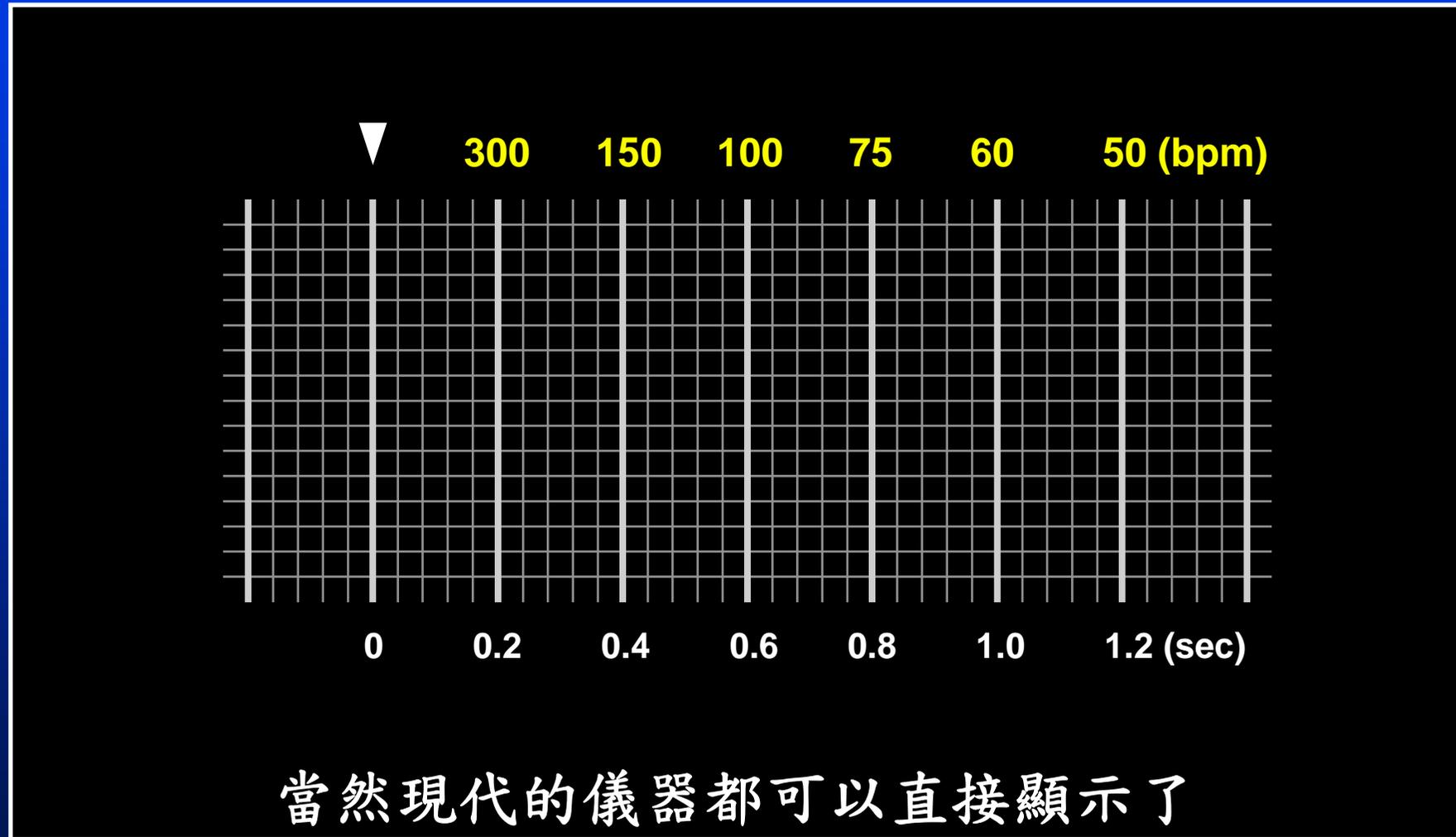
正常的心臟節律 (續)

- AV node 延遲之後，經由 bundle of His 傳至各 bundle branches、再到 Purkinje fiber network 傳到心室各處

心臟各部位電生理活動 與 心電圖



順便打個岔：心率的計算



稍等 ...

- 既然 SA node 統一控制心律，那為什麼心肌各部位都是節律點？
- 一旦 SA node 失效，心臟仍能維持規律搏動輸送血液至全身！

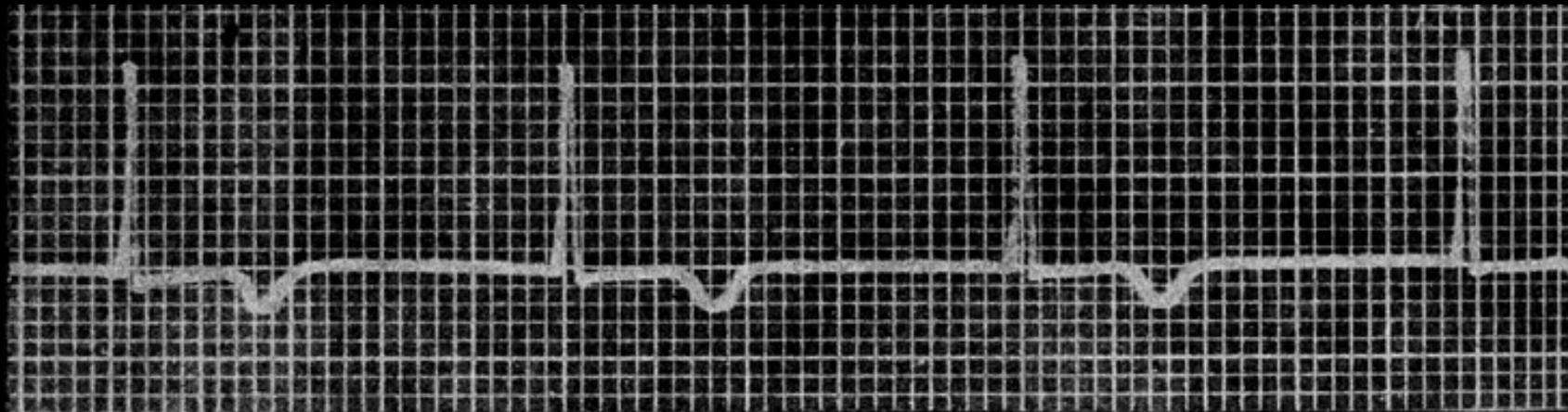
到處都發號施令！

- 那豈不是天下大亂？不會
- 「上游」頻率高、「下游」頻率低
- 由於動作電位 **refractory period** 的作用，不會重新收縮

Inherent Rhythm

- SA node : 70~75 bpm
- 心房 : 70~75 bpm
- AV node : 60 bpm
- 心室 : 30~45 bpm
- 緊急狀態 : 150~250 bpm

單從這裡就可以推演了



緩脈 (bradycardia) : 60 bpm

由心率推測 → 異位節律點來自 AV node

→ 沒有 P wave 與此推測吻合

觀念延伸 ...



PQRST pattern 完全正常 → 電性傳導正常
→ 節律點由 SA node 發出
竇性緩脈或頻脈 (sinus brady- or tachycardia)

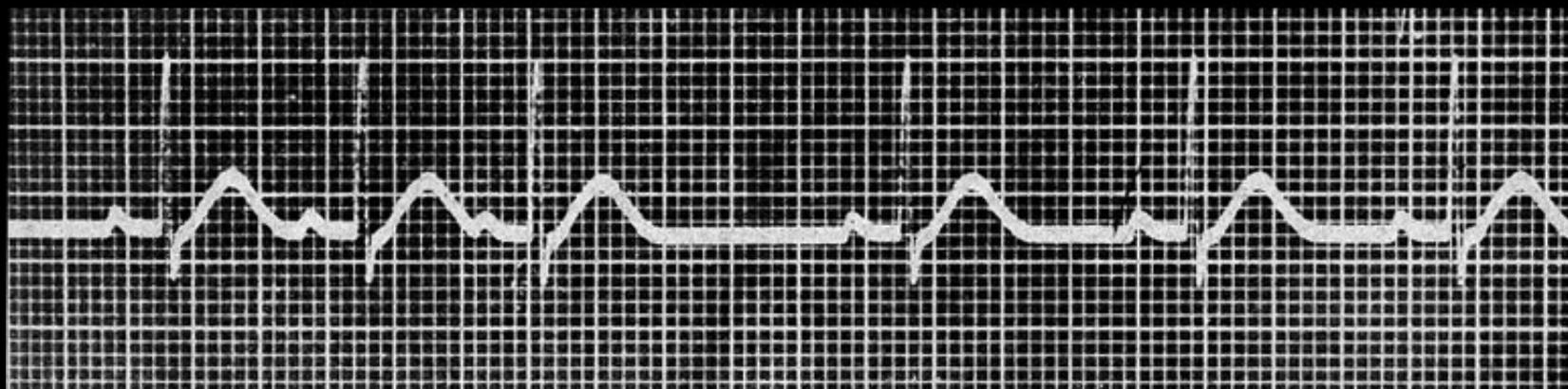
竇性頻脈

- Sinus tachycardia
- 運動、情緒、肺栓塞、發燒、甲狀腺機能亢進 ... 等皆可引起
- 詳細的原因讓醫師去背就可以了

竇性緩脈

- Sinus bradycardia
- 休息 (特別是運動員)、藥物 (交感神經抑制)、睡眠中窒息 ... 等
- 多數患者其實並無症狀

繼續延伸 ...

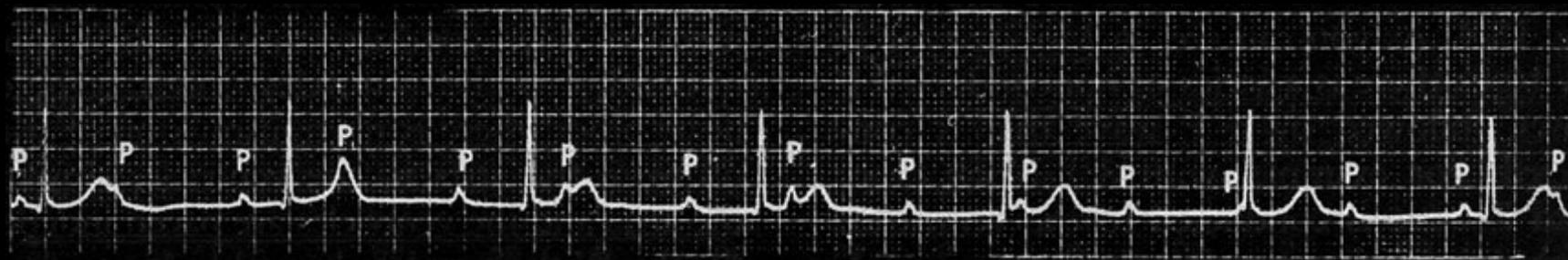


波形完全正常 → 節律點仍由 SA node 發出
竇性心律不整 (sinus arrhythmia)
可由冠狀動脈疾病或呼吸引起，亦可出現於正常人

再例：AV Node 細胞死亡

- 心房仍正常搏動，但無法傳至心室
- 心室節律點自行搏動，但速率較慢
且與心房搏動全無關聯
- **3rd degree heart block**

3rd Degree (Complete) AV Block

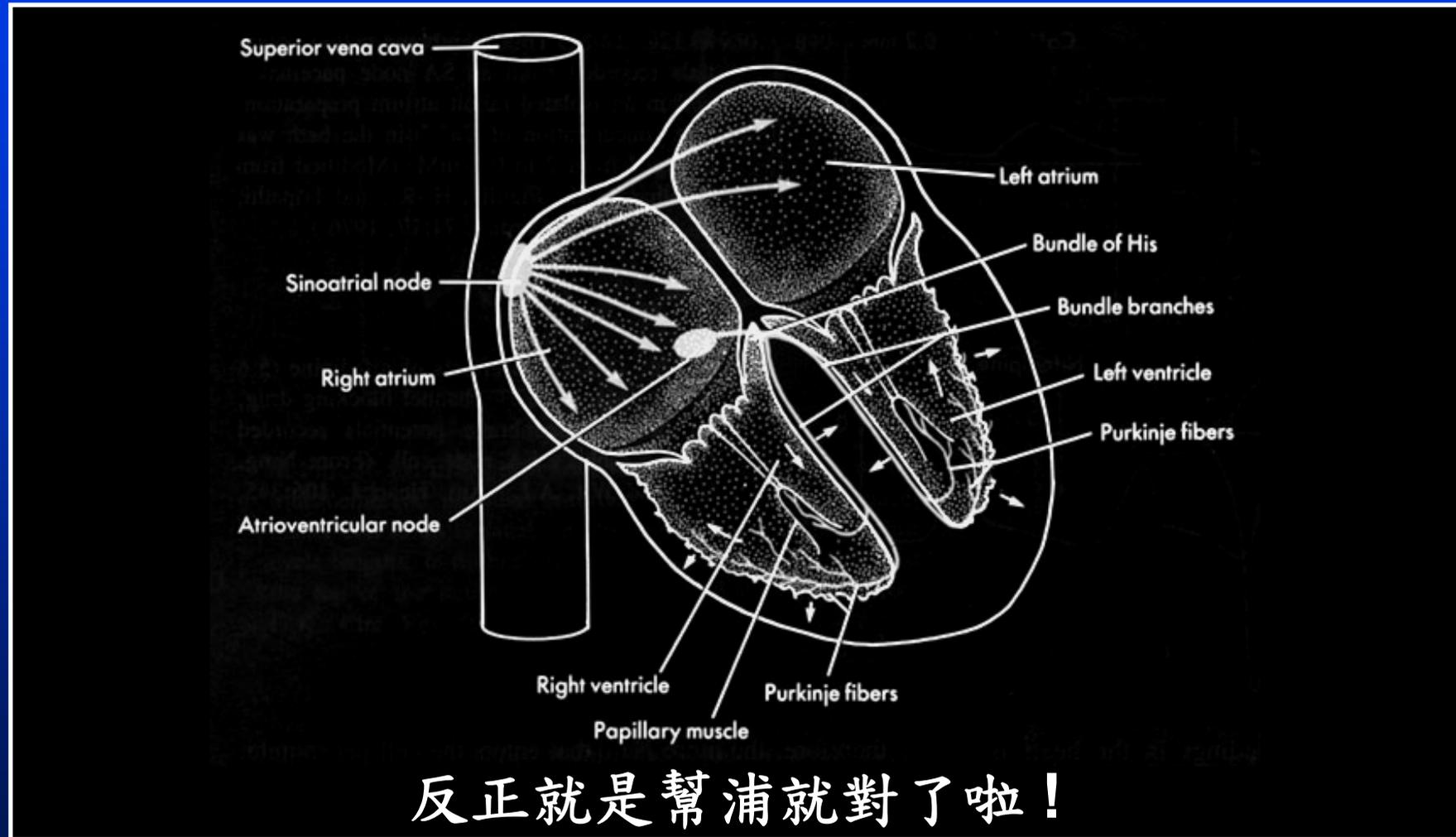


P 波速率約 100 bpm ， QRS 4~50 bpm
有些 P 波疊加在其他波形上 (e.g., T wave)
兩者完全沒有 correlation

Complete Heart Block

- 心房收縮與心室收縮不同調
- 心室搏動過慢可導致血液輸出極低
 - Potentially life-threatening !
- 有時需加裝人工心律調節器

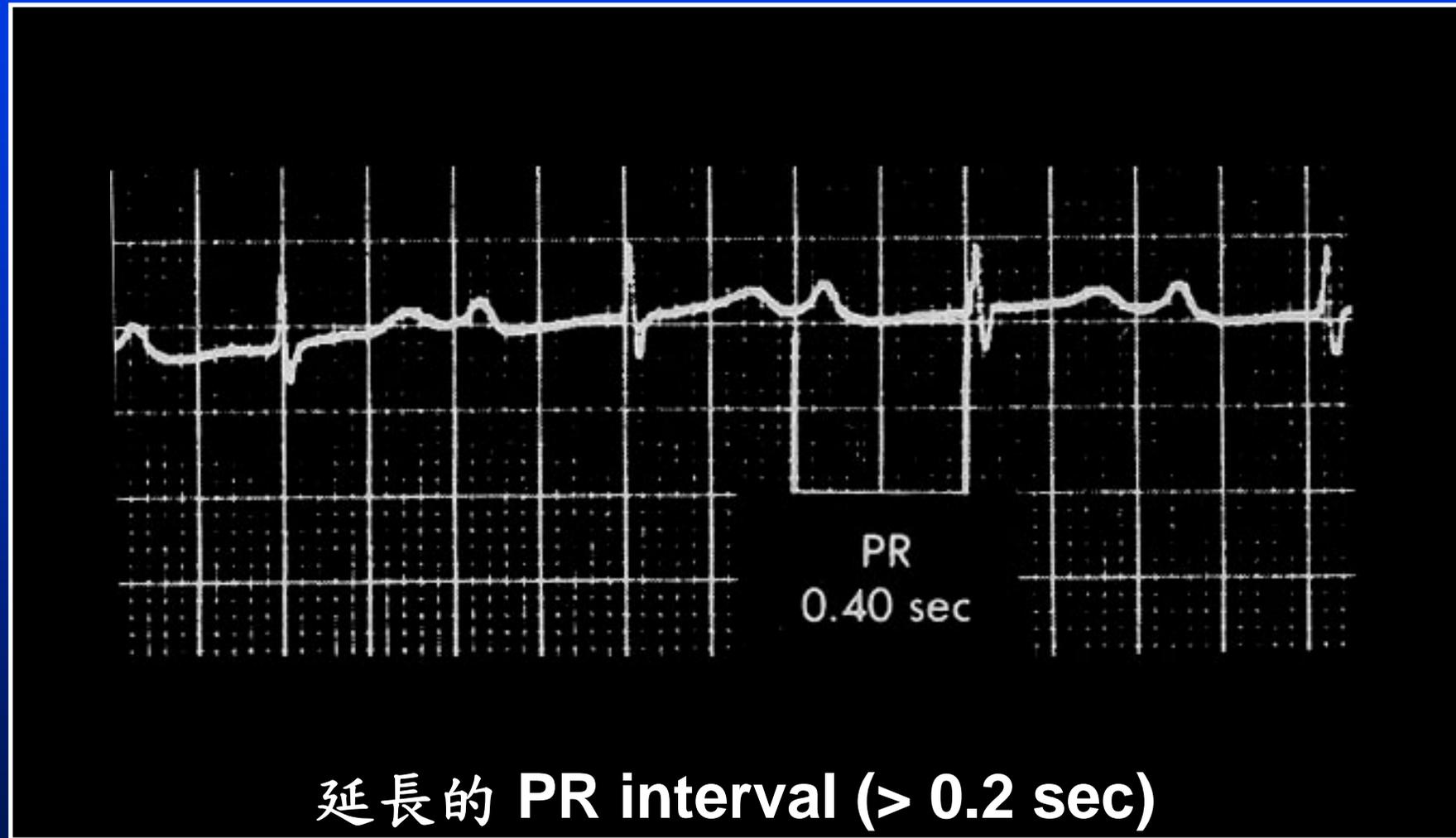
喂！還記得心臟功能嗎？



繼續推演 ...

- 1st degree heart block
- 所有的心房搏動 (P wave) 都經房室結傳到心室 (QRS)，但比較慢
- 風濕或病毒感染可發生

1st Degree Heart Block

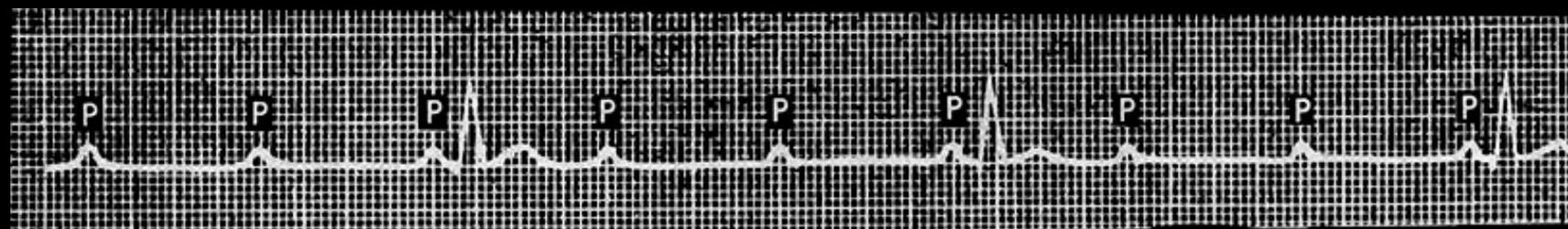


延長的 PR interval (> 0.2 sec)

繼續推演 ...

- **2nd degree heart block**
- 不是每個心房搏動都傳到心室
- 一兩個不能傳導的 P 波後出現一個能傳導的 (2:1 or 3:1 block)

2nd Degree Heart Block



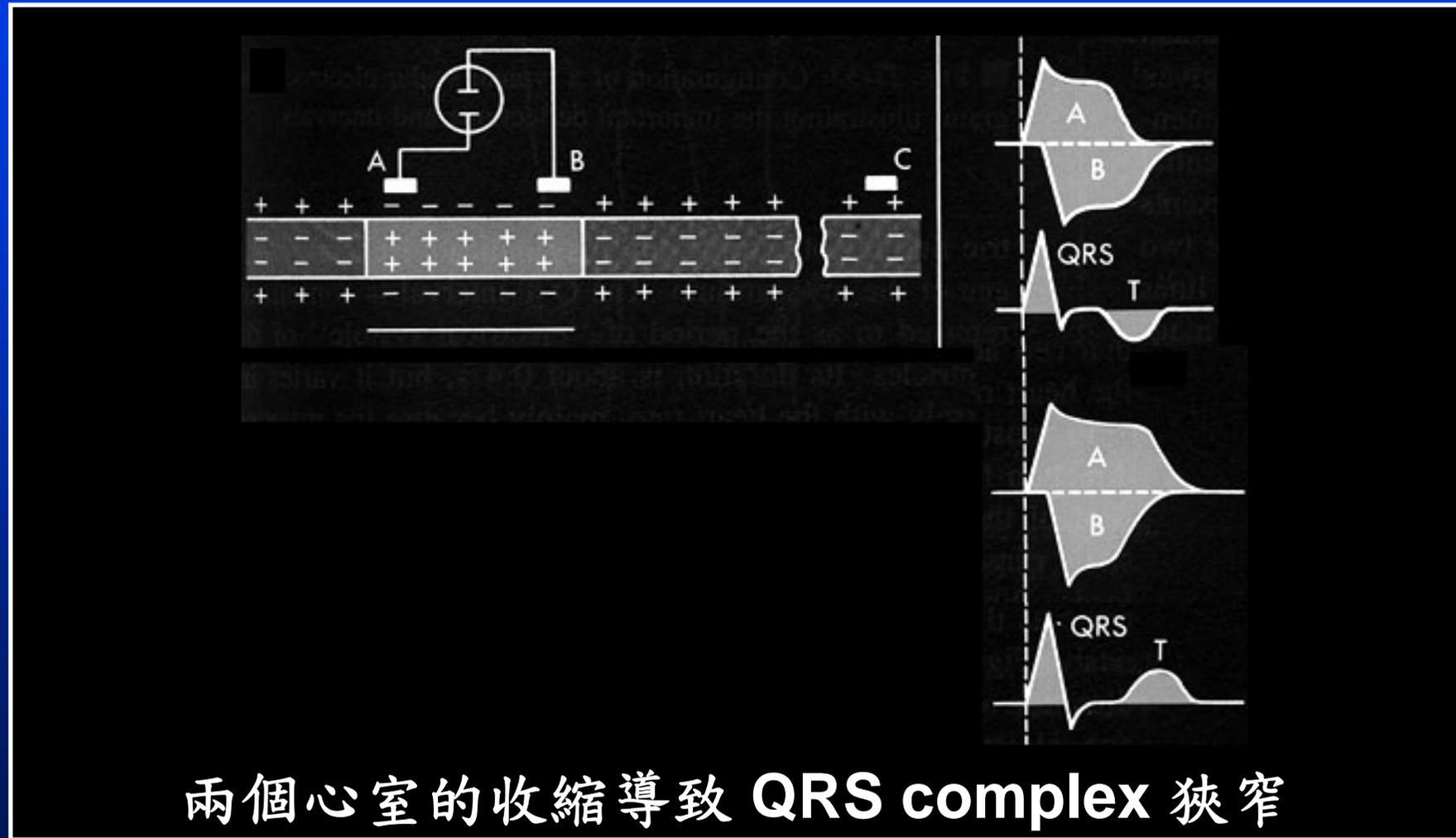
2nd degree heart block 另有許多種
不一一詳談

3:1 AV block (Mobitz Type II)

心室早期收縮

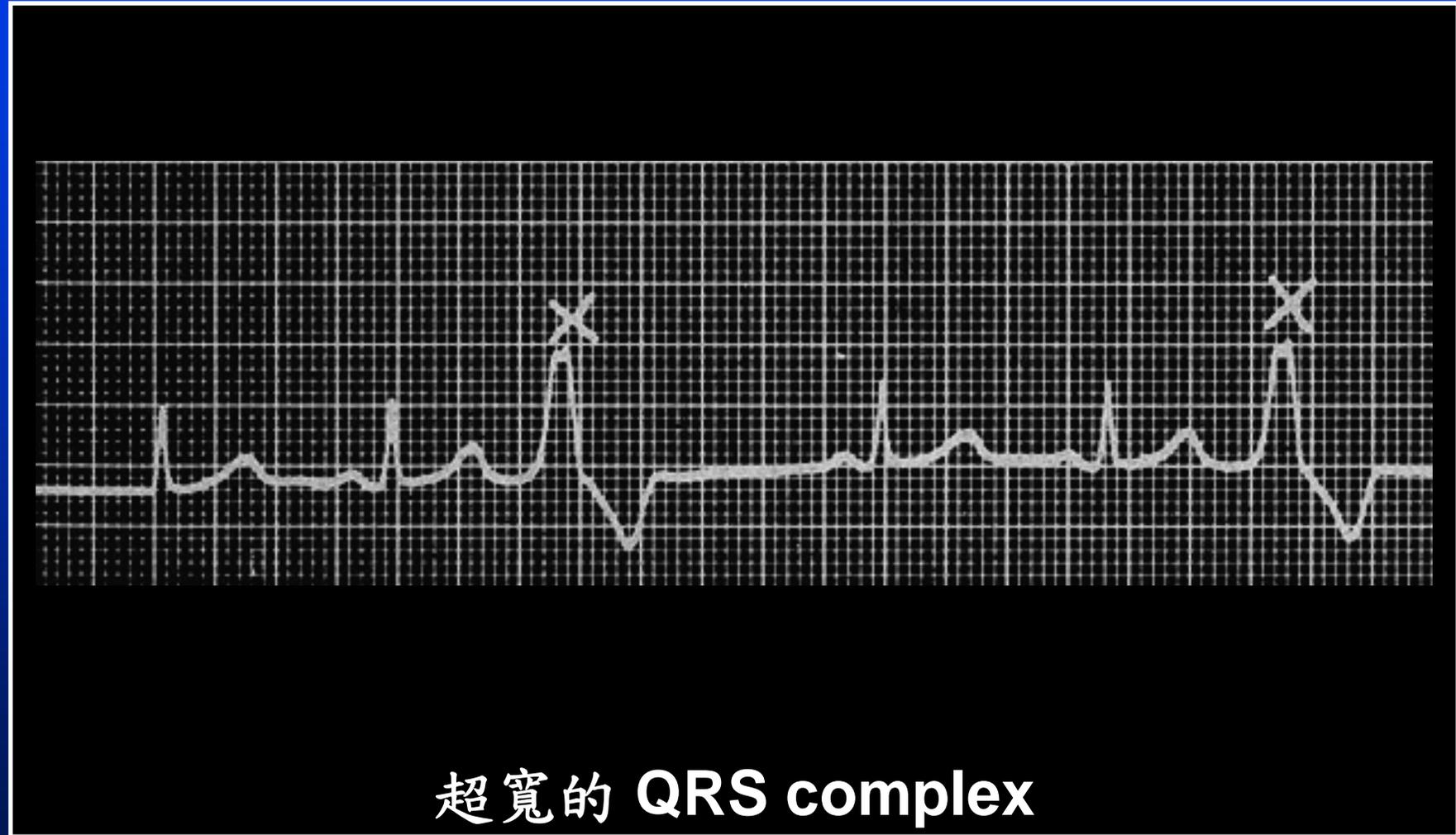
- PVC (premature ventricular contraction)、或 VPC
- 心室中的異位節律點 (ectopic focus) 提早發出動作電位

正常的心電圖

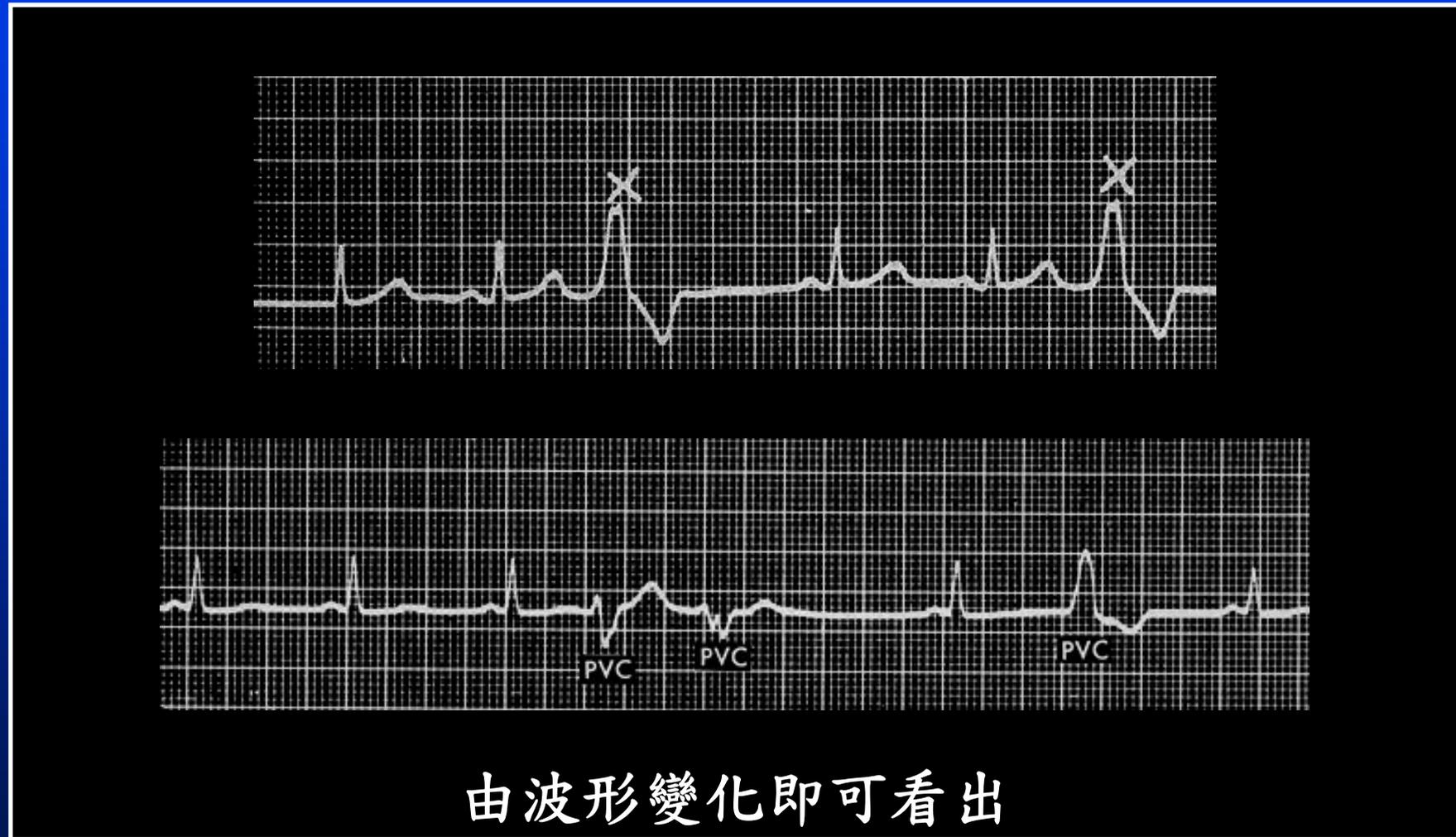


兩個心室的收縮導致 QRS complex 狹窄

心室早期收縮的心電圖



單一與多個異位節律點的心室早期收縮



由波形變化即可看出

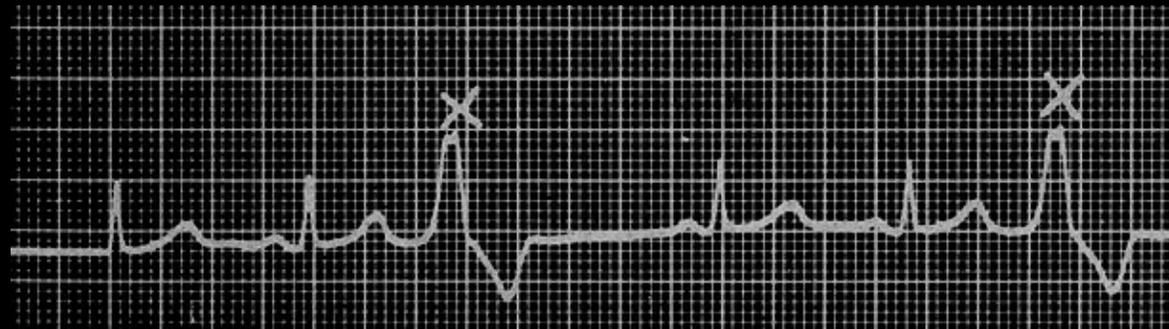
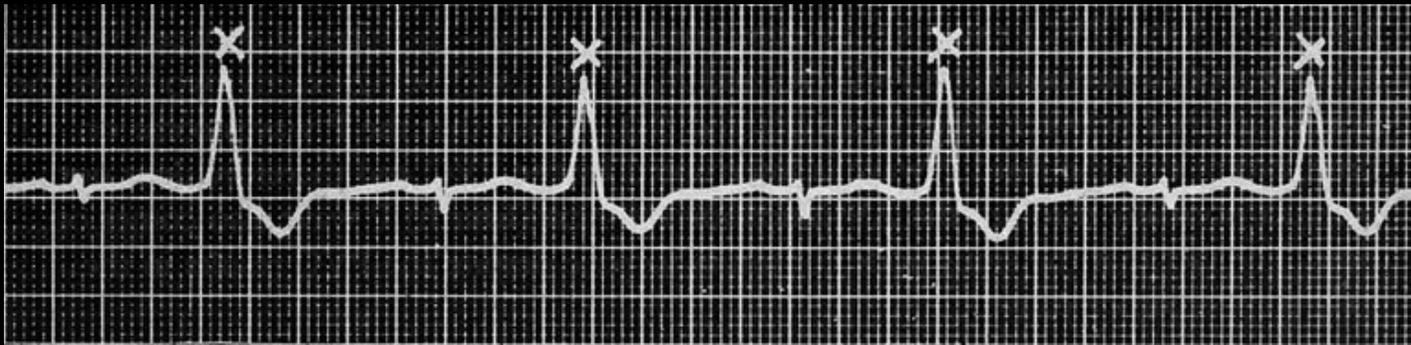
心室早期收縮 (PVC)

- 心房還沒收縮好，心室就先收縮
— 無效搏動 (送不出血液)、心悸
- 最常見的心律不整
- 焦慮、咖啡因、缺氧... 等可引起

PVC 的發生頻率

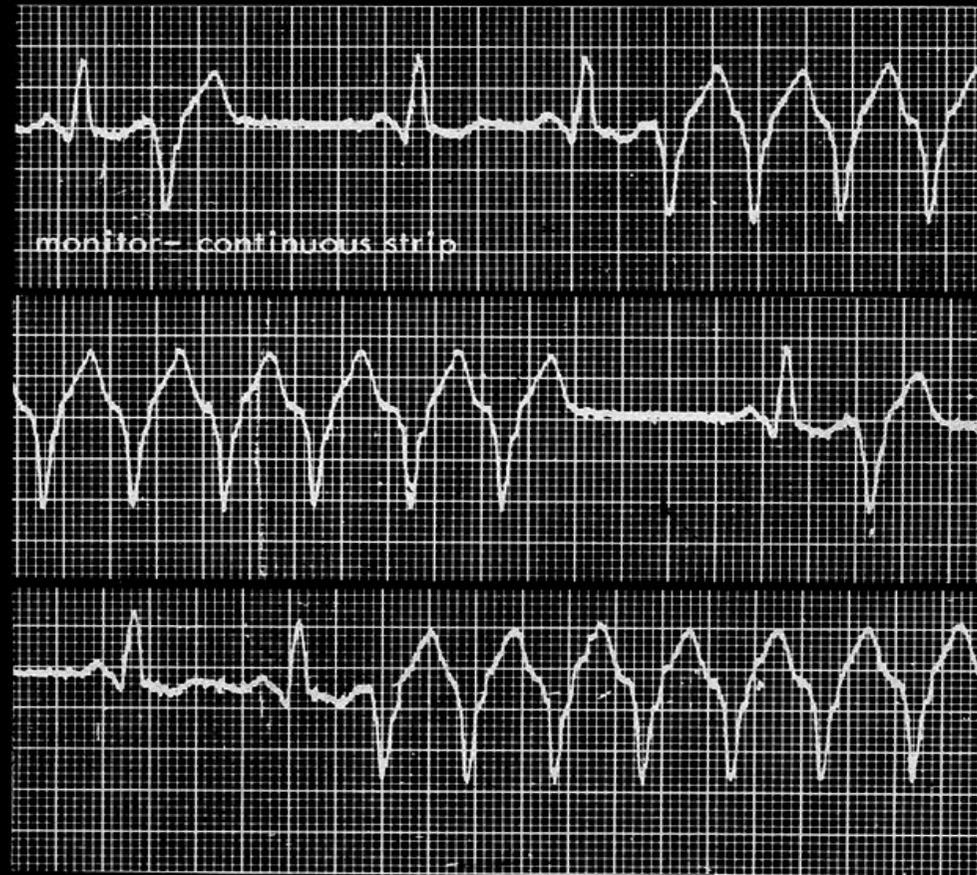
- **Single PVC : > 6 per minute**
- **Trigeminy, bigeminy**
- **Doublet, triplet, ...**
- **Ventricular tachycardia → 危險！**

Ventricular Bi- and Trigeminy



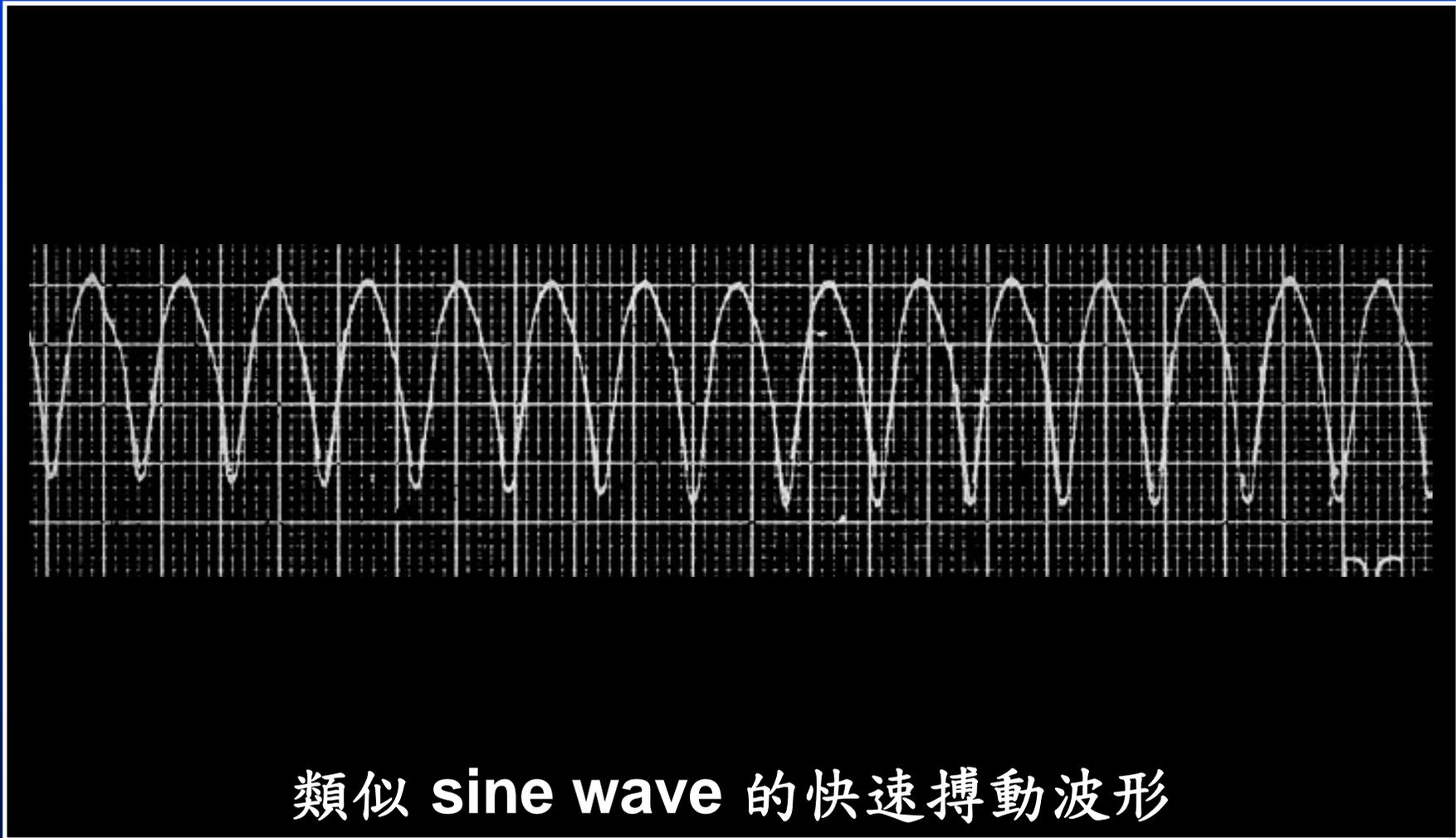
上 : bigeminy , 下 : trigeminy

Ventricular Tachycardia



都是極寬 QRS 的快速搏動波形

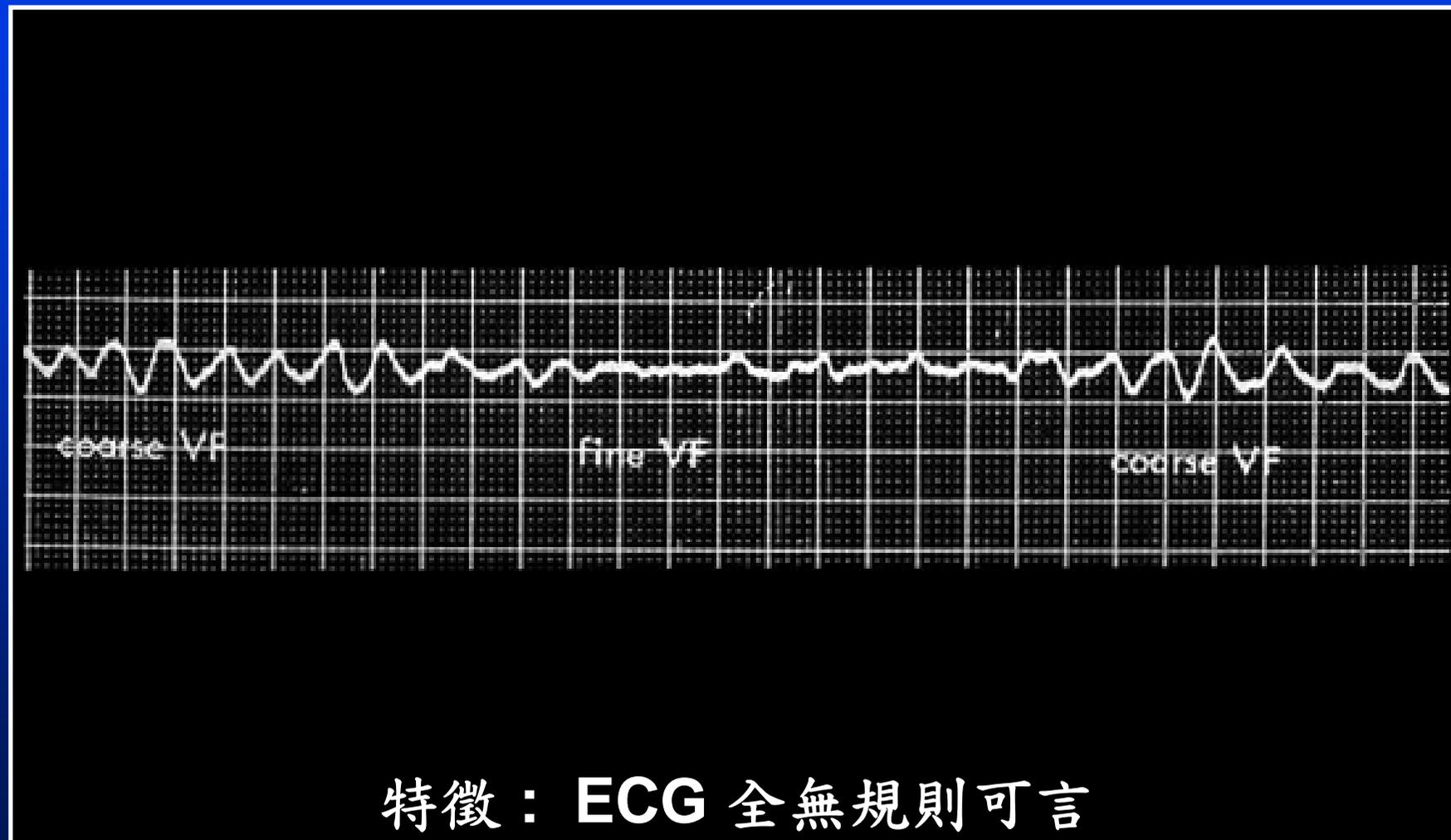
Ventricular Flutter (VT 的一種)



心室性頻脈 (VT)

- 每次都是無效的搏動 (心臟也沒血)
- 極度危險的心律不整 !!
- 連續性 VT 幾乎必引起心室震顫 VF
 - 每個心肌節律點都想來救

Ventricular Fibrillation

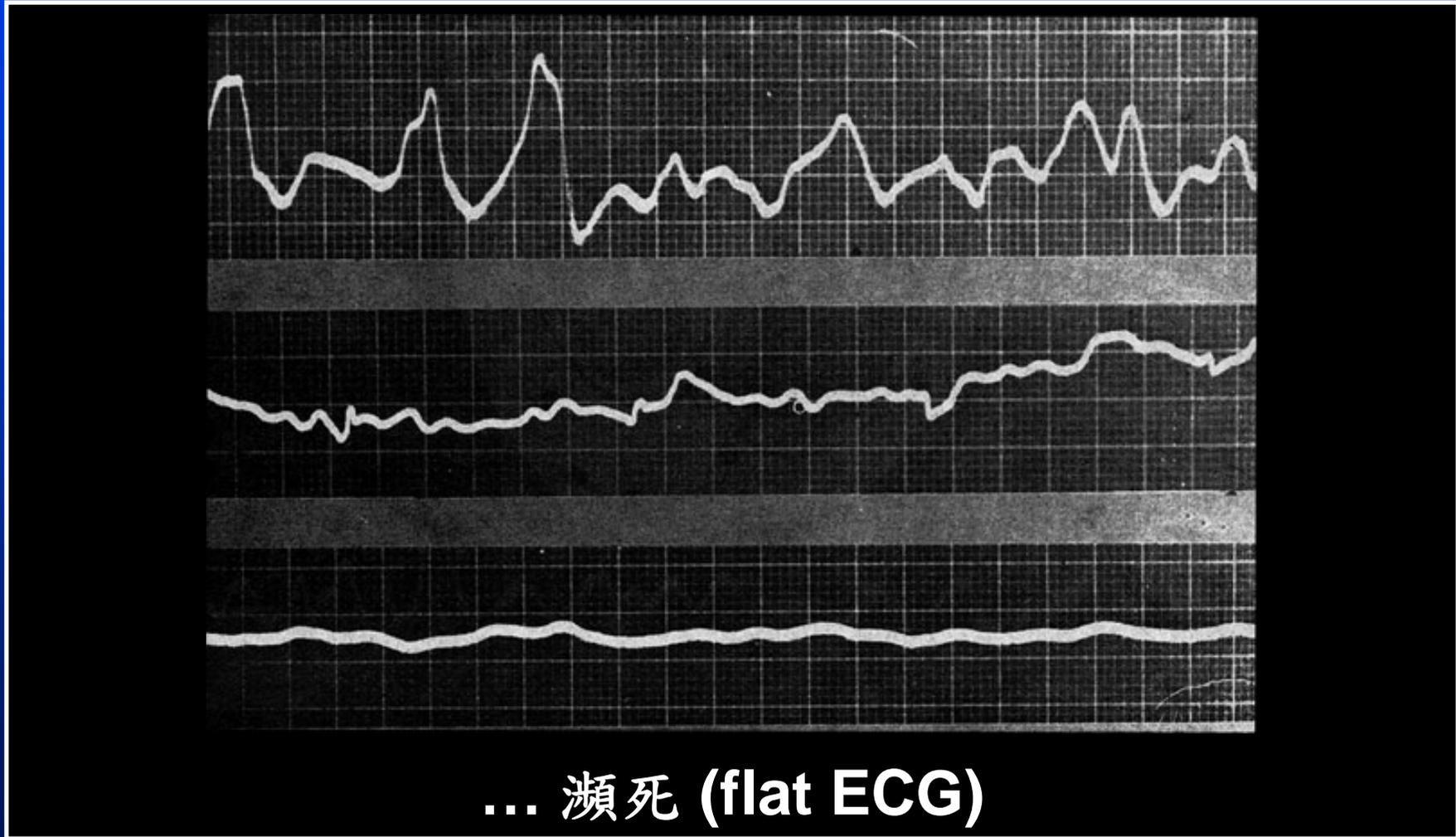


特徵：ECG 全無規則可言

心室震顫 (VF)

- 每個心肌節律點都發出動作電位
- 完全不同步，心室根本無法收縮
- 病患將立即死亡
- 緊急治療方式 (回想電生理)？

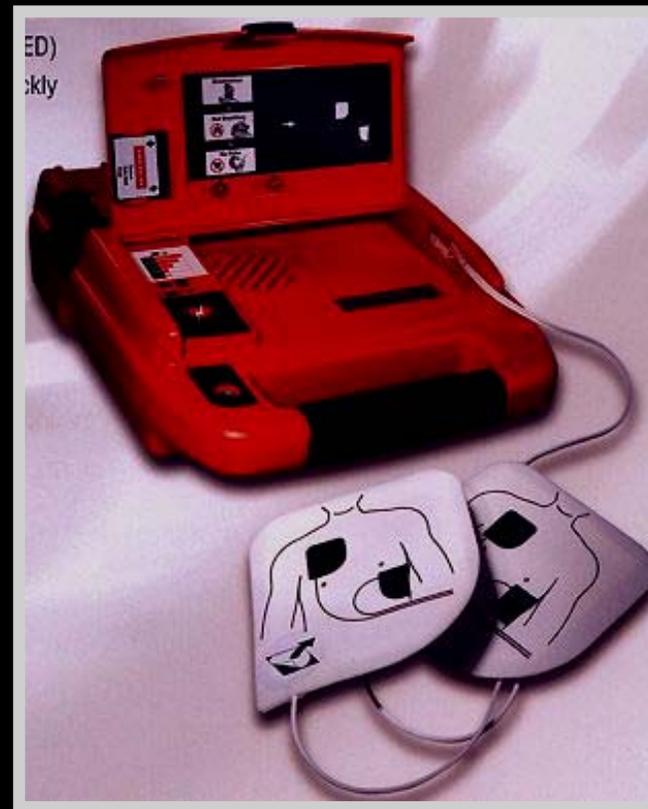
由 Ventricular Fibrillation 到 ...



電擊、重擊或心臟按摩

- 強大外力引發瞬間去極化
- **Refractory period** 結束後恢復節律
- 一般可「暫時」恢復正常心跳
- 推薦讀物：侯文詠「人子」

去顫電擊器



便於攜帶，體積儘可能減小

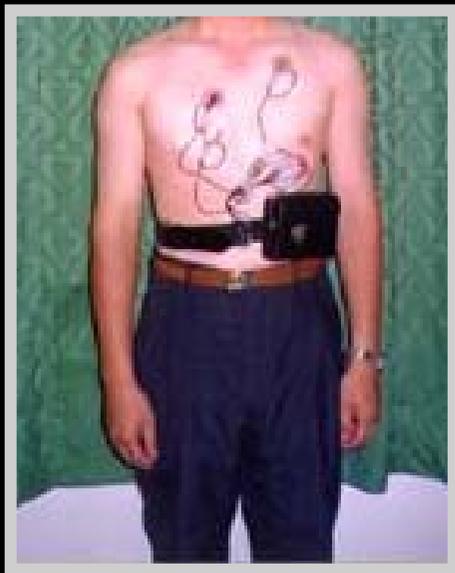
當然還有很多其他的

- 心房早期收縮、心房撲動或震顫、
心肌缺血、心肌梗塞、心室肥大 ...
- 各位不是醫師，就不多叨擾了？
- 考試絕不會出診斷，請放心

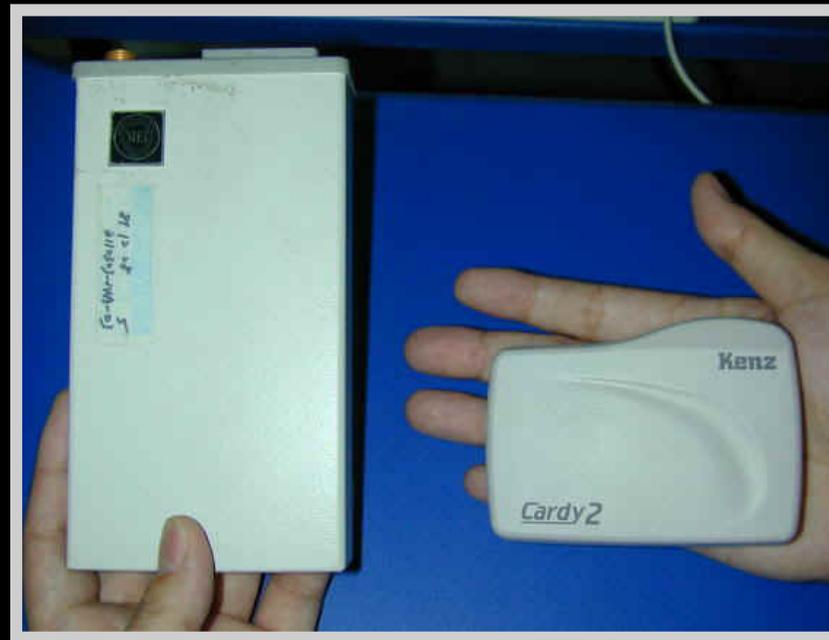
心電圖的衍生

- Holter ECG (24 小時心電圖)
- 運動心電圖 (challenge test)
- 胎兒心電圖
- Vectorcardiogram ...

Holter ECG



配戴情形



錄音帶式與記憶體式

運動心電圖



挑戰心臟負荷能力

小結論

- ECG：心臟科第一線檢查
 - 雖然未必 **specific**
- 不要告訴我你「學會心電圖了」
 - 我只教了鳳毛麟角

今日課程內容

- 如何量測心臟的電性
- 為什麼人體本身具有電性
- 心電圖反映出什麼疾病
- 推論方式不只適用心電圖

主要參考書

- Webster JG, Ed., Medical instrumentation: application and design, 2nd ed., John Wiley and Sons, 1995.
- Enderle JD et al., Introduction to biomedical engineering, Academic Press, San Diego, CA, 1997.
- Berne RM & Levy MN, Physiology, 2nd ed., St Louis, Mosby, 1988.
- Dubis D, Rapid interpretation of EKG's: a programmed course, 5th ed., Tampa, Cover, 1998.
- Goldberger AL et al., Clinical Electrocardiography: a simplified approach, 3rd ed., St Louis, Mosby, 1986.

醫學量測儀器

Medical Instruments

鍾孝文 教授

台大電機系 三軍總醫院放射線部