

第八屆旺宏科學獎 成果報告書

參賽編號：SA8-349

作品名稱：簡易測量電子電量-「Antibubble-drop experiment」

姓名：楊晉瑜

關鍵字：反氣泡、電場、油滴實驗

簡易測量電子電量-「Antibubble-drop experiment」

目錄

壹、研究動機

貳、研究目的

參、研究設備及材料

肆、文獻探討

伍、實驗步驟

陸、結果與討論

柒、結論

捌、參考資料

摘要

本研究第一部份是製備反氣泡 (antibubble)，利用陰離子界面活性劑 ($C_{12}H_{25}C_6H_4SO_3Na$) 溶液滴入清水中，並藉著添加氯化鈉、聚乙烯醇、丙三醇等物質，並改變其含量，調配出溶液，再探討添加物比例含量對反氣泡穩定度的影響，找出製備穩定反氣泡的最佳條件。

老師曾經介紹 1923 年諾貝爾物理獎密立坎 (Robert A. Millikan) 所設計的油滴實驗 (oil-drop experiment)，利用帶電油滴在電場中的運動情形，測量出電子基本帶電量。我們突發奇想，我們製備的反氣泡是否可取代密立坎的油滴呢？因此我們設計了第二部份的實驗，利用自製平行電板，並外加電場，再滴入反氣泡，探討外加電場對反氣泡在水中下落速度變化情形，再推導出反氣泡的帶電量，改變電場方向是加速還是減速呢？而反氣泡的體積是否與反氣泡的帶電量有關？



圖一 自製反氣泡

壹、研究動機

吹肥皂泡泡是每一個人童年的快樂時光。在公園草地上吹泡泡，看著一個個五彩繽紛的圓球，隨著微風飄舞、遠離。泡泡既完美又脆弱的特質，和泡膜上反射出的斑斕色彩，都令人深深著迷。如今已是個高中生，在遠哲科學競賽中又得以重溫舊夢。“反氣泡”這個名詞是我們在遠哲科學趣味競賽才認識，氣泡與反氣泡有異曲同工之妙，起初我們每個人都只是基於想要得到遠哲科學競賽的獎項，而對反氣泡這個實驗做了一些小研究。在一些瑣碎的討論中，我們漸漸發現，如果改變一些變因，在不同的環境下，或許反氣泡會因此得到不一樣的結果。由於我們一開始只有改變反氣泡組成成分的“量”，因此反氣泡的結果大同小異。後來得到了老師的建議，並且閱讀了許許多多的相關資料後，我們試了不同的材料，有了許許多多有趣的結果。

貳、研究目的

(一) 討論影響反氣泡形成、破裂的因素，如：

1. NaCl 的濃度
2. 陰離子界面活性劑 ($C_{12}H_{25}C_6H_4SO_3Na$) 的濃度
3. 聚乙烯醇的濃度

(二) 探討外加電場對反氣泡降落速率的影響，並以油滴實驗的概念為基礎，利用陰離子界面活性劑所形成的反氣泡取代油滴，來測出電子的基本電量。

參、 研究設備及材料

- | | |
|---|-----------------|
| (一) 燒杯 | 1000ml、250ml 各一 |
| (二) 玻棒 | 一支 |
| (三) 塑膠滴管 | 數支 |
| (四) 玻璃試管 | 數支 |
| (五) 量筒 | 數個(10ml) |
| (六) 15V 電源供應器 | 一組 |
| (七) 500V 電源供應器 | 一組 |
| (八) 自製平行電板(如圖二) | 一組(高：22.5cm) |
| (九) 研鉢、杵 | 一組 |
| (十) 磁石攪拌器 | 一組 |
| (十一) 電子天秤 | 一組 |
| (十二) 數位攝影機 | 一組 |
| (十三) 氯化鈉(NaCl)、聚乙烯醇(膠水)、丙三醇、十二烷基苯磺酸鈉 ($C_{12}H_{25}C_6H_4SO_3Na$ 、陰離子界面性劑)、中性離子界面活性劑 | |



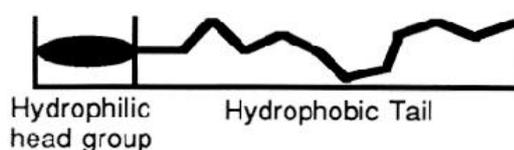
圖二 自製平行電板

肆、文獻探討

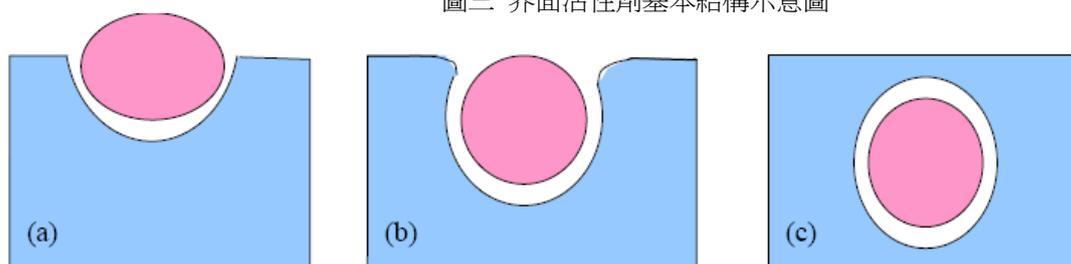
一、反氣泡原理

空氣中的氣泡把它戳破時，可以看到液滴掉落地面，那是因為一般的氣泡壁是液體形成的薄膜，膜的內外都是空氣。只要所受的浮力大於氣泡的重力，則氣泡可以在空氣中向上飄，反之則向下降落。若氣泡形成於液體內，它也可以因浮力與重力的淨值為浮力或重力而上升或下降嗎？當然可以。一般水中常見的氣泡之四周都是液體，內部則全都是氣體，它不但戳不破而且受到的淨力為浮力，所以只升不降，上升時體積還會逐漸增大呢。如果讓氣泡包裹著密度大於水的液體放入水中，則這個氣泡便有可能因重力大於浮力而只降不升或重力小於浮力而只升不降。這種薄膜為氣體、內部包液體的氣泡與常見內包氣體、外面是液體的氣泡不同，它只能存在於液體內，我們稱之為反氣泡 (Antibubbles)。

如果把濃度適當的界面活性劑 (Surfactant) 液體滴進清水中，常可看到反氣泡的形成。其原因要從界面活性劑分子特性談起，一個界面活性劑的分子有兩端，如圖三，分別以頭尾稱之，頭的部份是遇到水時，會往水那邊靠過去的有極性之「親水基」(Hydrophilic group)，如： COO^- ； SO_3^- ； SO_4^- ； $(\text{OC}_2\text{H}_4)_n$ ； R_3N^+ 等，尾的部份則是一條長長不喜歡水而比較喜歡油的非極性之「疏水基」(Hydrophobic group)，如親油性的碳氫化合物就是。因此界面活性劑既喜歡油性也喜歡水性，所以是一種兩性分子。人類最早使用的界面活性劑俗稱肥皂，其化學簡式為 RCOOM (R：長鏈烷基，M：鹼鹽)。當界面活性劑液體滴入水面的瞬間，由於水的表面張力作用，液體就好像我們跳彈簧床一樣，會被向上反彈一微小高度而不立即與水分子結合，所以當它再度落下時而會將介於兩者間的空氣層擠入水中，形成了包著界面活性劑溶液的反氣泡，順序如圖四所示之(a)(b)(c)的順序。



圖三 界面活性劑基本結構示意圖

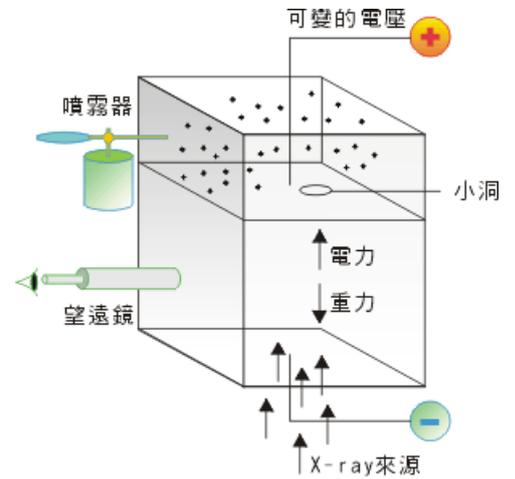


圖四 反氣泡形成示意圖

二、油滴實驗(oil-drop experiment)

美國物理學家密立坎 (Robert A. Millikan) 於 1909 年進行油滴實驗，求出電子所帶的電荷 e 值，因此於 1923 年獲得諾貝爾物理學獎。

油滴實驗的裝置如圖五，是在兩塊水平方式平行排列的金屬板通電，使上下極板成為正負極，以建立一個均勻電場。金屬板上有小孔，利用噴霧器在金屬板上方噴出細小油滴（如丙三醇），這些油滴從金屬板的小孔落下時，吸附由 X-射線照射兩極間之氣體所產生的氣態陽離子或自由電子，使油滴帶正電荷或負電荷。帶電的油滴在兩金屬板間受到靜電力、重力、空氣阻力、浮力作用，當作用力達成平衡狀態時，油滴靜止懸浮或做等速運動。以靜止狀態為例，



圖五 密立坎油滴實驗示意圖

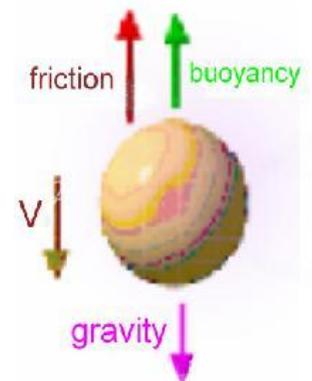
油滴所受的向上的靜電力量值等於向下的地心引力(重力)量值

$$\therefore \text{靜電力} = \text{電場強度}(E) \times \text{電荷量}(Q)$$

$$\text{重力} = \text{質量}(m) \times \text{重力場強度}(g)$$

$$\text{故 } E \times Q = mg \quad , \quad Q = mg/E$$

因為重力 mg 已由實驗得知，電場強度 E 可由施於兩極板間的電壓求出 ($E = \text{電壓 } V / \text{平行板距 } d$)。故油滴所帶的電荷量 Q 即可測得。重複進行實驗後，密立坎發現每次油滴電荷量皆為 1.5924×10^{-19} 庫侖(到 2006 年為止，已知基本電荷值為 $1.60217653 \times 10^{-19}$ 庫侖) 的整數倍，因此認定此數值為單一電子的電荷量。



圖六 未加電場反氣泡受力情形

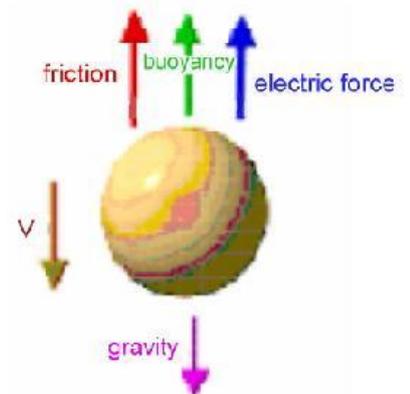
三、實驗原理

假設未外加電場時，一顆反氣泡的質量為 m ，受重力 mg 而落下，水浮力及黏滯力作用其上，反氣泡所受的總合力為 $\vec{F} = m\vec{g} + \vec{f}_f + \vec{f}_B$ (式一)，如圖六所示。 \vec{f}_f 為摩擦力，與運動方向相反，且大小正比於反氣泡運動速度， $\vec{f}_f = -k\vec{v}$ ； \vec{f}_B 為水浮力，方向一直是與重力反向。若以向地心方向為正，則(式一)可寫成純量式 $F = mg - kv - f_B$ 。當作用於反氣泡的總合力為零時，反氣泡會以終端速度 $V_0 = \frac{mg - f_B}{k}$ 的等速運動。

若在兩平行板間加電壓，使之產生一平行電場，則此時反氣泡所受的總合力為 $\vec{F} = Q\vec{E} + m\vec{g} + \vec{f}_f + \vec{f}_B$ 。若反氣泡仍向下運動，則 $F = mg - kv - f_B - QE$ (式二)，如圖七所示。若電場致使反氣泡向上運動，則 $F = mg + kv - f_B - QE$ (式三)。

當作用於反氣泡上的合力為零時，且油滴向上以終端速度運動，則其終端速度 $V = \frac{f_B + QE - mg}{k}$ 。故測量 V_0 、 V (反氣泡所經過

的距離除以所需的時間)，和 $E = \frac{\text{電壓}}{\text{平行板距}} = \frac{V}{d}$ 。



圖七 外加電場反氣泡受力情形

水浮力和體積有關，由 Stoke's Law 知道，一個半徑為 r 的球體，在黏滯係數為 η 的介質中運動，其所受的黏滯力為 $6\pi r \eta v$ ，其中 v 為球體相對於介質的速度。無

外加電場、合力為零，黏滯力 $f = mg - f_B$ 。半徑為 r 的球， $f_B = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_0 g$ ， ρ_0 為水密度 $= 1.0 \text{ g-cm}^3$ ，水的黏度係數為 10.05×10^{-3} ，總合力 $f = mg - f_B = \frac{4}{3}\pi r^3 (\rho - \rho_0)g = 6\pi\eta V_s$ ， ρ 為反氣泡的密度。

因此，假設反氣泡受電場作用後為等速度運動，則反氣泡所受的力：

重力=電力+摩擦力(浮力)

推得以下公式：

$$\frac{4\pi r^3}{3}(\rho - \rho_0)g = Q \times \frac{V}{d} + 6\pi\eta r V_s$$

$$\Rightarrow Q \times \frac{V}{d} = \frac{4\pi r^3}{3}(\rho - \rho_0)g - 6\pi\eta r V_s$$

將實際數據代入後，此式可改為：

$$Q \times \frac{15}{22.5 \times 10^{-2}} = \frac{4}{3} \times \pi \times (R_{\text{外}})^3 \times 0.35 \times 10^{-5} \times 9.8 - 6\pi \times 10.05 \times 10^{-8} \times R_{\text{外}} \times V_s$$

$$\Rightarrow Q \times \frac{15}{22.5} = 1.07702 \times (R_{\text{外}})^3 \times 10^{-5} - 1.89342 \times 10^{-8} \times R_{\text{外}} \times V_s$$

註： r 為反氣泡外半徑(cm)， $(\rho - \rho_0)$ 為密度差(g/cm^3)， Q 為帶電量(庫倫)， V 為電壓(V)， d 為平行電板板距(cm)， V_s 為開電場後速度(cm/s)

以上的複雜式子經過我們的計算後可得以下簡化的式子

$$Q = \frac{[1.07702 \times (R_{\text{外}})^3 \times 10^{-5} - 1.89342 \times 10^{-8} \times R_{\text{外}} \times V_s] \times 22.5}{15}$$

由實驗測量 Q 值，且帶電量的多寡是為一基本單位電荷的整數倍，即 $Q = ne$ 。

伍、實驗步驟

一、界面活性劑溶液的配製

- (一) 使用電子天秤秤取氯化鈉 3.5 克(g)。
- (二) 使用電子天秤秤取陰離子型界面活性劑 0.436 克(g)，約 1.25×10^{-3} mole。
- (三) 使用量筒量取丙三醇 1 毫升(ml)。
- (四) 使用量筒量取聚乙烯醇 1 毫升(ml)。
- (五) 將以上四項物品加入至燒杯並加水至 250 毫升(ml)，利用磁石攪拌器攪拌溶液至溶液完全混合，最後可得到 0.005M 的 $\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{C}_6\text{H}_4\text{SO}_3\text{Na}$ 溶液。

二、探究產生穩定反氣泡的界面活性劑溶液組成條件：

首先，我們先觀察反氣泡在改變不同成分及含量比例，探討其形成的成功率及穩定度，所以一開始實驗設計，我們將界面活性劑、氯化鈉、聚乙烯醇分別用不同比例來製作反氣泡，測試何種比例穩定度最高，找出界面活性劑溶液組成的最佳條件。

我們將配置好的實驗液由同一個人，在相同的環境下每次滴 100 滴，反覆多次，測量其成功次數，經平均後即為成功率。(形成率之計算以反氣泡成功降落至瓶底為標準)

(一) 改變界面活性劑的量

表一 界面活性劑的濃度對反氣泡成功率的影响

界面活性劑重量(g)	界面活性劑體積莫耳濃度 (M=mole/L)	氯化鈉 (g)	聚乙烯醇 (ml)	丙三醇 (ml)	成功率
0.358	0.004	3.5	1	1	13%
0.436	0.005	3.5	1	1	18%
0.523	0.006	3.5	1	1	15%
0.610	0.007	3.5	1	1	14%
0.697	0.008	3.5	1	1	10%

此實驗的控制變因：氯化鈉、聚乙烯醇、丙三醇的量

操縱變因：界面活性劑的量

應變變因：形成反氣泡的成功率

我們使用的陰離子性界面活性劑為十二烷基苯磺酸鈉 (Dodecylbenzene Sulfonic Acid Sodium Salt, $C_{12}H_{25}C_6H_4SO_3Na$, 分子量: 348.5), 其臨界微胞濃度(critical micellar concentration)為 $1.5 \times 10^{-3} M$, 由表一數據, 我們發現界面活性劑的濃度對反氣泡在 0.005M 時有最高的成功率, 當界面活性劑的濃度過大時, 固體粉末不易溶解, 導致實驗時懸浮在溶液的顆粒影響操作者, 造成操作者在滴入界面活性劑溶液時較不易操作; 而界面活性劑濃度過小時, 較不易形成圓柱狀或層狀結構, 所以不易產生反氣泡。

(二) 改變氯化鈉的量

表二 氯化鈉的量對反氣泡成功率的影响

界面活性劑(g)	氯化鈉 (g)	聚乙烯醇 (ml)	丙三醇 (ml)	成功率
0.436	2.5	1	1	1%
0.436	3.0	1	1	3%
0.436	3.5	1	1	18%
0.436	4.0	1	1	4%
0.436	4.5	1	1	2%
0.436	5.0	1	1	0%

此實驗的控制變因：界面活性劑、聚乙烯醇、丙三醇的量

操縱變因：氯化鈉的量

應變變因：形成反氣泡的成功率

由表二數據得知氯化鈉添加 3.5 克時, 成功率明顯較其他量高出許多, 我們因此認為每 250 ml 的界面活性劑溶液加入 3.5 克氯化鈉的比例關係, 比較容易形成反氣泡。溶液中添加氯化鈉是為了提高反氣泡的密度, 使反氣泡較容易下沉, 添加氯化鈉的量若不足, 則在滴入過程中, 可能因浮力過大而不難形成反氣泡, 或是在下落過程中往上浮。但若氯化鈉濃度過

高，因加入高離子強度的電解質至水中時，會壓縮電雙層厚度，影響反氣泡穩定性，使其不易形成。

(三) 改變聚乙烯醇的量

表三 聚乙烯醇的量對反氣泡成功率的影响

界面活性劑(g)	氯化鈉(g)	聚乙烯醇(ml)	丙三醇(ml)	成功率
0.436	3.5	0.4	1	14%
0.436	3.5	0.6	1	16%
0.436	3.5	0.8	1	9%
0.436	3.5	1	1	18%
0.436	3.5	1.2	1	16%
0.436	3.5	1.4	1	15%
0.436	3.5	1.6	1	11%
0.436	3.5	1.8	1	11%

此實驗的控制變因為：界面活性劑、丙三醇、氯化鈉的量

操縱變因為：聚乙烯醇的量

應變變因為：形成反氣泡的成功率

在表三中，聚乙烯醇的變化量，對於反氣泡的形成，沒有界面活性劑和氯化鈉的改變量那麼具規律性，但仍有一個最高值。

表四 未添加聚乙烯醇的反氣泡成功率

界面活性劑重量(g)	界面活性劑體積莫耳溶度(M=mole/L)	氯化鈉(g)	聚乙烯醇(ml)	丙三醇(ml)	成功率
0.358	0.004	3.5	0	1	2%
0.436	0.005	3.5	0	1	4%
0.523	0.006	3.5	0	1	1.5%
0.610	0.007	3.5	0	1	1%
0.697	0.008	3.5	0	1	1%

表五 未添加丙三醇的反氣泡成功率

界面活性劑重量(g)	界面活性劑體積莫耳溶度(M=mole/L)	氯化鈉(g)	聚乙烯醇(ml)	丙三醇(ml)	成功率
0.358	0.004	3.5	1	0	10%
0.436	0.005	3.5	1	0	11%
0.523	0.006	3.5	1	0	11%
0.610	0.007	3.5	1	0	11%
0.697	0.008	3.5	1	0	10%

表四為我們試著不添加聚乙烯醇，僅添加丙三醇，發現形成反氣泡的成功率極低；若僅添加聚乙烯醇而不添加丙三醇，則成功率如表五，較同時添加聚乙烯醇、丙三醇還低，我們認為因為聚乙烯醇的長碳鏈，較丙三醇的長碳鏈更長，對於界面活性劑有較佳的親和力（長

碳鏈間的凡得瓦力)，可以使反氣泡更加穩定，使得僅加聚乙烯醇的形成率比僅加丙三醇的形成率更高。

三、利用反氣泡進行「Antibubble-drop experiment」

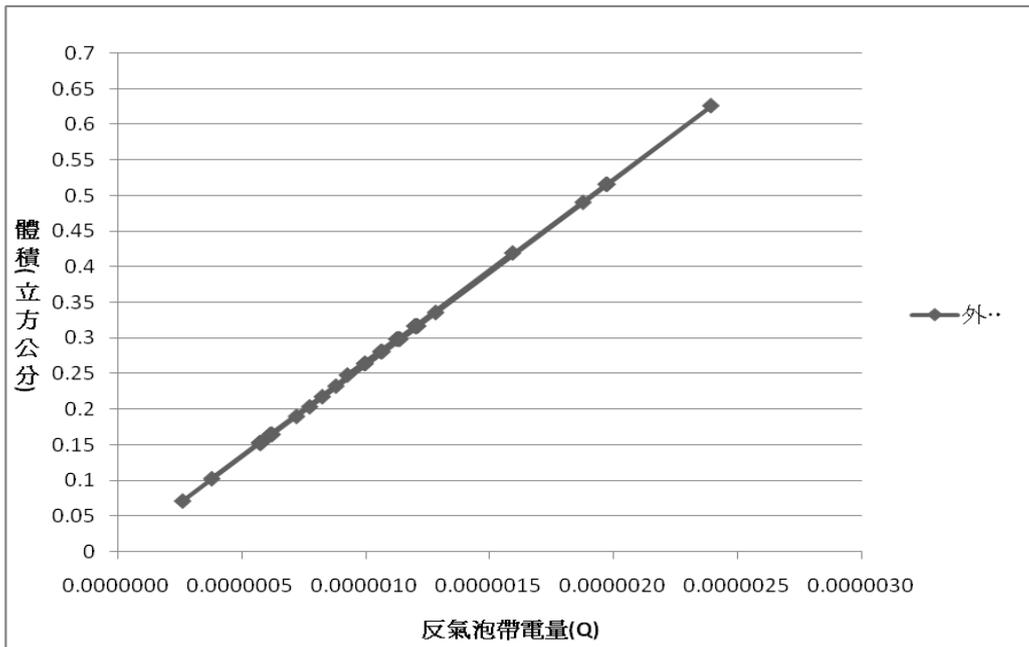
利用上述實驗結果，我們找到最易滴出穩定反氣泡的成分組成比例，利用此比例所形成的反氣泡很穩定，成功率也較高。反氣泡在水中降落過程中，反氣泡總共受到重力、浮力及黏滯力影響，淨力向下，故反氣泡在水中做加速度運動。我們認為在滴入界面活性劑溶液過程中，當固、液、氣三相中之任二相彼此接觸時，於界面上因材料之電負度差異，會產生分子間的電荷分佈不均，將使界面呈現帶電荷或極化情形。此界面上極性會吸引帶異電性的電荷吸附與聚集，以形成所謂的電雙層(Electric double layer, EDL)，因而使反氣泡帶電。於是我們再做進一步的探討，若外加電場於反氣泡，反氣泡的移動速率是否會受電場影響？我們利用調配出的陰離子界面活性劑混合溶液，在燒杯中滴出反氣泡，並且在燒杯的上下加上平行電板，分別以正極在上、負極在下和正極在下、負極在上來探討電場對反氣泡移動速率的影響。

表六 外加正上負下電場 (15 伏特)，反氣泡移動速率

次數	實際外徑 (cm)	外體積 (cm ³)	帶電量(Q)	帶電量($\times 10^7$)	外加電場後 速度(cm/s ²)	帶電量/基本 電荷($\times 10^9$)
1.	0.34	0.165	0.00000062	6.2	1.444	3.88
2.	0.33	0.153	0.00000057	5.7	1.775	3.58
3.	0.40	0.264	0.00000100	10.0	1.880	6.23
4.	0.39	0.248	0.00000093	9.3	2.632	5.79
5.	0.41	0.298	0.00000113	11.3	2.168	7.04
6.	0.33	0.153	0.00000058	5.8	0.992	3.63
7.	0.42	0.317	0.00000121	12.1	0.903	7.57
8.	0.42	0.317	0.00000120	12.0	1.409	7.53
9.	0.33	0.153	0.00000058	5.8	1.255	3.61
10.	0.33	0.153	0.00000058	5.8	1.493	3.60
11.	0.34	0.165	0.00000062	6.2	1.406	3.88
12.	0.42	0.317	0.00000120	12.0	1.456	7.53
13.	0.34	0.165	0.00000062	6.2	1.881	3.85
14.	0.36	0.190	0.00000072	7.2	0.983	4.51
15.	0.40	0.264	0.00000100	10.0	1.711	6.24
16.	0.41	0.298	0.00000113	11.3	1.516	7.08
17.	0.26	0.071	0.00000026	2.6	1.503	1.65
18.	0.46	0.419	0.00000159	15.9	1.831	9.96
19.	0.42	0.317	0.00000121	12.1	1.258	7.54
20.	0.37	0.218	0.00000083	8.3	1.240	5.16
21.	0.41	0.298	0.00000114	11.4	1.333	7.10
22.	0.42	0.317	0.00000120	12.0	1.462	7.53

23.	0.33	0.153	0.00000058	5.8	1.199	3.61
24.	0.34	0.165	0.00000062	6.2	1.257	3.89
25.	0.41	0.298	0.00000113	11.3	1.606	7.08
26.	0.38	0.232	0.00000088	8.8	1.415	5.51
27.	0.41	0.281	0.00000106	10.6	1.837	6.64
28.	0.42	0.317	0.00000120	12.0	1.955	7.49
29.	0.29	0.102	0.00000038	3.8	1.726	2.38
30.	0.40	0.264	0.00000100	10.0	1.891	6.23
31.	0.33	0.153	0.00000058	5.8	1.292	3.61
32.	0.41	0.298	0.00000113	11.3	1.529	7.08
33.	0.41	0.281	0.00000106	10.6	1.711	6.65
34.	0.33	0.153	0.00000058	5.8	1.248	3.61
35.	0.41	0.298	0.00000114	11.4	1.021	7.12
36.	0.42	0.317	0.00000120	12.0	1.639	7.51
37.	0.43	0.336	0.00000128	12.8	1.006	8.02
38.	0.50	0.516	0.00000197	19.7	1.069	12.34
39.	0.33	0.153	0.00000058	5.8	1.333	3.61
40.	0.50	0.516	0.00000197	19.7	1.383	12.31
41.	0.34	0.165	0.00000062	6.2	1.472	3.88
42.	0.34	0.165	0.00000062	6.2	1.882	3.85
43.	0.42	0.317	0.00000121	12.1	1.288	7.54
44.	0.41	0.281	0.00000107	10.7	1.353	6.67
45.	0.42	0.317	0.00000120	12.0	1.575	7.52
46.	0.36	0.203	0.00000078	7.8	0.901	4.84
47.	0.49	0.490	0.00000188	18.8	1.046	11.73
48.	0.53	0.626	0.00000239	23.9	1.477	14.95
49.	0.34	0.165	0.00000062	6.2	1.183	3.90
50.	0.33	0.153	0.00000058	5.8	1.416	3.60

由以上數據得知反氣泡的外層（即包含反氣泡空氣層的部分）半徑約介於 3.0×10^{-4} 公尺 ~ 4.5×10^{-4} 公尺之間，而在計算體積時，因為反氣泡的內層（即僅含反氣泡溶液層的部分）和外層的體積差距極小，所以我們假設反氣泡內層體積的大小和外層體積的大小相等，因此在計算反氣泡之體積時我們一律使用外層半徑來計算，而反氣泡的體積大約介於 1.5×10^{-7} 立方公尺 ~ 3.5×10^{-7} 立方公尺。隨反氣泡體積增加，其帶電量亦增加。



圖八 反氣泡體積與帶電量關係圖

我們在測量反氣泡外加電場後的終端速度時，假設反氣泡在外加電場後至降落杯底所經過之距離的一半時達到終端速度，所以我們在計算外加電場後的終端速度一律使用平均速度計算(即外加電場後至降落杯底所經過之距離/外加電場後至降落杯底所經過之時間)，而計算出的平均速度便是數據外加電場後的速度，約介於 1.0×10^{-2} 公尺/秒- 1.7×10^{-2} 公尺/秒。

由測得的反氣泡半徑、反氣泡體積以及外加電場後反氣泡的終端速度，透過文獻探討中所推得的公式：
$$Q = \frac{[1.436 \times 10^{-2} \times (R_{外})^3 - 1.89342 \times 10^{-6} \times R_{外} \times V_s] \times 22.5 \times 10^{-2}}{15}$$
，計算出每個反氣泡的帶電量約介於 8.0×10^{-8} 庫倫~ 1.6×10^{-9} 庫倫，我們將計算出的每個反氣泡的帶電量除以基本電荷得到每個反氣泡約帶有 1×10^9 ~ 14×10^9 個電子。

表七 外加正下負上電場 (15 伏特)，反氣泡移動速率

外加電場前 下落速度 (cm/s)	0.997	1.814	1.409	2.223	0.630	0.323	1.326	1.289	0.964	1.043	0.994
	0.632	1.160	0.438	0.726	0.790	0.678	1.011	0.952			
外加電場後 下落速度 (cm/s)	2.276	3.217	3.674	2.647	1.163	1.517	2.193	2.490	1.606	1.800	1.775
	1.248	1.875	0.933	1.861	1.161	1.905	1.274	1.457			

由表六、表七發現，外加電場正下負上時，反氣泡可得到較大的終端速度，根據同性相

斥、異性相吸的原理，我們推測反氣泡帶負電，因此在外加正下負上電場後速度會變快，反之外加正上負下電場後速度有減緩趨勢。利用中性界面活性劑取代陰離子型界面活性劑，其反氣泡亦受電場影響，實驗結果如表八，中性界面活性劑亦帶負電。

表八 中性界面活性劑，外加正上負下電場（15 伏特），反氣泡移動速率

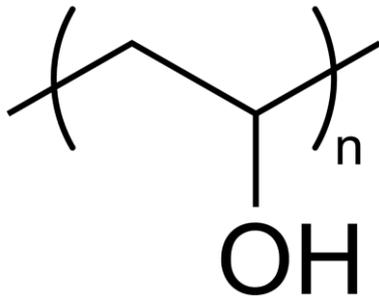
次數	實際外徑 (cm)	外體積 (cm ³)	帶電量(Q)	帶電量($\times 10^7$)	外加電場 後 速度 (cm/s ²)	帶電量/ 基本電荷 ($\times 10^9$)
1	0.604	0.925	0.00000013	1.3	1.466	0.83
2	0.382	0.234	0.00000003	0.3	1.033	0.21
3	0.506	0.544	0.00000008	0.8	1.195	0.49
4	0.544	0.676	0.00000010	1.0	1.754	0.61
5	0.392	0.253	0.00000004	0.4	1.667	0.22
6	0.494	0.504	0.00000007	0.7	1.082	0.45
7	0.506	0.544	0.00000008	0.8	0.776	0.49
8	0.392	0.253	0.00000004	0.4	1.024	0.23
9	0.519	0.586	0.00000008	0.8	1.261	0.53
10	0.506	0.544	0.00000008	0.8	1.241	0.49
11	0.633	1.064	0.00000015	1.5	1.165	0.96
12	0.519	0.586	0.00000008	0.8	1.161	0.53
13	0.392	0.253	0.00000004	0.4	0.907	0.23
14	0.532	0.630	0.00000009	0.9	1.050	0.57
15	0.633	1.064	0.00000015	1.5	0.949	0.96
16	0.494	0.504	0.00000007	0.7	0.967	0.45
17	0.506	0.544	0.00000008	0.8	0.969	0.49
18	0.519	0.586	0.00000008	0.8	1.025	0.53

陸、 結果與討論

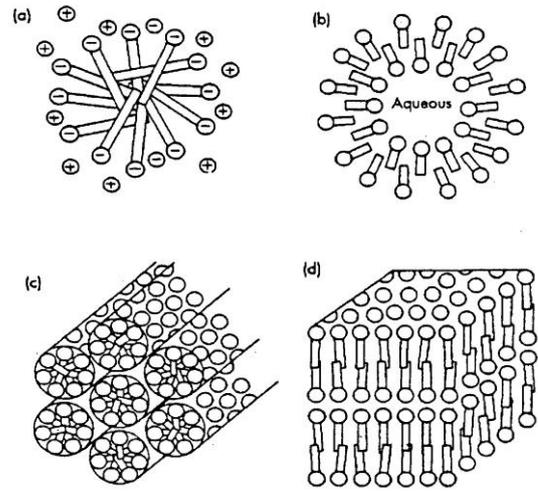
一、本實驗中，我們發現欲形成穩定的反氣泡，界面活性劑溶液的組成成分中，必須添加可增加混合溶液密度的物質，如此才可抵抗水浮力，而順利形成反氣泡。若界面活性劑溶液密度太低，反氣泡可能在滴入瞬間即在表面破裂；而加入長碳鏈的物質，可以增加界面活性劑與水分子間的作用力，使反氣泡更穩定，更不易破裂。

二、微胞是由數十至數百個甚至更多界面活性劑分子聚集而成，如圖十所示。界面活性劑可形成微胞的臨界濃度，稱為『臨界微胞濃度』(CMC)，雖然微胞通常呈現球形，但其實際大小與形狀會隨濃度而逐漸改變，可變成圓柱狀或層狀結構。當界面活性劑濃度變大時，較易形成圓柱狀或層狀結構，故界面活性劑濃度提高，有利於反氣泡的形成。反氣泡形成後，欲穩定存在而不破裂，就必須增加界面活性劑與水分子間的作用力，因此

我們在界面活性劑溶液中添加聚乙烯醇，聚乙烯醇為高分子聚合物，如圖九，其分子結構的長碳鏈為親油性，但經過OH官能基修飾後，又具親水性，添加聚乙烯醇可增加界面活性劑與水分子間的作用力，進而提高反氣泡穩定性。



圖九、PVA 結構式



圖十 微胞結構：(a) 球形結構；(b) 雙層球形結構；(c) 及 (d) 為柱狀和層狀結構。

三、當外加電場為正上負下時，反氣泡的速度會明顯變慢，正下負上時，速度有變快的趨勢，由此推論反氣泡帶負電性。

四、在實驗的過程中，我們發現一個有趣的現象，當電場打開時，很難滴出反氣泡，如果把電場關閉，成功率便明顯的增加，起初對這個現象感到不可思議，後來經過一番討論後，我們推測應該是電場會影響陰離子界面活性劑分子排列，因反氣泡的界面活性劑分子排列為球形對稱，受電場影響後，陰離子界面活性劑分子會因電場吸引而呈現同一方向排列，造成反氣泡難以生成。

五、從反氣泡體積與帶電量的關係來看，反氣泡越大其所帶的帶電量也就越大，與我們所推論的結果符合。

六、利用自製平行電板，藉由外加電場使反氣泡受電力影響而改變移動速率，我們成功測量出反氣泡帶電量。

柒、 結論

本研究我們發現，欲成功形成反氣泡，滴液的組成成分、濃度有決定性的影響，包括改變溶液的密度，以及增加界面活性劑與水分子間的作用力，溶液密度太低，反氣泡將無法抵抗水浮力，導致反氣泡在水表面即破滅。界面活性劑與水分子間的作用力若太小，則隨著反氣泡下降而水壓力愈來愈大，反氣泡將無法承受水壓力而破裂。

反氣泡滴入過程中帶電，我們設計「Antibubble-drop experiment」，利用外加電場改變反氣泡受力，影響反氣泡移動速率，簡易測量粒子帶電量，成功測量出反氣泡帶電量。

捌、 參考資料

- 一、物理雙月刊（廿八卷三期）2006年6月 教學實驗改進的一例-密立根油滴實驗
易台生、賴浩詮、張美菊、廖國惠
- 二、物理雙月刊（廿三卷四期）2001年8月 淺談微乳液 曹恒光 連大成
- 三、物理雙月刊（廿三卷四期）2001年8月 膠體中的物理簡介 王冠斐 賴山強
- 四、2007年國際科學展覽會
<http://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-2/2007/pdf/020005.pdf>
- 五、2007遠哲趣味科學競賽手冊