

台灣二〇〇五年國際科學展覽會

科 別：物理

作品名稱：推著離子跑

得獎獎項：大會獎第一名

候補作品:新加坡第 28 屆青年科學節

學 校：基隆市立銘傳國民中學

作 者：李欣瑜、胡欣

評語與建議事項：

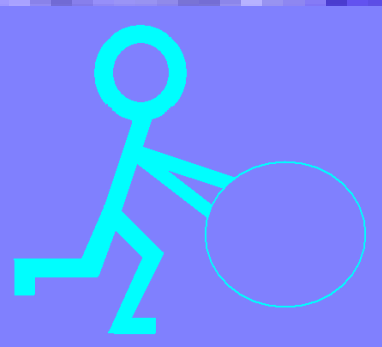
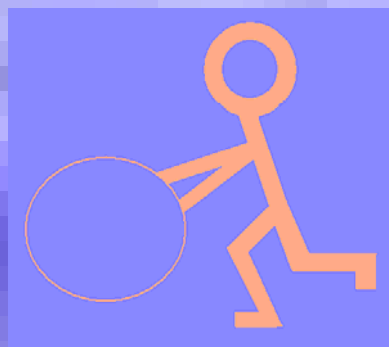
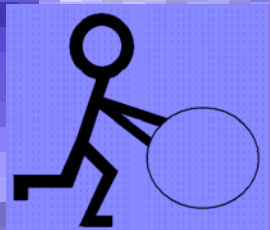
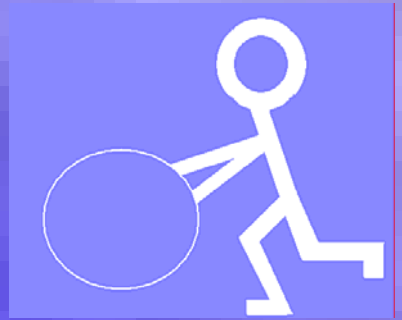
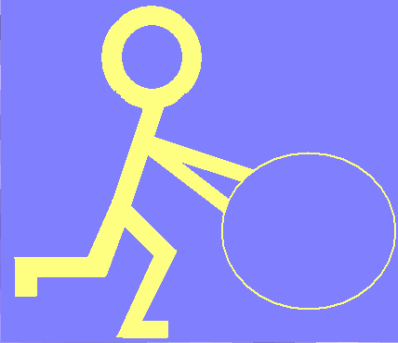
本作品研究電解質的導電特性，電所觀測得知電滯效應，能推論導電溶液中分子的排列狀態，並利用單色光繞射實驗，驗證排列狀態，也能有理論模型，討論所觀測得電流回流現象。作品實驗過程完整，利用不同實驗裝置驗證分子組態。從定性與定量上完整討論本作品議題。結論正確

胡欣

我的名字叫做胡欣，出生於風光明媚的西雅圖，目前就讀於基隆市銘傳國中三年級。家中共有五人，除了爸媽、外婆外，還有一位就讀國小的妹妹。小時候爸爸經常帶我到他的實驗室參觀，所以讓我從小就對爸爸的實驗室充滿了好奇，而爸爸實驗室裡的研究生哥哥姐姐們也常告訴我許多有趣的實驗，並且還教我做一些簡單的實驗。在家人和老師的鼓勵下，我自國二起就參加學校和基隆地區的科展競賽，讓我對科學研究的工作產生濃厚的興趣，更對未來的科學研究工作有著許多的憧憬，希望將來能夠成為一位傑出的科學家。



推著離子跑



中文摘要

在本次實驗中，我們發現溶液中的帶電離子，會因為離子團的熱運動，和電偶極的庫倫吸引力(electric dipole)的交互作用下，使得電解質溶液的 I-V curve(電流-電壓 曲線)，具有類似磁滯曲線(Hysteresis curve)的效果，同時我們運用光學干涉的原理，證實此時在電場作用下，離子團會互相順著電場方向作條列鍵結，而加熱實驗也證實，熱運動會使溶液的 I-V curve(電流-電壓曲線)變的不一樣。

另一方面，我們也發現，在給予電解質溶液一外加的衝擊電壓時，該溶液的電荷分布，則會因為彼此的互相擠壓以及自由擴散的作用下，而形成一震盪分布，其所顯現出來的，則是電壓的震盪變化。

最後由於震盪波紋的變化，在起始時與中段之後有著明顯差異，我們對此變化提出看法和證實，相信內容是精采可期的！

Abstract

In this experiment, with the interaction of the heating action of ionic atmosphere and electric dipole, we find that ionic in the liquor makes the I-V curve in the electrolyte liquor show up with the effect similar to Hysteresis curve. Meanwhile, we practice the principle of interference to prove that at this moment, under the influence of electric field, ionic atmosphere will connect to each other in line following the direction of the electric field. It is also proven that in the heating experiment, heating action will make I-V curve in the liquor different.

On the other hand, we also find with extra electric impact, the charge distribution of the liquor will form a oscillation, that is, the changes of the voltage oscillation under the inter-collision and the free spread.

We offer our viewpoints and proofs about the obvious changes of oscillation wave in their beginning stage and after their middle stage. We believe that the marvelous content is surely worth of your expectation.

推著離子跑

壹、前言

「電磁震盪系統」一直是人們喜好研究的物理現象，它普遍的存在我們週遭的環境中，例如收音機、被動元件，電漿(plasma)、磁玻璃(spin glass)…這類系統所外顯出來的，最常見是電或磁的變動，而我們這次的實驗，則是意外的發現若對電解質溶液施以一衝擊電壓後，會因離子的移動，而使電壓有一奇特的電位振盪的情形出現(如下圖)，令人覺得十分神奇。



未加電壓



外加電壓 20V-2 秒



關閉電壓後 10 秒



關閉電壓後 10 秒



關閉電壓後 20 秒



關閉電壓後 20 秒

另外，我們也發現在電解質溶液中，不僅存在一組（起始和停止）電壓，也就是若對電解質溶液外加一隨時間緩慢變化的電壓時，溶液的 I-V curve 會有類似一「磁滯」的曲線出現（參 1），這些都和我們平時所知不同，於是我們便設計了一系列的實驗以探討其原因。

貳、研究目的

一、研究強電解質溶液在外加電壓下的 I-V curve 以及其形成的原因。

二、研究在上述溶液中，加以衝擊電壓後所形成的電壓振盪模式形成原因。

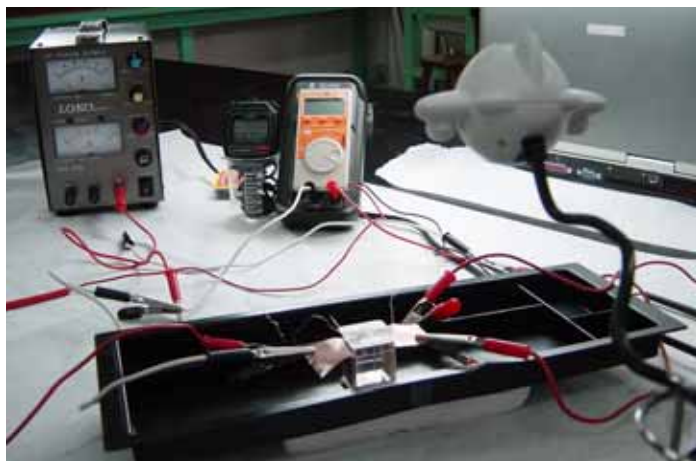
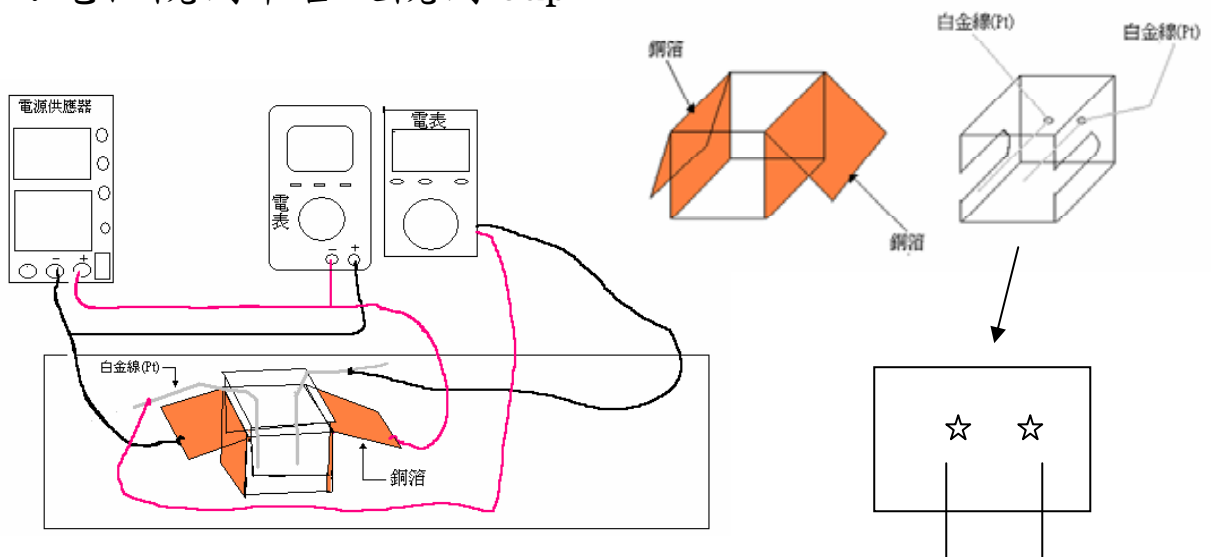
參、研究設備與器材

一、研究設備

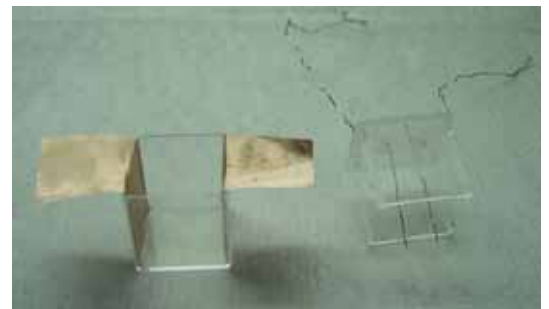
數位相機、數位攝影機、電源供應器、顯微鏡、銅箔、白金線、web cam、數位電表、機械式傳統電表、電腦、雷射筆、冷光燈。

二、觀測平台

1. 電位觀測平台及觀測 cup



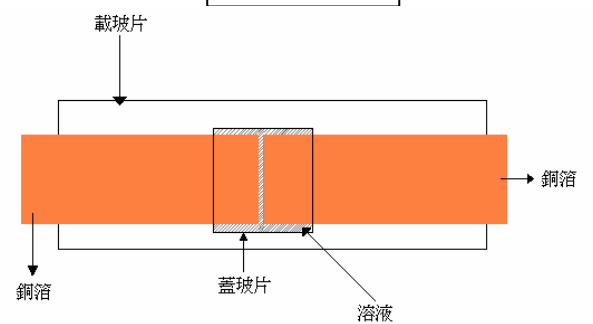
圖一

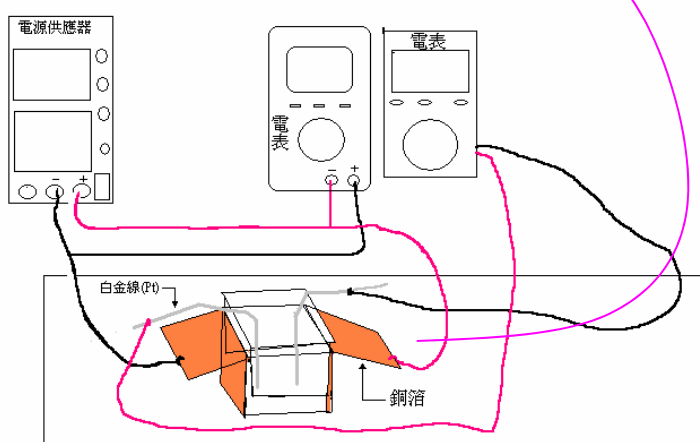
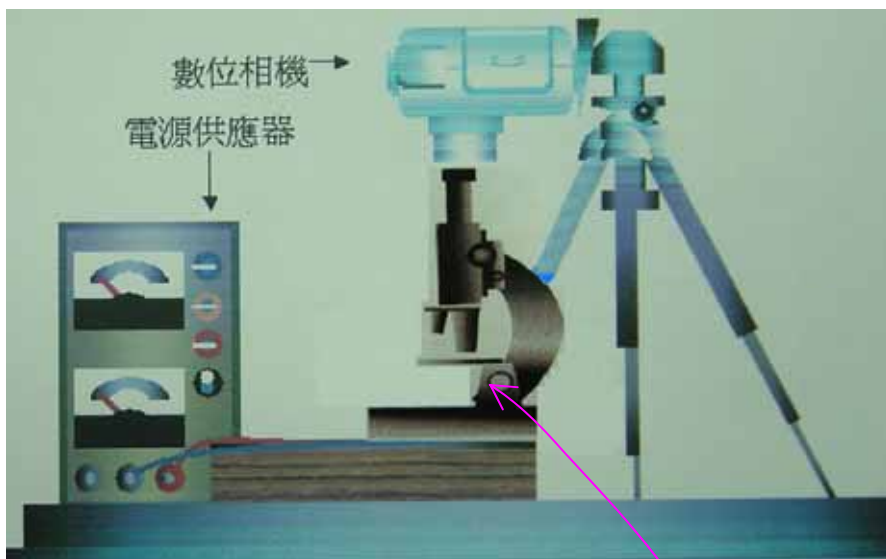


2. 流動觀測平台及觀測片之製作

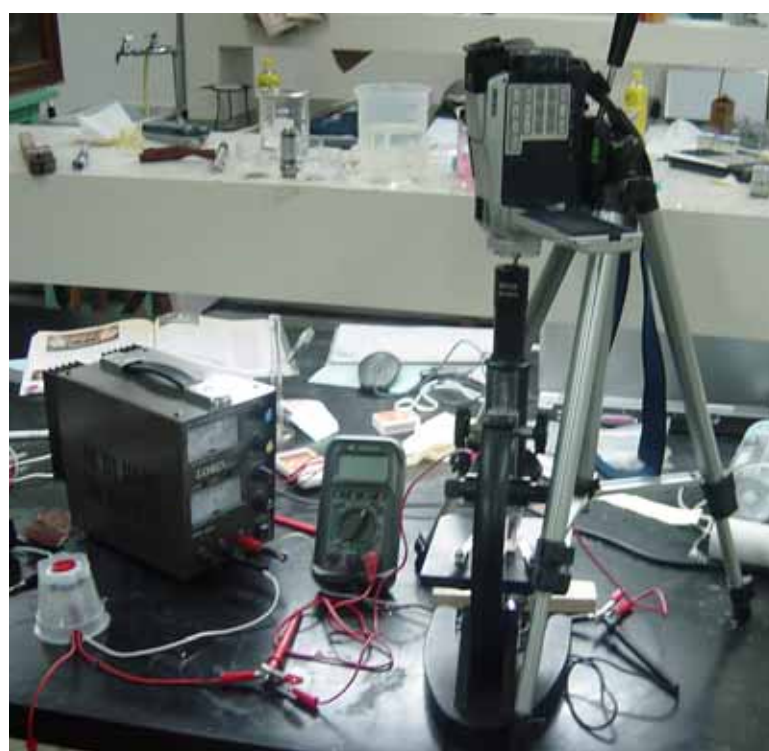


圖二



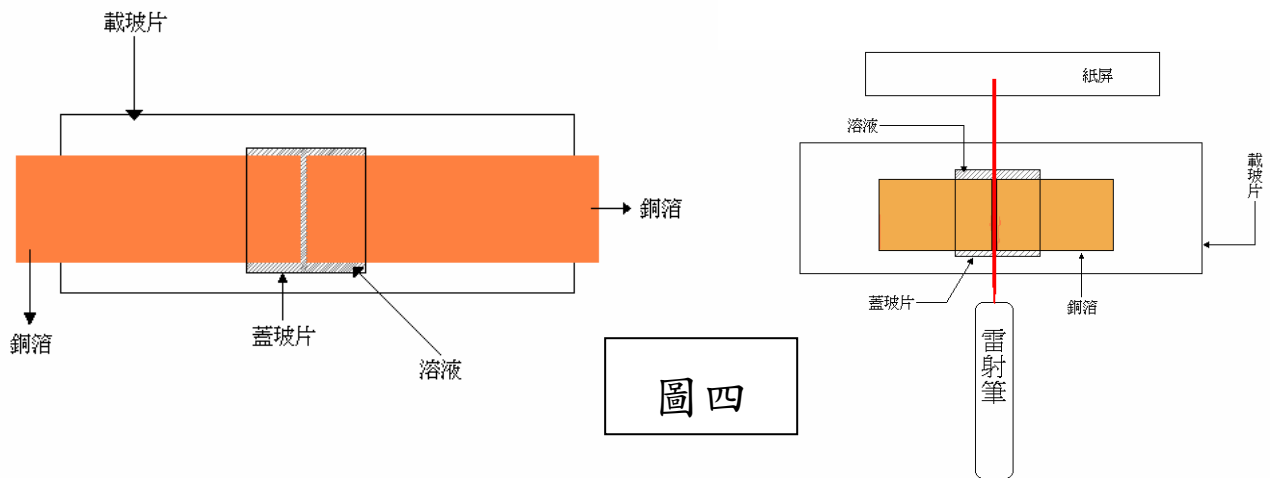


圖三

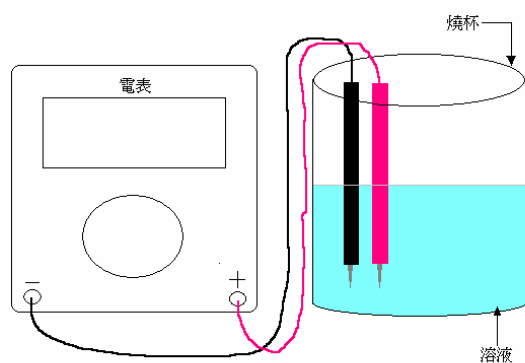


3. 干涉觀測平台

干涉觀測樣品



4. 流動電位測試平台



圖五

三、所用藥品

1. 硝酸鈉- NaNO_3 : 0.1M-1M-2M
2. 氯化鈉- NaCl : 0.1M-1M-2M
3. 硝酸鉀- KNO_3 : 0.1M-1M-2M
4. 氯化氫- HCl : 0.1M-1M-2M

四、電壓的命名

1. 起始電壓： V_i ：是指使二極能開始有反應的電壓
2. 結束電壓： V_f ：是指使二極反應停止的電壓
3. 衝擊電壓： V_{p5} ：是指在二極之間，輸入一大小為

5 伏特的直流電壓，為時 2 秒鐘後，隨即關閉電源。

V_{p10} ：是指在二極之間，輸入一大小為 10 伏特的直流電壓，為時 2 秒鐘後，隨即關閉電源。

V_{p20} ：是指在二極之間，輸入一大小為 20 伏特的直流電壓，為時 2 秒鐘後，隨即關閉電源。

肆、研究過程或方法

實驗一：溶液的 I-V curve 的量測

1. 將 HCl (1M) 置入觀測 cup 中，並置於電位觀測平台上，
如圖一所示。
2. 逐步並緩慢的增加電壓，並記錄其所對應的電流。
3. 一旦銅極上有反應，馬上逐步減少電壓，並記錄其所對
應的電流。
4. 依序改變溶液的濃度、溫度及種類，並重覆步驟 1~3。

實驗二：

1. 將內有 HCl (1M) 的觀測片置於流動觀測平台上，
如圖二所示。
2. 逐步並緩慢的增加電壓，記錄並觀察其所對應的流動
現象。
3. 重新更換內有 HCl (1M) 的觀測片，並置於干涉觀測
平台之上
4. 改變不同的電壓大小，並比較其中的不同

實驗三-A

1. 將 NaCl (1M) 置入觀測 cup 中，並置於電位觀測平台上，如圖一所示。
2. 外加衝擊電壓 (V_{p20}) 後，觀察並記錄其電壓在 10 分鐘之內的變化。
3. 依序改變溶液的濃度及種類，並重複步驟 1~2。

實驗三-B

4. 將 NaCl (1M) 置入觀測 cup 中，加入極微量的奈米級二氧化鈦粉末作為標示物後，置於流動觀測平台上，觀察並記錄其流動變化。
5. 外加衝擊電壓 (V_{p20})，觀察並記錄其流動在 10 分鐘之內的變化。
6. 將各電解質溶液置於流動電位測試平台上，測量並紀錄各電解質溶液在流動下的電壓變化。

實驗四

1. 在實驗三-A 中改變外加衝擊電壓 (V_{p20}) 為 (V_{p10}) 及 (V_{p5})，觀察並記錄其電壓在 10 分鐘之內的變化。

伍、實驗結果

一、在實驗一中

1. 我們將各組的 I-V curve 繪製如下圖 6，顯然的，在此三種不同的電解質溶液中皆存在有類似磁滯曲線

(Hysteresis curve)的效果出現

2. 由不同的電解質物質具有不同的 I-V curve 推論

A. 起始電壓 V_i 的不同，是由於導電度不同所引起的，

(越容易導電者越快達到起始電壓)(參 2)：

莫耳導電度 $\Rightarrow H^+ > Na^+$ ， $Cl^- \doteq NO_3^-$

B. 結束電壓 V_f 的不同，是由於各離子在電場下的鍵結

強度不同所造成的，顯然

的，HCl 仍是最強，而

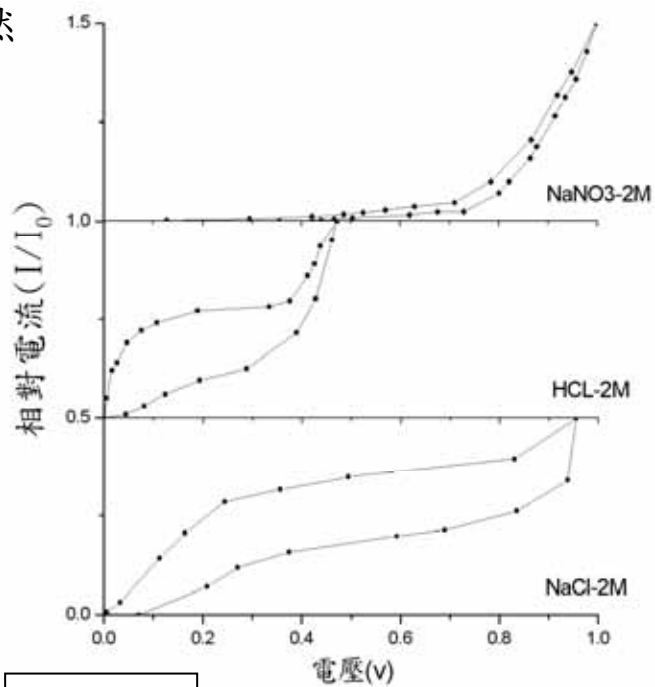
硝酸根因為是原子團

(須轉動後才能找到

正確的鍵結位置)，

所以一受到熱擾動就

容易被破壞。



圖六

3. 由下圖 7 可以看出，如果溶液的濃度增高，其 I-V curve 所造成的迴圈，會明顯的往左方移動，顯然起始電壓 V_i 和結束電壓 V_f 的大小，會隨著導電粒子的數目增加而增加。

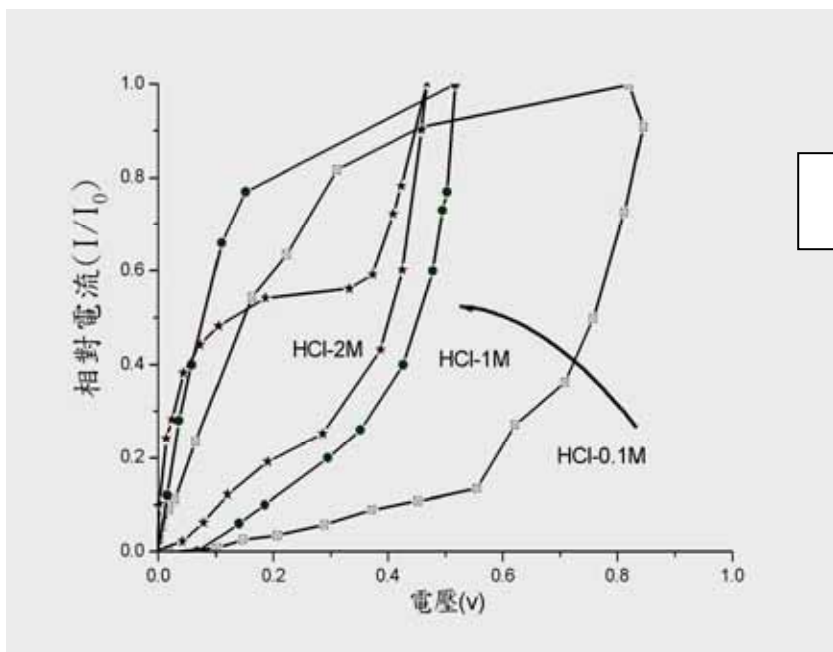
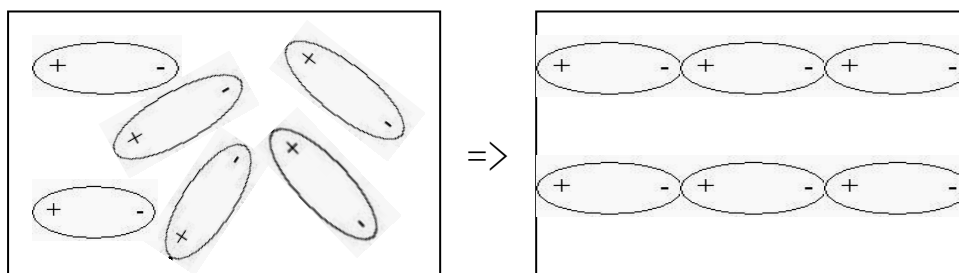


圖 7

4. 為何會有迴圈式的 I-V curve 出現呢？在不斷的推理和實驗驗證後，我們認為是因為在 $0V \rightarrow$ 起始電壓 V_i 之間，離子雖然會因電極吸引而移動，但它需要克服熱運動的影響，才能互相集結，而形成一暫穩態的通道（如下圖）。



$0V \rightarrow$ 起始電壓 V_i

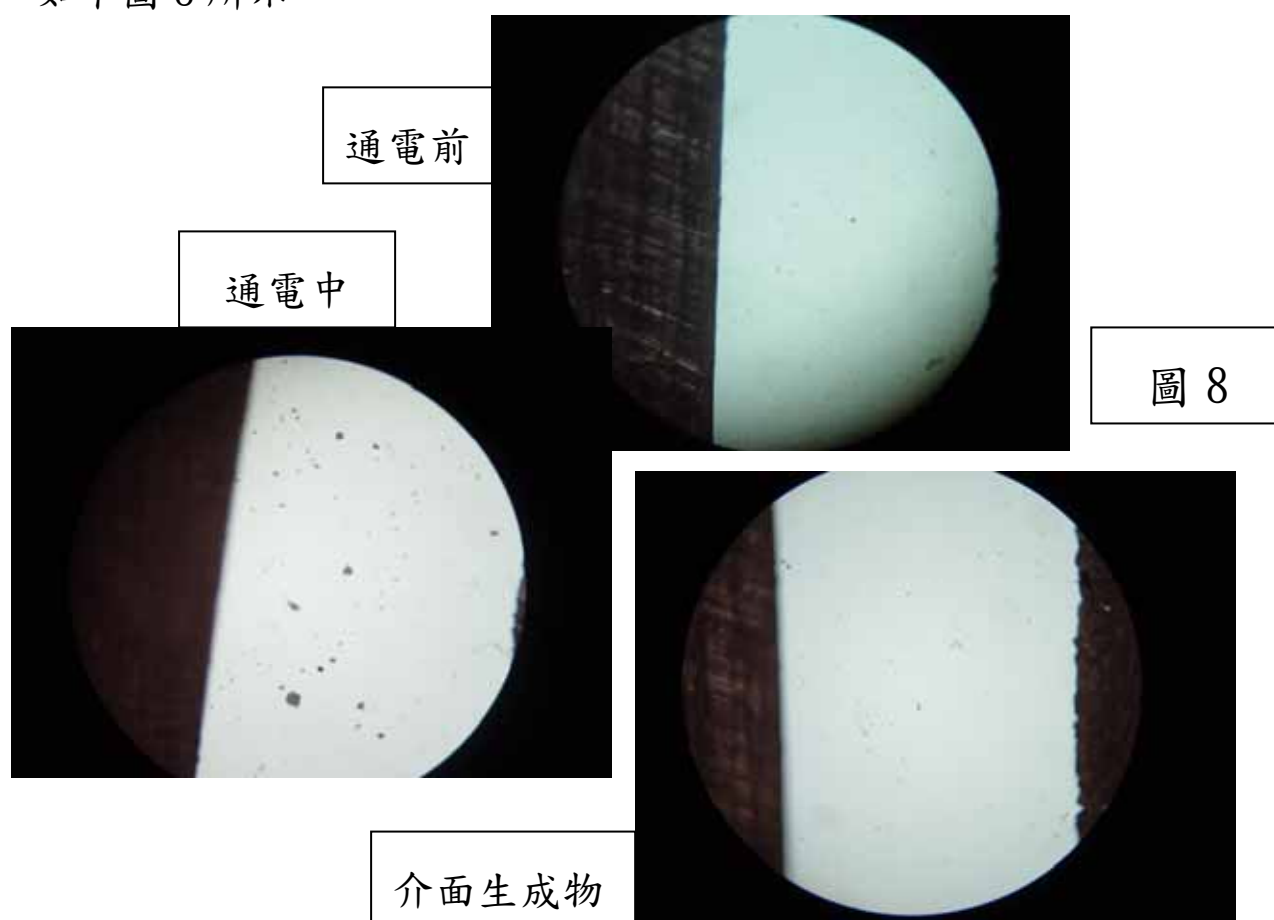
起始電壓 V_i

5. 而由起始電壓→結束電壓的部分，則是因為一旦所謂暫穩態的通道形成後，帶電粒子因多了一份庫倫吸引力，能使得暫穩態的通道能多克服一些熱運動的破壞

二、為了驗證以上的推論，於是我們設計了以下實驗：

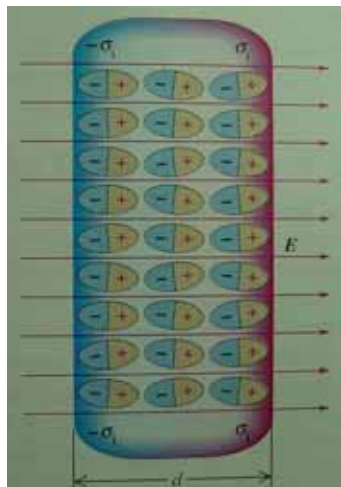
1. 在觀測玻片上通以微量電壓時（小於起始電壓），我們發現，作為標示用的二氧化鈦顆粒，並不是以我們所預期一般、朝向二極前進，原因應該是在銅箔表面，因帶離子的佔據，使得較大顆的二氧化鈦顆粒（行動較慢）無法吸附其上，

如下圖 8 所示

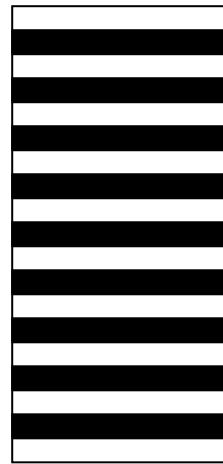


三、將電壓增加至起始電壓的過程中，並無法看到有暫穩態的通道條列出現（如上圖 8），其原因應該是我們用的顯微鏡的倍率太小了（600~900 倍）。

四、於是我們改用繞射的方式，想要「看到」暫穩態的條列通道（如下圖所示）。



=>



暫穩態的通道條列的想像圖

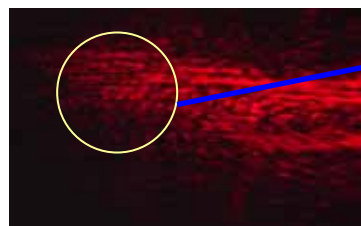
想像會得到的繞射圖

五、顯然的，隨著外加電壓的增加，其繞射條紋越明顯（如下圖 9、10 所示），而且電壓一旦停止，其繞射條紋則自動消失。



通電前

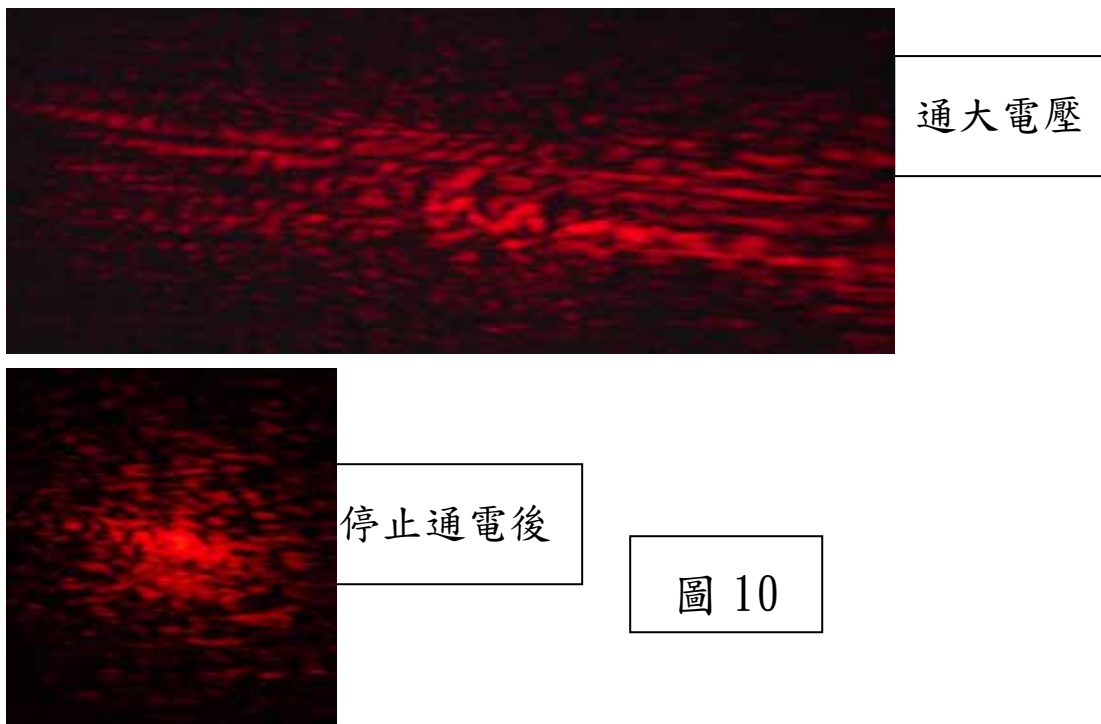
=>



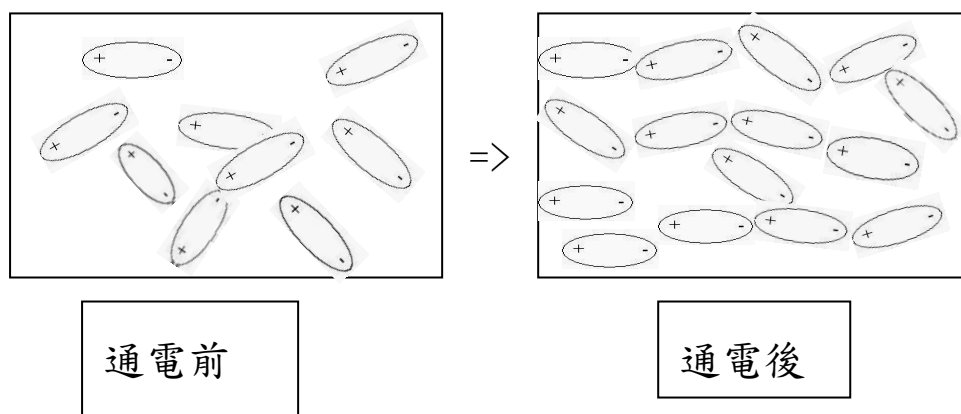
通小電壓



圖 9



六、由繞射圖片（上圖）上，一直很明顯的重疊斑判斷，顯示其暫穩態的條列通道間隙，並不是一規律排列的分布（參 3），其分布猜想圖如下圖所示。



三、

1. 在實驗三中，我們驚訝的發現若給予溶液一個衝擊後，其溶液內部會形成一具振盪形式的電壓差，如下圖 11

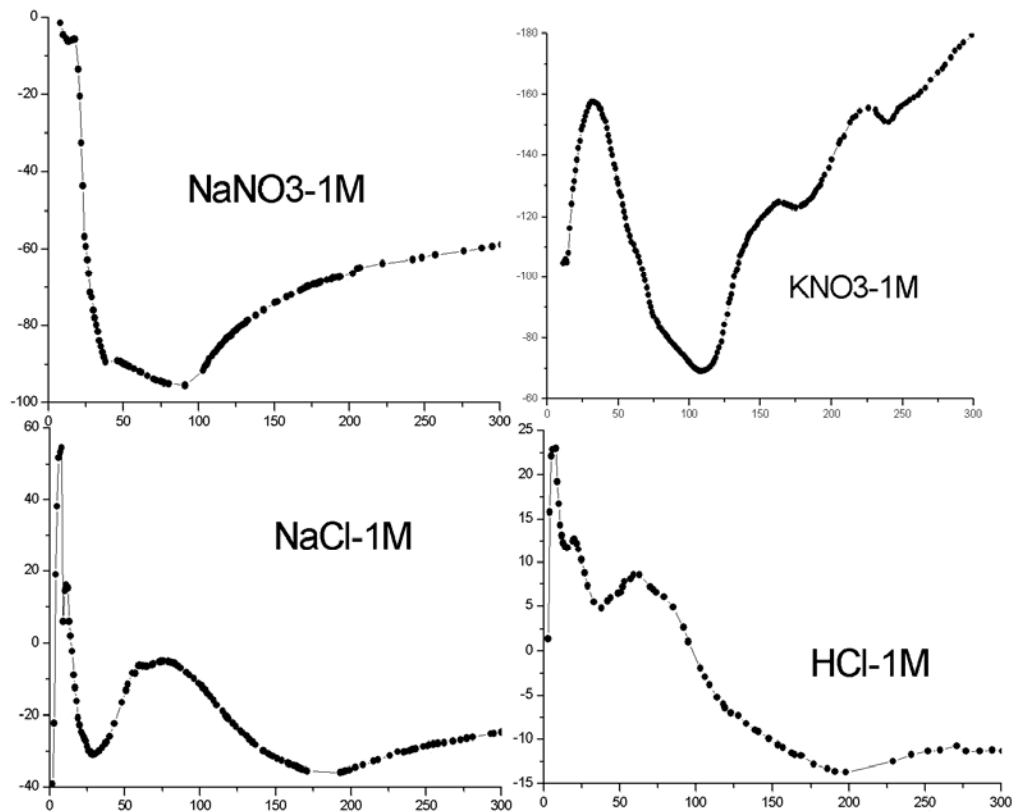


圖 11

2. 經過比較發現，不同種類的溶液，其在固定時間內的振盪次數是和離子導電度有關，離子導電度越大，則振盪次數越多。

3. 比較不同濃度的振盪，我們可以發現，濃度越大則震盪圖形的阻尼越明顯，而濃度越小，則小振盪越多。但 NaCl(0.1M)

的小振盪的振幅較不明顯，如下圖 12、13 所示。

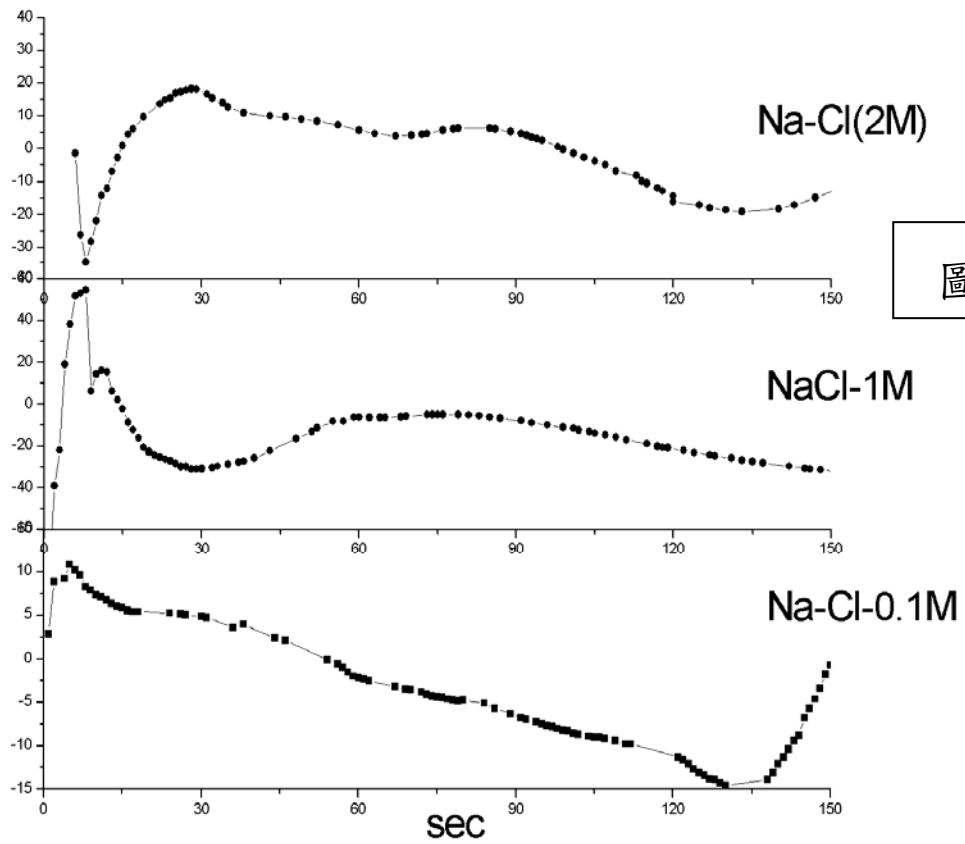


圖 12

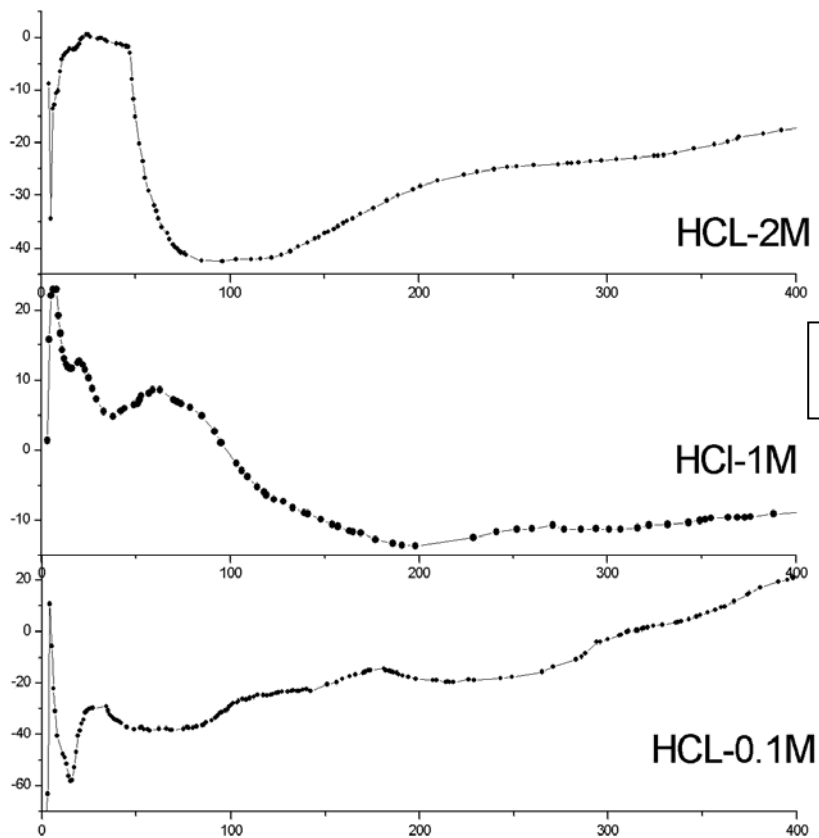


圖 13

4. 在實驗 3-b 我們可以看到（下圖 14、15），在一 3D 的溶液分布中，隨時存在有流動現象中，中層（流速較快）和底層（流速較慢）的方向大致相反，這符合對流說法。但表面則維持不動，這應該是表面張力的作用所影響。

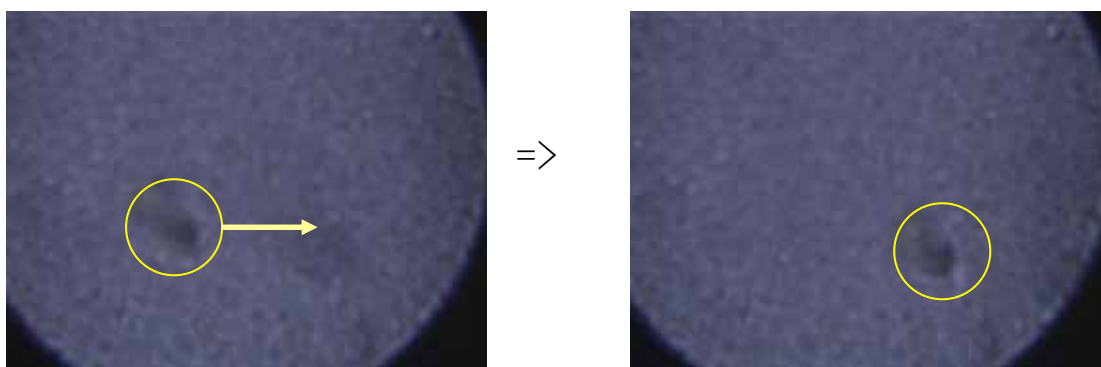


圖 14--中層（流速較快）

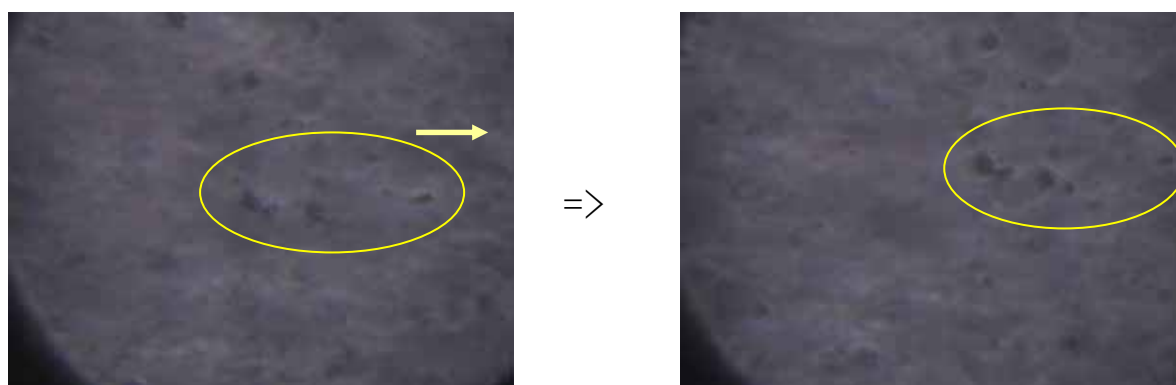


圖 15—底層（流速較慢）

5. 我們也在實驗 3-B 中發現，液體除了會有上下、左右、前後等 3 個自由度的運動外，亦有轉動及振動的情形。
6. 溶液一但受到電壓衝擊，則流速會大增，顯然二者互有關聯，不過我們不能確定液體流向和電位差的增減有關，因為我們不清楚離子是在哪一層游動。
7. 令人驚訝的是，在流動電壓的測試中（下圖 16），發現電解液的流動並不為產生電壓差，那令人不解的是，究竟上述所說的電壓震盪究竟是何原因產生的！

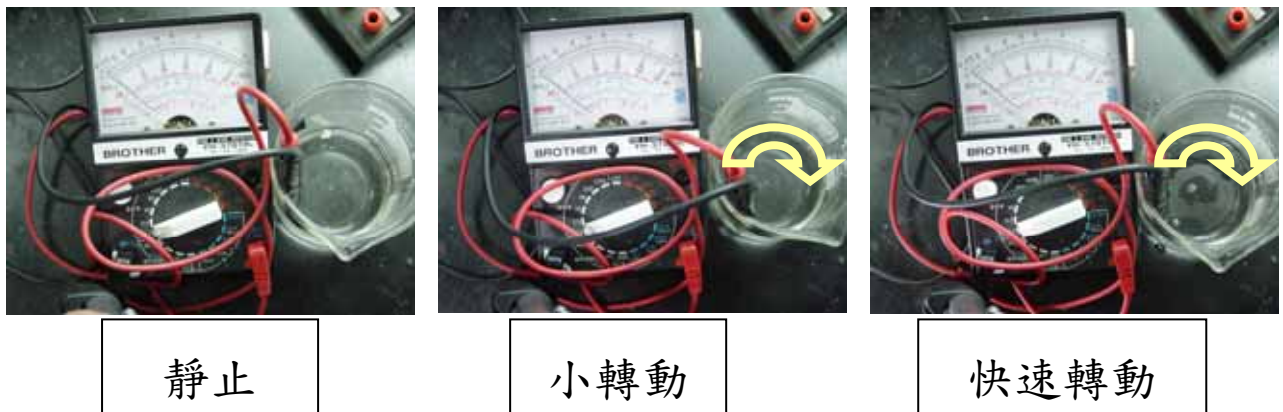


圖 16

四、

1. 在實驗四中，我們發現上述的電壓振盪，可用 damped oscillation 的運動來簡單說明，而且由改變衝擊電壓所得的

圖形，即可證實。(如下圖 17)

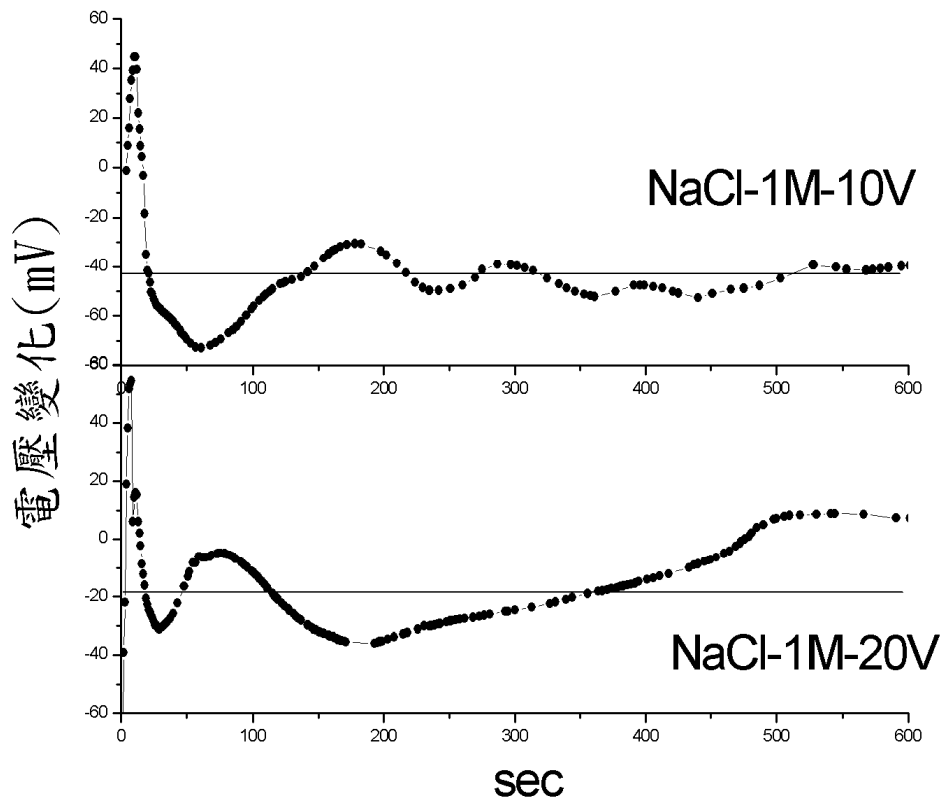


圖 17

2. 同樣的，在資料整理後，我們發現，若電解液的濃度較低時，其振盪電壓會在較長時間後，逐步攀升(如下圖 18)，但這樣的情形並不出現在 NaCl 的溶液中，而且此發現正符合我們在後續討論中所提出的“遲走波紋”的概念。

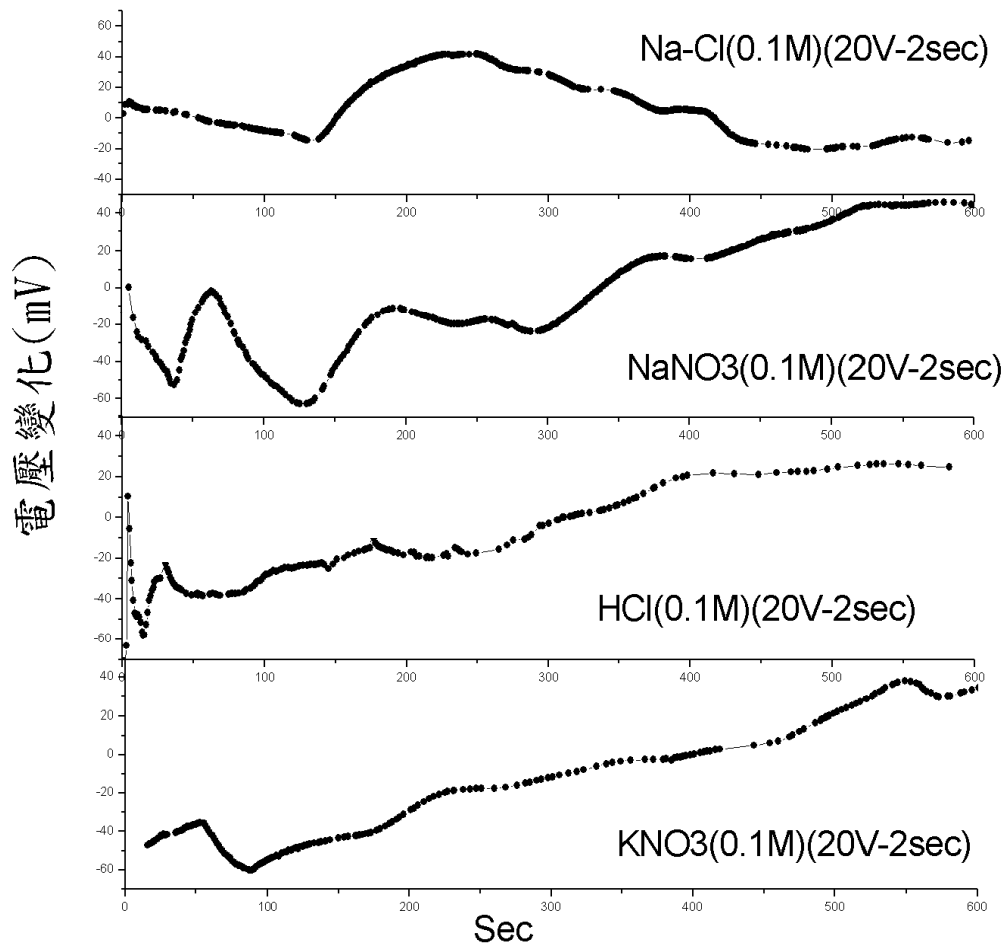


圖 18

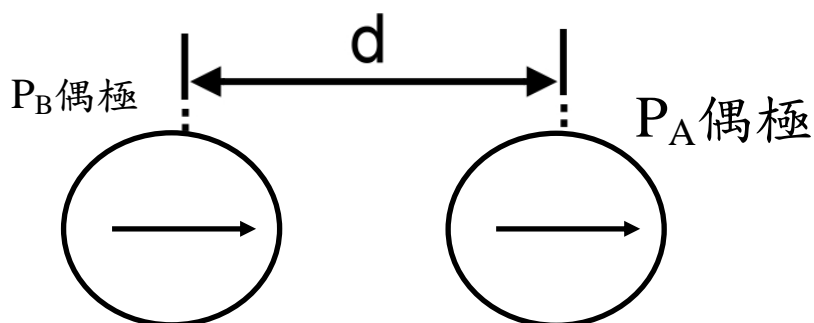
陸、討論

- 一、 在實驗一中，我們發現在量測“0→起始電壓”這段的電流時，常有在短暫平衡後，電流又會緩緩下降的情形。其原因應該是：在這段期間內，其暫穩態通道的結構並不結實，很容易受熱運動而分開。
- 二、 暫穩態通道的鍵結說明〈以 HCl 為例〉
- 三、 由於 H^+ 及 Cl^- 的強庫侖力，使得他們溶於水中後，會和

H₂O 形成水合分子，也因此確定H⁺及Cl⁻是以離子態存在水中，而非溶於水中。

四、 我們以二分子的彼此間距的能量，繪圖於下發現：因鍵結後和鍵結前的能量度不同，導致起始電壓及結束電壓的產生，說明如下（參 4）：

若只考慮二分子的結合關係



A：P_A偶極在V_i前的一剎那：由於未鍵結，故自由度有 3（前後、左右、上下），E=3KT

故總能 = U（偶極電位能；說明如下）+ E（=3KT）

$$=-2 \varepsilon_d + 3KT \Rightarrow \varepsilon_d = 3KT/2$$

B：P_A偶極是在V_f前的一剎那：由於已鍵結，自由度有 2（左右、上下），E=2KT

故總能 = U（偶極電位能；說明如下）+ E（=2KT）

$$=-2 \varepsilon_d + 2KT \Rightarrow \varepsilon_d = KT$$

能量差 = KT/2

至於 dipole 位能 = $\frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{m^2}{d^3}\right)$

由參考資料 4 可知(SI 制)

$$\begin{aligned} U_{dipole-dipole} &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r^3}\right) [p_1 \cdot p_2 - 3(p_1 \cdot \hat{r})(p_2 \cdot \hat{r})] \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r^3}\right) [p^2 - 3p^2 \cos\theta] \quad (\text{若 } p_1 = p_2) \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{p^2}{r^3}\right) [1 - 3\cos\theta] \end{aligned}$$

但 $\ominus \xrightarrow{\theta=0} \ominus$ 因此 $\cos\theta=1$

故

$$U_{dipole-dipole} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{P^2}{r^3}\right) (-2)$$

$$\text{若令 } \epsilon_d = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{P^2}{r^3}\right)$$

則 $\ominus \xrightarrow{d} \ominus$ 之偶極位能為 $-2 \epsilon_d$

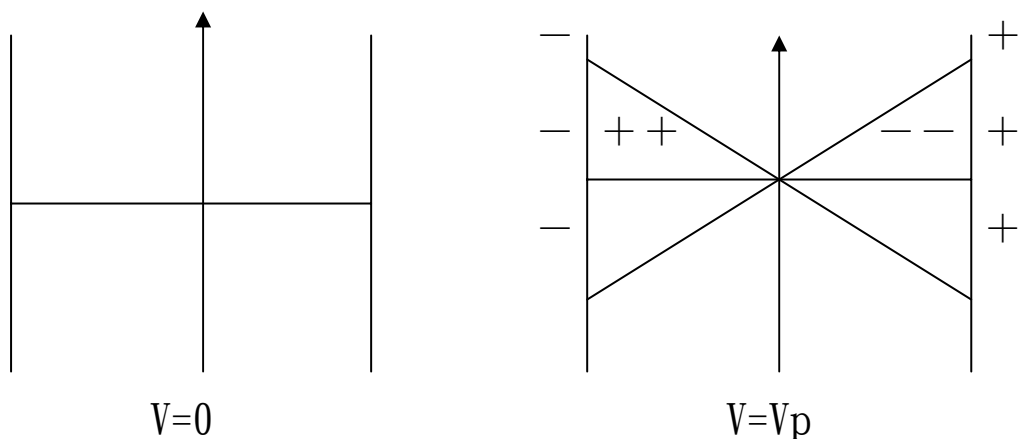
因此，若溶液的溫度增高，則 I-V curve 將往右偏移，和我們的實驗結果一致。

三、在實驗三中

1. 我們發現溶液在經過衝擊後電極之後會出現一特殊的電壓震盪情形，就好像正負離子各被吸引一邊後，直接衝刺到對方電極一般，而不是我們所熟知因濃度差而進行緩慢的擴散運動，這樣的結果令人百思不得其解。
2. 我們作了很多假設，都沒有辦法適當的解釋，直到我們在做流動電位的觀測時，發現液體會因外加電壓而流動，但液體的流動又不會造成電壓的改變，於是我們推論，是外加電壓→離子移動→推動液體→推動離子
3. 依此推論，在電壓較大時，會吸附較多的離子，使得將來撞擊時，阻力較大（意為阻尼較大）。反之，則阻尼較小，而此推論，由圖 17 可獲得證實。

證明如下：

甲、 當施加衝擊電壓時，離子分布如下：



乙、 由於兩側的離子互相互吸，以及同電荷的離子互相推擠，使得二側的溶液受到推動，使得振盪初期為較激烈的交互作用。

丙、 離子在經過較長時間的行進後，由於速度較快的離子已跑了很長的間距，能量耗數較多（參 5），因此速度較慢的離子，而成為影響電壓的主要因素，我們稱此波為「遲走波紋」，而此推論可由圖 18 得到證實，至於 NaCl 部分，則是因二者的速率接近（電導率），故影響較小。

七、結論

甲、 由於電解質離子在溶液中，一般都會因強庫侖力而和水結合成水離子，也因此，在電場下會產生電偶極的情形，而且，由於能量均分的影響，當這些 dipole 還是分散的時候，我們就必須給予較多的電壓，使其能排列成序，但，一旦他們排列成序，則只須要較少電力就能維持，也因此而造成其 I—V 曲線有”磁滯曲線”的效果。

乙、 這次我們所發現，在電解質溶液中所存在的電壓振盪情形的形成原因有 2 個，其一是同類離子互

相推擠（因外加衝擊電壓）而互相斥開，其二，則是正負離子的庫侖作用力，提供了系統一個恢復力。

丙、另外，我們亦發現有”遲走波紋”的現象發生，其原因則是因為正負離子的傳導速率不同，因此，當較快的離子（一般而言是正離子），因長距離奔跑而減弱時，較慢的離子還在緩緩前進，因此造成較後段的振盪圖形中，常只見偏向一邊的電壓路徑。

捌、應用與展望

隨著知識的日積月累，科技的日新月新，物理的研究範圍也一日比一日更加廣闊。在物理範疇中，離子在溶液中的運動是一複雜且龐大的系統，期望我們在此次實驗中所發現的新現象，能是開啟此系統中更深奧或尚未被探索的部分的一把金鑰匙，引領我們持續不斷地去探索物理世界的精髓與奧妙之處。

九、參考資料

- (一) Charles Kittel “Introduction to Solid State Physics” Sixth Edition, 士華圖書
- (二) 物理化學(郭冠麟等合譯/學富文化事業/2000年1月)
- (三) 近代光學(李冠卿/聯經出版社)民77初版
- (四) David J.Griffiths “Introduction to Electrodynamics” Second Edition, Prentice-Hall International , Inc.
- (五) 物理(蔡文仁總審訂/大揚出版社)民88