

中華民國第 51 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組 物理科

最佳團隊合作獎

030104

攀晶現象～表面張力與接觸角的探究

學校名稱：臺中市立豐東國民中學

| | |
|-----------------------------------|---------------------|
| 作者： 國三 何佳諭 國二 謝至紘 國二 洪鳴均 | 指導老師： 賴月琴 曾希正 |
|-----------------------------------|---------------------|

關鍵詞：攀晶、表面張力、接觸角

攀晶現象~表面張力與接觸角的探究

中文摘要

以氧化還原法處理實驗室重金屬離子廢棄物時，意外地在插了纏繞著棉線玻棒的量筒口發現了硫酸亞鐵鹽的攀晶現象，讓我們想了解與攀晶有關的物理條件—【表面張力與接觸角】，研究中我們獨創設計了幾種便宜、簡便、能精確測量及普遍推廣的裝置：

1. 成本不到 30 元的懸吊式等臂輕量天平，左臂懸吊自製的銅漆包線金屬環，右側則以 1/2 冰袋集中承載逆滲透水滴當成液態砝碼。可測出液滴數與查表標準表面張力之間呈線性關係： $T(\text{dyne/cm})=2.4834X-12.673$ ，相關係數高達 0.9985。

2. 第二代不等臂微量天平及配合擺動角度所需的弧形曲線板，可利用吊掛不同的圓環數來操控不同的承載物以落在更大的弧形角度範圍內，以提高測量的準確度。以 10 滴、15 滴、20 滴或 25 滴液滴數所對應的角度與查表標準張力之間呈線性關係： $T(\text{dyne/cm})=1.0507 X - 3.7771(10\sim 20 \text{ 滴平均值})$ ，相關係數也高達 0.9998。

3. 設計支撐 Dino-Lite 顯微鏡頭的八爪可調式角架，成功地組裝側照液滴接觸角的裝置，以 MB-Ruler 電腦角度板準確地測出不同液滴在不同的承載接觸面的接觸角。

壹、研究動機

我在國二研究碳酸鈣鐘乳石的製程中，終於有一項可以約在 18 小時形成鐘乳石且和石筍連成石柱。但是使用兩大杯的原物料溶液，才能形成少量的白色鐘乳石及石柱，除了不經濟外，無法形成像右圖(圖片來源



<http://wapedia.mobi/zhtrad/File:Rongdong.jpg>)打光後的彩色鐘乳石，實在不能滿足視覺的感官而有點遺憾。

所以，我使用鐵粉，利用金屬活性大小不同及氧化還原原理，將實驗室內污染性高的電池、電解實驗廢棄物置換出活性小的金屬粉及較無毒性污染問題的彩色硫酸鹽(如右圖)。



為了徹底了解液體攀晶的界面物理現象，查書、上網、長達一年多的研究→設計→實作後，我們做出了有別以往表面張力實驗的獨創性設計及另類獨創性組裝拍攝接觸角的裝置，發現了接觸角變化大才是攀晶的主因！

貳、研究目的

- 一、比較硫酸銅及硫酸亞鐵兩種硫酸鹽在不同條件下攀晶的差異
- 二、探討毛細現象與表面張力的關係
- 三、自製輕量等臂天平測量不同溶液的表面張力
- 四、自製不等臂微天平測量不同液滴重反推溶液的表面張力
- 五、設計組裝拍攝液滴接觸角裝置比較接觸角的變化

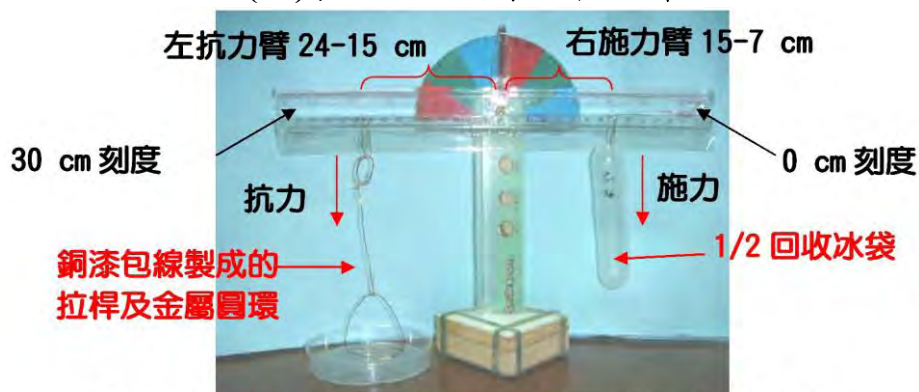
參、研究設備器材

一、研究設備及軟體

- (一)設備及器材：數位相機、電腦、Dino-Lite 顯微鏡頭、銅漆包線、30 公分塑膠直尺、迴紋針、釘書針、投影片、嬰兒藥匙、塑膠滴管、熱熔膠及熱熔槍、塑膠吸管、鐵絲、中空鐵環、中段包黑膠膜的粗銅線、膠帶、玻片、載玻片、錶玻璃、凹透鏡及雙凹透鏡等不同曲度承載面、培養皿、強力方型磁鐵
- (二)電腦軟體：Microsoft Word 文書及繪圖、Excel 運算及作圖、MB Ruler 電腦角度板、Image J 測量結晶面積
- (三)自製器材：懸吊式高度計、懸吊式的輕量天平、銅漆包線拉桿及金屬環、不等臂微量天平、弧形曲線板、八爪可調式角架、組裝正面照液滴接觸角的裝置、組裝上下方磁場裝置、不同間距的平行玻璃板
- (四)回收材料：1/2 及 1/4 回收冰袋、包裝紙盒及紙板、免洗竹筷、橡皮筋、螺絲、碎形壁報紙

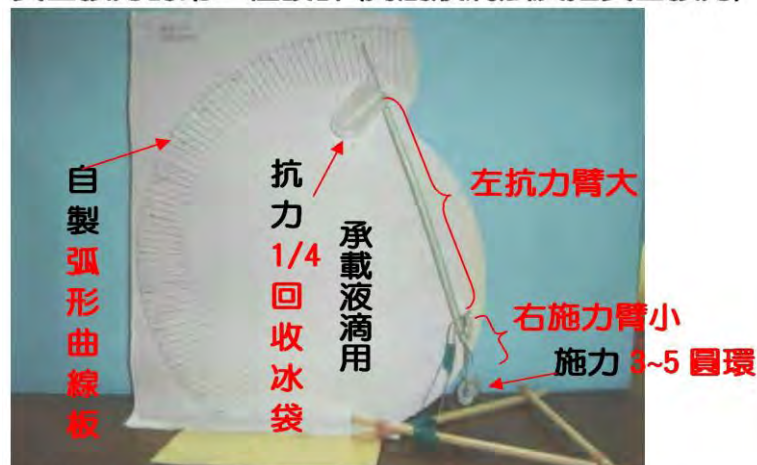
二、表面張力測量裝置

(一)表面張力的第一種設計



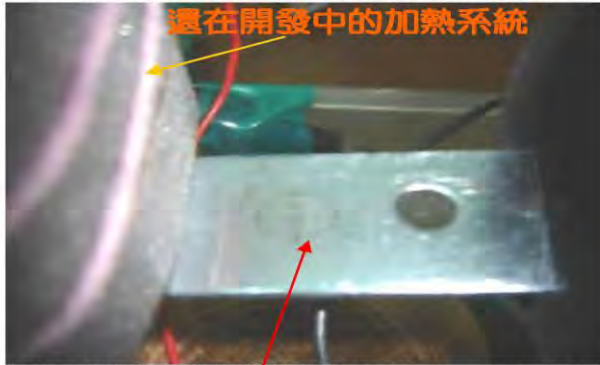
獨創不到 30 元的可測液體表面張力之第二代輕量天平

(二) 表面張力的第二種設計 (獨創液滴法反推表面張力)



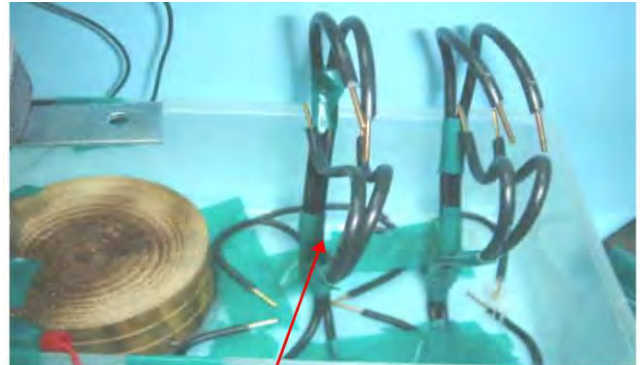
不到 20 元獨創的第二代不等臂微量天平

三、組裝設計測量液滴接觸角的裝置

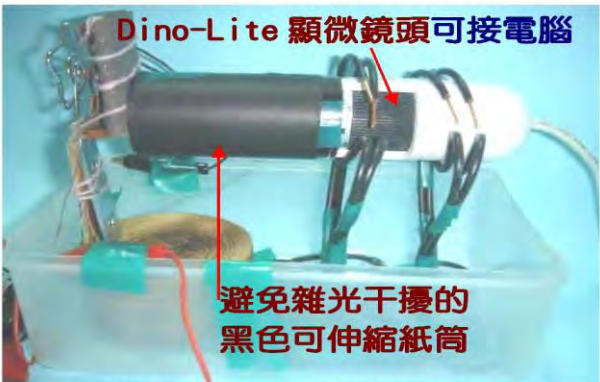


還在開發中的加熱系統

投影片以電腦繪製半徑 5mm 十字圓形，使滴管中心口有對準的依據



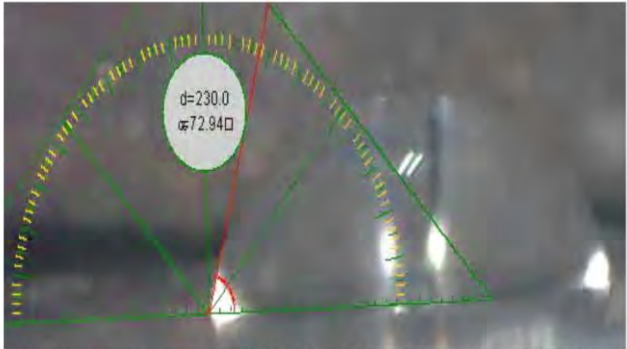
以八條中段包黑膠膜的粗銅線做成八爪承接 Dino-Lite 顯微鏡頭的可調式角架



Dino-Lite 顯微鏡頭可接電腦

避免雜光干擾的
黑色可伸縮紙筒

可拍一滴液滴正面圖接觸角的裝置



以 MB Ruler 電腦角度板之電腦軟體量測接觸角

四、所用藥品

1. 硫酸銅 Cupric Sulfate CuSO_4 EXTRA PURE REAGENT
2. 硫酸亞鐵 Ferrous sulfate FeSO_4 : 以藥品 1 加足量鐵粉取代後過濾
3. 硫酸鐵 Ferric Sulfate $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ EXTRA PURE REAGENT
4. 硫酸鋁 Aluminum Sulfate $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ EXTRA PURE REAGENT
5. 硫酸鋅 Zinc Sulfate $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ EXTRA PURE REAGENT
6. 氯化鈉 Sodium Chloride NaCl 台鹽精鹽
7. 逆滲透水 Counter percolating water H_2O
8. 甘油 Glycerin $\text{CH}_2(\text{OH})\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_2(\text{OH})$ PURE REAGENT 島田化學研究所
9. 酒精 Ethyl Alcohol $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ 99.5% EXTRA PURE REAGENT 島久藥品株式會社
10. 市售維多特級冷壓橄欖油 VENDOLA EXTRA VIRGIN OLIVE OIL 100% 1L 希臘極優品質

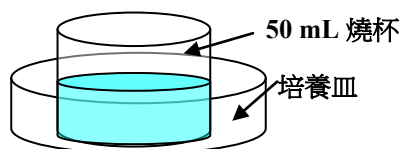
肆、研究過程或方法

研究一、比較硫酸銅及硫酸亞鐵兩種硫酸鹽在不同條件下攀晶的差異

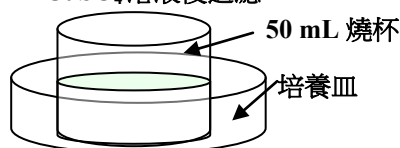
實驗一、配製飽和硫酸銅溶液及硫酸亞鐵鹽溶液

1. 準備 2 個 500 mL 乾淨的燒杯、10 個 50 mL 乾淨的燒杯、培養皿、稱量紙，以及天平、藥勺、50 mL 量筒、滴管、玻棒、NO1 濾紙、漏斗、漏斗架、逆滲透水及溫度計
2. 將 110 克的硫酸銅分批加到 300 mL 的逆滲透水中，以玻棒攪拌使之溶解，將藍色硫酸銅溶液以量筒量取各 30 mL 沿玻棒倒入 50 mL 的燒杯中備用。
3. 倒取 150 mL 的飽和硫酸銅溶液到另一燒杯中，加入 50 克的鐵粉，以玻棒攪拌使兩者充分反應，再過濾之。
4. 濾紙上被還原出的紅色銅粉，待乾燥後裝入瓶中回收，而藍綠色的硫酸亞鐵鹽濾液則以量筒量取各 30 mL 沿玻棒倒入 50 mL 的燒杯中備用。

飽和 30 mL 溶液量
溶質 CuSO_4 11.0 g



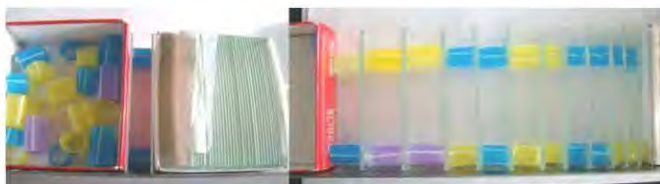
30 mL FeSO_4 溶液量
10 g Fe 溶於 33 mL 飽和
 CuSO_4 溶液後過濾



實驗二、裝有硫酸銅及硫酸亞鐵溶液的燒杯中置放平行玻板的攀晶比較

實驗步驟：

1. 先將粗吸管以直尺校準 0.5 cm、1.0 cm、1.5 cm、2.0 cm 的刻度，直接以小刀劃記刻痕後，再以剪刀剪下一截截的粗吸管。
2. 準備乾淨的玻片及保麗龍膠，將剪下同規格的粗吸管黏貼在兩片玻片間的上下方，形成 0.5~2.0 cm 間距的平行玻板，如右上圖所示。
3. 配製飽和的硫酸銅及硫酸亞鐵溶液，待兩液溫度相同時，分別各加入 30 mL 溶液量到各燒杯中，包括逆滲透水為對照組。全部實驗組如下：



實驗三、燒杯中置放平行玻板其中一側貼有無磨擦投影片的的攀晶比較

實驗步驟：

1. 投影片先剪成玻片大小，再以砂紙來回摩擦，注意控制每片摩擦的次數、力道及長度以盡量減少人為的誤差。
2. 平行玻板這一側貼砂紙磨過的投影片 另一側則為無磨擦過的投影片。



3. 不同間距的平行玻板兩側貼上無磨擦過的投影片及砂紙磨擦過的投影片。
4. 右側平玻板貼上已磨擦過的投影片 2 公分間距平行玻板由左側、前側、右側觀看液面與壁面的接觸角。
5. 再換 1.5 公分、1.0 公分、0.5 公分間距的，每天觀察及拍攝可能的攀晶情形。

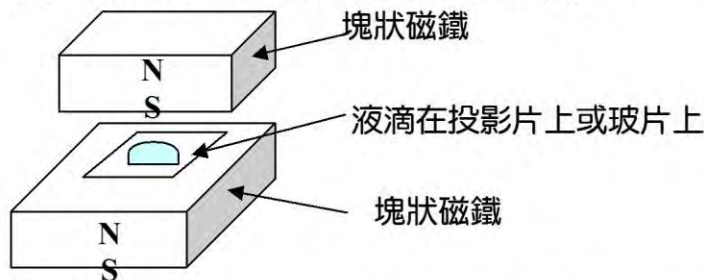
實驗四、硫酸銅及硫酸亞鐵溶液受磁場作用的攀晶比較

(一)、上下磁場相對分佈對一滴電解質(硫酸亞鐵或硫酸銅)溶液結晶形的影響

實驗步驟：

1. 回收舊式裝磁帶的錄音帶盒，剛好可黏放一塊文具店買的強力磁鐵(不是釹磁鐵)後合上。
2. 四個錄音帶盒剛好可以做一組上下方磁場相對的磁場裝置。

(1) 讓液滴在上下方有垂直磁場作用影響下的簡圖如下：



(2) 實際實驗模型如下(盒的上方及下方均有放置一塊同名極或異名極的磁鐵)

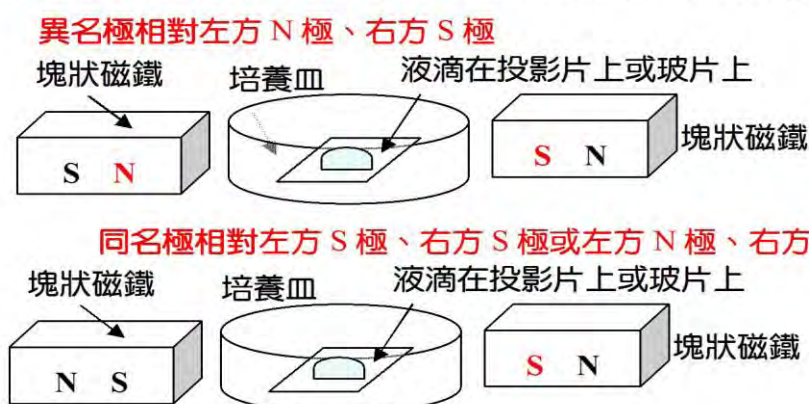


3. 下方錄音帶盒恰好可置放一片玻片及與玻片同大小的投影片。放好後，兩側均貼上膠帶以免晃動而影響結果。

(二)、左右磁場相對分佈對一滴電解質(硫酸亞鐵或硫酸銅)溶液結晶形的影響

實驗步驟：

1. 在培養皿內放置投影片或玻片，培養皿外則放置方形塊狀磁鐵，這樣就可形成最簡易的左右方同名極或異名極磁區。
2. 滴下待測液滴後即可讓液滴在左右方有水平磁場作用影響下的觀察。



(三)、上下磁場相對分佈對一杯電解質(硫酸亞鐵或硫酸銅)溶液攀晶效果的影響

實驗步驟：

1. 同上述一的實驗，用四個錄音帶盒剛好可以做一組上下方磁場相對的磁場裝置。
2. 但因為一杯溶液量，所以，可用磁場強度再強一些的方形大塊磁鐵置入錄音帶盒後合上。
 - (1) 一杯溶液在上下方有垂直磁場作用下是否影響攀晶速率的觀察簡圖：同五實驗丙之一
 - (2) 實際實驗模型如下(盒的上方及下方均有放置一塊同名極或異名極的方型磁鐵)



3. 模型盒中的高度及寬度恰好可以放入 50 mL 的燒杯，且拿取及置放無礙。
4. 新配製飽和硫酸銅溶液，其中一半以鐵粉取代反應後，立即過濾裝瓶等待冷卻。(避免氧化還原產生的亞鐵離子在高溫下暴露於空氣中氧化成鐵離子)
5. 觀察硫酸亞鐵溶液攀晶的情形。
6. 實驗做完後，再換硫酸銅溶液。(無法同時比較是因為方形大塊磁鐵數量不足)

(四)、左右磁場相對分佈對一杯電解質(硫酸亞鐵或硫酸銅)溶液攀晶效果的影響

實驗步驟：

1. 同上述二之實驗，在培養皿內放置 50 mL 燒杯，培養皿外則放置方形塊狀磁鐵，這樣就可形成最簡易的左右方同名極或異名極磁區。同五實驗丙之二
2. 每杯倒入等量 30 mL 溶液後即可讓溶液在左右方有水平磁場作用影響下觀察其攀晶的情形。

實驗五、硫酸銅及硫酸亞鐵溶液在不同曲度玻璃上的攀晶比較

實驗步驟：

1. 選擇玻璃及塑膠培養皿當做平面對照組，以有曲度的錶玻璃承載 3.0 mL 的溶液量，及學校透鏡盒中，雙凹、平凹、凸凹透鏡為承載 1.9 mL 的溶液量。
2. 用兩支塑膠吸管，貼上硫酸銅、硫酸亞鐵標籤後，吸取預定的溶液量，小心加到各承載液體的容器中。

研究二、探討毛細現象與表面張力的關係

(一)毛細管柱半徑愈小，溶液在毛細管中 的液面升降愈明顯。也就是管柱的半徑與液柱上升高度呈反比；管柱愈細，管內液柱上升高度愈高。這是因為毛細管中的液柱所受表面張力的總合(=F cosθ)與液柱的重量(mg)可以達靜力平衡所致。

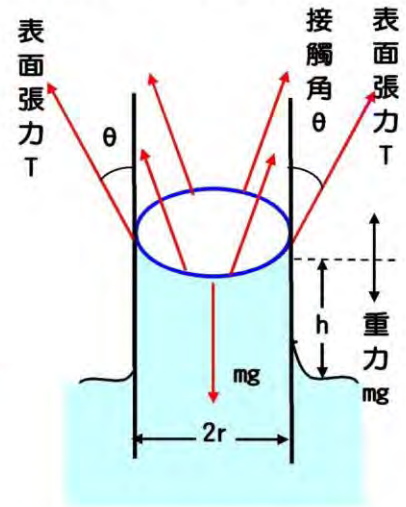
$$F \cos\theta = mg,$$

$$(T \times 2\pi r) \cos\theta = (\pi r^2 h) \rho g$$

$$\therefore h = \frac{(T \times 2\pi r) \cos\theta}{(\rho g \pi r^2)}$$

$$= \frac{2T \cos\theta}{(\rho g r)}$$

其中T：表面張力(dyne/cm)、r：毛細管半徑(cm)、
 θ：液體和玻璃的接觸角、ρ：液體密度(g/cm³)、
 h：毛細管內液面上升高度(cm)。



(二)水面呈凹狀是因為水分子與玻璃分子間**附著力** >> **內聚力**所致。圖解及說明如下：

F₁：液體分子間的內聚力 F₂：液體與器壁間的附著力
 R：合力 θ：液體和器壁的接觸角

液面接觸角為銳角： $F_2 >> \frac{F_1}{\sqrt{2}}$ 則液面在接觸周邊形成向上彎曲的弧面

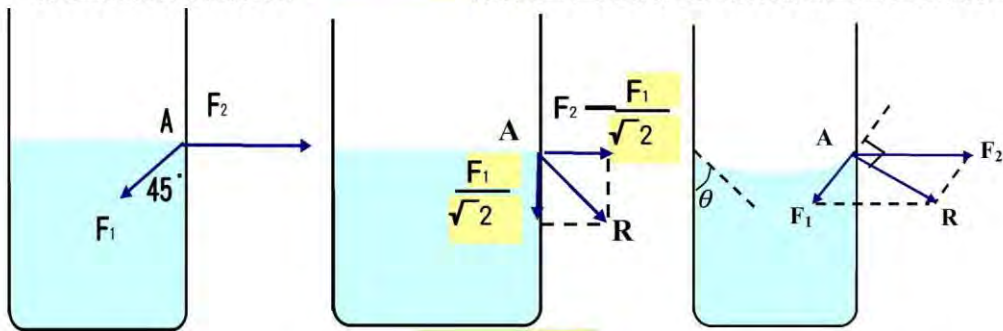


圖 1.內聚力及附著力的方向

圖 2. $F_2 >> \frac{F_1}{\sqrt{2}}$ 使合力並未垂直於液面，液體將向上移動

圖 3.內聚力與附著力的合力與液面切線呈垂直平衡為止

(三)水面呈凸狀是因為水分子與玻璃分子間**內聚力** >> **附著力**所致。圖解及說明如下：

液面接觸角為鈍角： $F_2 << \frac{F_1}{\sqrt{2}}$ 則液面在接觸周邊形成向下彎曲的弧面

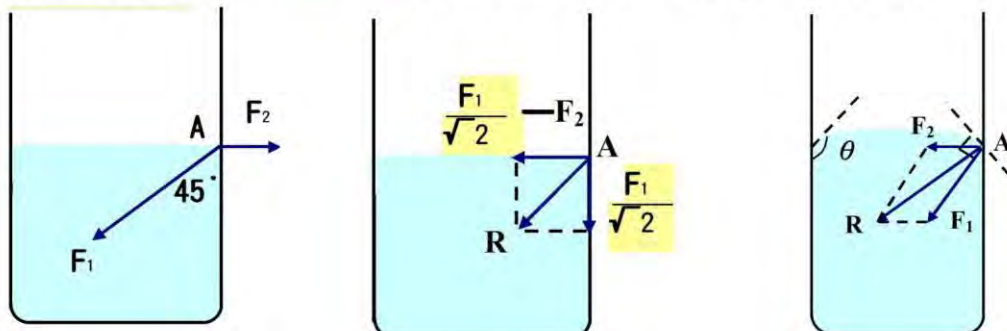


圖 1.內聚力及附著力的方向

圖 2. $F_2 << \frac{F_1}{\sqrt{2}}$ 使合力並未垂直於液面，液體將內縮移動

圖 3. 內聚力與附著力的合力與液面切線呈垂直平衡為止

研究三、自製輕量等臂天平測量不同溶液的表面張力

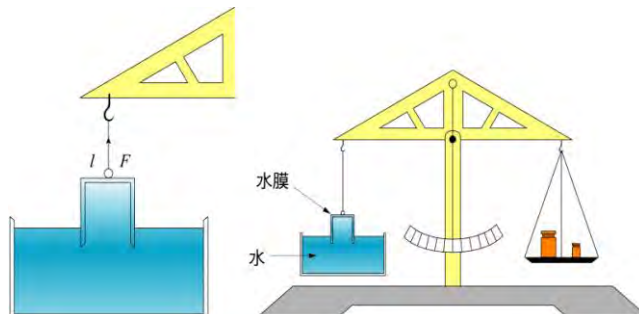
(一) 研究天平法測量表面張力實驗設計

- 1.傳統表面張力測定儀：一般都用貴重的 Du Nouy 張力計。
- 2.研究，當我們用一環浸在液體中，再提到表面以上時，液體表面積將增加，即需要作功，此功等於增加的表面積乘以表面張力，也就是需要用力去提起金屬環。
- 3.設環長為 ℓ ，液面至金屬環提上到液膜破裂的距離 h ，為而且因為薄液膜有兩個面，所以實際上表面積的增加有兩倍，即 $2\ell h$ ，故所作的功 W 為

$$W = F \cdot h = 2\ell h \cdot T \therefore T = \frac{F}{2\ell}$$

其中 T 是表面張力， F 表拉力。

所以，實驗設計的重點是「用已知長度的線圈置放於待測液體表面，再精確的測量出垂直拉離線圈的力」。



根據查資料(二)高中版龍騰文化所得，可用下圖天平法測表面張力

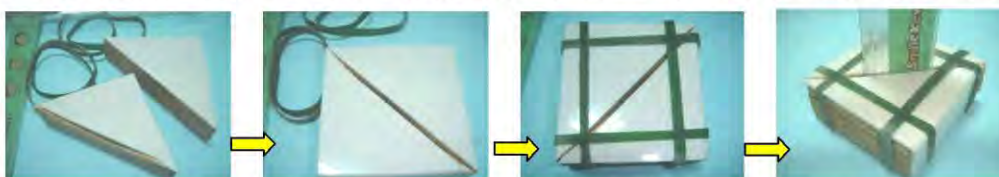
設純水的表面張力 T_1 ，那麼只要實驗測出純水與待測液體相對應的拉力 F_1 與 F_2 ，則

$$\text{待測液體的表面張力 } T_2 \text{ 為 } \frac{T_2}{T_1} = \frac{F_2/2\ell}{F_1/2\ell} \therefore T_2 = T_1 \cdot \frac{F_2}{F_1}$$

(四) 自製懸吊式承載液滴的輕量天平改良為表面張力儀

1. 第一代輕量天平

- (1)如右圖所示，除了橫尺 10 元、兩個嬰兒藥匙 20 元當承接小砝碼的吊盤、兩個迴紋針、一小盒手牌訂書針(不到 10 元，每支釘書針的規格相當齊一，經以學校托盤式等臂天平比較，每一整排的釘書針的質量幾乎一樣)、不到一張的投影片(當迴紋針的滑軌)、一段寬膠帶(固定投影片滑軌)外，其餘所有材料均是回收的材料，總成本不到 50 元。例如天平支架底座為廚櫃門板廢料，支架為有缺一小角的報廢短尺，再加上 4 條回收的寬板橡及筋，製作程序依序如下列四圖所示



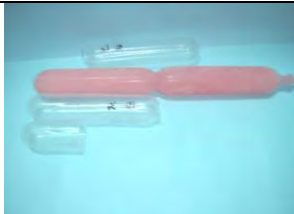


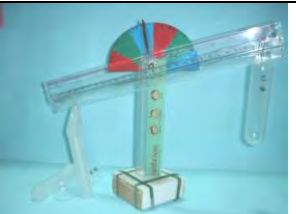
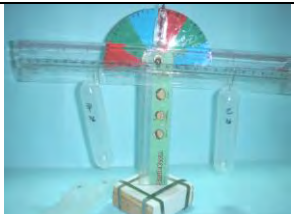


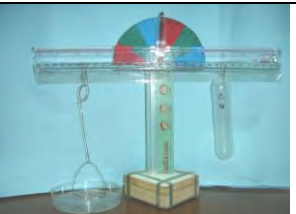
- (2)經校正兩邊等臂加釘書針歸零後，左右逆順時針方向力矩平衡、中央指針擺動至中間，除了兩臂稱量時略差一些外(因尺右邊有圓孔，而左邊沒有，所以兩邊不等重)，穩定性及再現性還不錯。
- (3)左邊將嬰兒藥匙改換成銅漆包線做成的拉環，發現左、右質量差異太大、兩者需平衡的力臂差異太多，我們決定改良或取代右側的嬰兒藥匙才行。
- (4)另外，以嬰兒藥匙當集中承接釘書針的吊盤想法可行，但用釘書針來量測，每次在計量針數時仍不夠方便，我們就想，既然用直式藥匙可以集中釘書針，藥匙上雖有體積的刻度，不見得要用到，但是否可用水滴來當度量的單位呢？

2. 改良第二代輕量天平為表面張力儀：

實驗六、以改良第二代輕量天平測量各種液體的表面張力

實驗步驟：

- (1)回收冰棍袋，經過以釘書針數來校正標示其質量，發現所剪下的下方冰袋質量幾乎相當於 75 或 76 支釘書針的質量，每個 1/2 冰袋外均以奇異筆標示相等於釘書針的釘數。
- (2)以銅漆包線製成的金屬圓環及拉桿：金屬圓環以直尺量測約 10 公分、20 公分、30 公分多一些的長度繞成橢圓形後圈住固定，另一端則拉直，尾端圈 2~3 圈成拉桿。
- (3) 30 公分的金屬圓環直徑幾乎快貼近培養皿的大小，所以，我們就想用回收紙板先固定成不同直徑的圓筒，再將漆包線由大圓筒纏繞再依序換直徑略小的，最後放到平面上固定間距，以形成螺線形的同心圓。結果，即使長至 50 公分的漆包線製成同心圓，也不會超過培養皿的直徑大小。
- (4)以拉桿依序將各種規格的金屬圓環置放入裝有逆滲透水的培養皿中，以輕量天平右盤滴水試拉的結果，發現金屬圓環能完全均勻齊一貼近水面的是 10 公分及 20 公分單圈橢圓形的金屬圓環；30 公分的有時會貼到培養皿的邊緣；20 公分螺線形的同心圓環也能齊一貼近水面；30~50 公分的螺線形的同心圓環在拉離水面時會分段離開，且發現 20~50 公分的螺線形的同心圓環拉離水面的滴數並不穩定。
- (5)所以，我們決定先以 10 公分單圈橢圓形的金屬圓環將所要偵測的液體，全部先測試完，分析數據作圖後再說。裝置設計材料及圖示簡述如下：

| | | | |
|---|---|--|---|
|  |  |  |  |
| 冰棍下方的 1/2 冰袋可回收為輕量吊盤 | 1/2 冰袋質量約為 76 支釘書針數 | 第一、二代的輕量天平材料 | 左側嬰兒藥匙質量遠大於右側 1/2 冰袋 |
|  |  |  |  |
| 掛好兩側的輕量吊盤後兩邊力臂所差不多 | 回收紙板圈成不同直徑的圓柱，以製作螺線型金屬圓環 | 10~40 cm 橢圓形或螺線型金屬圓環、拉桿及裝待測液的培養皿 | 可測表面張力的第二代輕量天平 |

研究四、自製不等臂微天平測量不同液滴重反推溶液的表面張力

設計步驟：

甲、自製不等臂槓桿

1. 先以粗白鐵線做出槓桿可放置的支架。
2. 先以一截長度及粗細適中的鐵線，一端先繞支架固定，但可以轉動為原則。另一端穿過吸管以支撐不夠粗硬的鐵絲。

乙、自製弧形刻度板

3. 以電腦繪製弧形刻度板，列印放大成不同比例的大小。
4. 將不等臂槓桿擺動弧度板比較後，選出適合桿長擺動的刻度板。
5. 回收最輕質的 1/4 圓柱冰袋做為承載液滴的容器，將鐵絲穿過此冰袋口的一端。
6. 掛上中空圓形磁鐵，再滴上水滴擺動看看。結果第一代微量天平的歸零再現性較差且角度變化較小，的確應再設計第二代。
7. 改中空圓形磁鐵成 3~5 個白鐵環，槓桿支架、刻度板也再進行修正成第二代微量天平，結果歸零的再現性不錯且角度變化可由 0° 空鐵線針到掛冰袋(當液滴的秤盤) 10° 及量測物重時擺動角度可達 120° 的範圍。
8. 每次量測角度時，為了避免兩眼的視差，決定每次都閉左眼，以右眼觀測刻度。

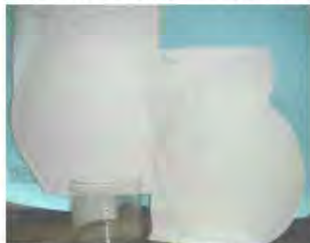
丙、歸零再現性測試步驟：

原子筆桿施力於微天平橫桿，下壓至 40° ，連續操作 10 次的再現性可達 80% 以上，且每次仰角均誤差在 2° 以內及每次晃動頻率均在 4 次以內，為謹慎起見，於稱量前均微移動竹筷支架底架至歸零角度。

第一代及第二代微形天平實際成品圖示如下：



弧形刻度板背面為回收紙板



弧形刻度板正面



第一代微量天平



成本不到 20 元的
第二代微量天平

實驗七、以第二代微量天平測量各種液體的表面張力

實驗步驟：

甲、第二代不等臂微量天平不同圓環數的順力矩與逆力矩質量對應角度

1. 第二代微量天平對照質量採用輕量砝碼(以釘書針 5 支為一單位)來對應逆時針力矩擺動停止時的角度大小。
2. 順時針力矩掛 2 圓環為施力大小，此時微天平的傾斜角度為 120° ，無法再加掛任何物重。(因為以鐵線穿過塑膠吸管為槓桿，左邊力臂長而右邊力臂短所致)
3. 右側短力臂若掛 3 圓環則微天平傾斜角度為 30° ，故可試著加砝碼量測，實測結果記錄表中。
4. 右側短力臂若掛 4 圓環則微天平傾斜角度為 10° ，故可試著加砝碼量測，實測結果記錄表中。
5. 右側短力臂若掛 5 圓環則微天平傾斜角度為 6° ，故可試著加砝碼量測，實測結果記錄表中。
6. 以每次 5 支釘書針為一個單位，放入 1/4 冰袋中，連續放至微天平傾斜角度超過 90° 以上。
7. 再重覆操作步驟 6 三次。記錄每次傾斜角度再平均之。

乙、每種液體每毫升的滴數比較

1. 同一支塑膠滴管，若吸取水量至 2 毫升，滴至 1 毫升，連續操作 5 次，平均約為 $16 \text{ 滴} \pm 0.25$ 滴，且大多為 16 滴。
2. 若吸取水量至 1 毫升，全滴完，連續操作 6 次以上，均為 $19 \text{ 滴} \pm 0.25$ 滴，其中有 5 次是 19 滴。
3. 所以，決定以後各標準液體及待測飽和電解質水溶液均吸液體至 1 毫升液面時，即將滴管提離取樣的液面，以減少誤差。

丙、第二代微量天平量測逆滲透水及五種液體的重量

1. 右側短力臂掛 4 圓環，左側長力臂鐵絲的一端掛上 1/4 冰袋。
2. 移動竹筷座，使每次校正微量天平傾斜角度都能維持為 10° 。
3. 吸管吸取各溶液 1 毫升，每次滴水量均 5 滴，以維持相同的控制變因。
4. 各液體共滴 25 滴，每種液體均需連測五次以求平均值。

丁、以第二代微量天平量測液滴質量及每毫升液滴數法回推計算出的表面張力值(dyne/cm)

1. 由已量測的液滴質量回推表面張力為： $T = \text{每滴質量} \times g \div (\pi D)$
 2. 再以作圖找出最適合的滴數範圍。
-

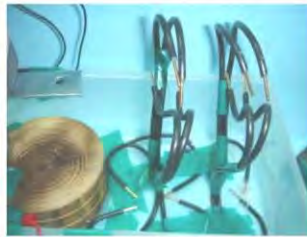
研究五、設計組裝拍攝液滴接觸角裝置比較接觸角的變化



第一代承載液滴角座及承接顯微鏡頭紙架



還在開發中的液滴加熱系統



第二代可調式八爪角架



八爪角座承接可伸縮遮光紙筒及顯微鏡頭



已繪製十字圓形投影片使液滴有對準的依據



液滴以同樣的高度滴到十字圓的投影片上



伸縮紙筒拉長以避免外界的反射光



液滴影像以電腦內鍵時鐘計時
顯微鏡頭的 USB 接頭插到電腦拍攝液滴正面影像

實驗八、測量液滴接觸角

實驗步驟：

1. 剪下內含十字圓的方形投影片，小心拿方形的一個邊以避免手去碰觸到中心的十字圓。
2. 將已印十字圓投影片的光滑面(非印刷面)朝上放置於承載液滴的角座上。
3. 先滴下一滴去離子水校準顯微鏡頭的拍攝角度及放大倍率。
4. 如步驟 2 再放一張新的承載液滴的投影片。
5. 左手靠在角座支架上方，以食指及拇指夾住滴管口上方的管徑以避免右手滴下液滴時手部會抖動且滴不準。
6. 將電腦的內鍵時鐘呈現在桌面上，啟動顯微鏡頭拍攝模式，將液滴畫面與時鐘在電腦螢幕上並列，按上拍攝鍵後立即記錄時間。
7. 每一液滴需拍攝一開始滴到投影片上畫面、5 分鐘後畫面、10 分鐘後畫面，以比較液滴在投影片上的接觸角變化。
8. 重新換一張投影片，校準後才能滴另一滴待測液滴。
9. 投影片換成光滑面在下，先試逆滲透水滴與硫酸亞鐵溶液在一開始到 4 分鐘後的畫面，以比較液滴是否在不同接觸面上，接觸角會更有不一樣的變化。
10. 投影片全面換成載玻片，再如以上的操作步驟測試之。

伍、實驗結果

一~五的攀晶實驗結果如附件甲。

六、在實驗六【以改良第二代輕量天平測量各種液體的表面張力】中

| | | | | |
|-------------|--------------------|------------|--------------------|------------|
| 懸吊式 輕量天平 | 左抗力(拉桿及金屬圓環)(gw) | 左抗力臂(cm) | 右施力(1/2 冰袋重)(gw) | 右施力臂(cm) |
| 歸零平衡時 | 1.3916 | 24-15=9 | 1.5656 | 15-7=8 |

1/2 冰袋重相當於 76 支釘書針(每支針平均質量為 0.0206g)的質量=76*0.0206g=1.5656g

根據力矩槓桿平衡原理：施力×施力臂=抗力×抗力臂，∴左拉桿及金屬圓環的抗力為：

$$1.5656*8\div 9=1.3916(\text{gw})$$

| 金屬圓環置於 液中 | 液體拉力(gw) | 左臂 (cm) | 右施力(1/2 冰袋重+液滴重)(gw) | 右臂 (cm) |
|--------------|-----------------------|--------------|---------------------------------------|--------------|
| 22°C 逆滲透水中 | 3.05495-1.3916=1.6633 | 9 | 34.0 滴水 *0.0550357+1.5656=3.436814 | 8 |
| 22°C 甘油中 | 2.9082-1.3916=1.5165 | 9 | 31.0*0.0550357+1.5656=3.271707 | 8 |
| 22°C 橄欖油中 | 2.2722-1.3916=0.8806 | 9 | 18.0*0.0550357+1.5656=2.3361 | 8 |
| 22°C 酒精中 | 2.0765-1.3916=0.6849 | 9 | 14.0*0.0550357+1.5656=2.556243 | 8 |

液態砝碼的水滴重：22°C 逆滲透水 2 次 18.0 滴、4 次 18.25 滴，平均 1mL 為 18.17 滴，每滴水平均為 0.0550357g

根據槓桿原理的左抗力為拉桿、金屬圓環及液體拉力總重，∴算表面張力時須把抗力總值減去拉桿及金屬圓環重以後，再除以 2 倍的金屬線長度才行。

由實驗推算 22°C 逆滲透水表面張力(dyne/cm)= 液體拉力/金屬圓環的 2 倍=F/2L

$$=1.6633 \text{ gw} *980\text{cm/s}^2\div 20(\text{cm})=81.5 \text{ dyne/cm}$$

∴金屬圓環以超過 10 公分長度的漆包線來繞圈的長度須修正，以及左右兩臂取整數的長度，所以，上式結果乘上修正係數 0.85 的值 81.5039*0.85=69.28

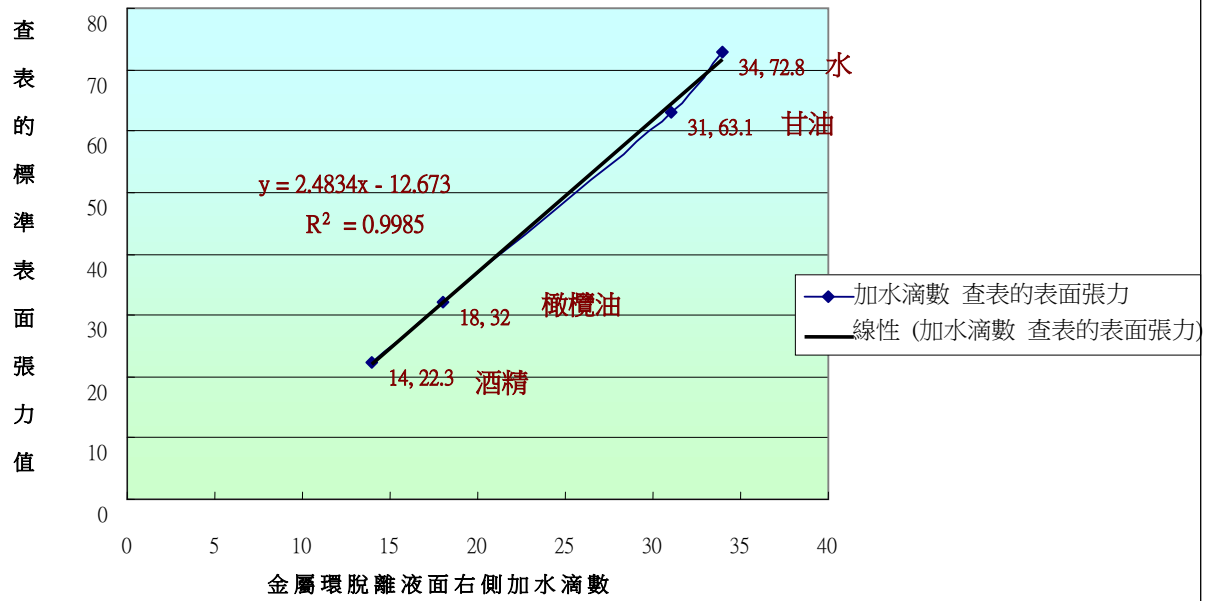
實驗推算 22°C 甘油表面張力= 1.565 gw *980cm/s²÷20(cm) *0.85=63.17(dyne/cm)

22°C 橄欖油表面張力=0.8806 gw *980cm/s²÷20(cm) *0.85=36.68(dyne/cm)

22°C 酒精表面張力=0.6849 gw *980cm/s²÷20(cm) *0.85=28.53(dyne/cm)

| 標準樣品 | 逆滲透水 | 甘油 | 橄欖油 | 酒精 |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| 右側加水滴數(取 5 次的平均值) | 34 | 31 | 18 | 14 |
| 查表的表面張力(dyne/cm) | 72.8 | 63.1 | 32 | 22.3 |
| 圖示方程式計算的表面張力 (dyne/cm) | 71.76 | 64.31 | 32.03 | 22.09 |
| 以力矩實算*修正係數的表面張力 (dyne/cm) | 69.28 | 63.17 | 36.68 | 28.53 |

圖一、自製第二代輕量天平測表面張力與查表標準表面張力對照圖



由右側加水滴數對查表的標準表面張力值作圖，居然偵測值與趨勢線的線性關係相當令人滿意，相關係數達 0.9985。

以改良第二代輕量天平(表面張力儀)測研究一的各飽和溶液的右側加水滴數及實算如下表

| 金屬圓環置於液中 | 液體拉力(gw) | 左臂 (cm) | 右施力(1/2 冰袋重+液滴重)(gw) | 右臂 (cm) |
|------------|-----------------------|-----------|---------------------------------------|-----------|
| 22°C逆滲透水中 | 3.05495-1.3916=1.6633 | 9 | 34.0 滴水 *0.0550357+1.5656=3.436814 | 8 |
| 22°C飽和氯化鈉中 | 2.9082-1.3916=1.5166 | 9 | 31.0*0.0550357+1.5656=3.2717 | 8 |
| 22°C硫酸亞鐵中 | 3.1528-1.3916=1.7612 | 9 | 38.0*0.0550357+1.5656=3.5469 | 8 |
| 22°C飽和硫酸銅中 | 2.9571-1.3916=1.5655 | 9 | 32.0*0.0550357+1.5656=3.3267 | 8 |
| 22°C飽和硫酸鋁中 | 3.0155-1.3916=1.6239 | 9 | 33.0*0.0550357+1.5656=3.3924 | 8 |
| 22°C飽和硫酸鋅中 | 3.0388-1.3916=1.6472 | 9 | 33.67.0*0.0550357+1.5656=3.4187 | 8 |

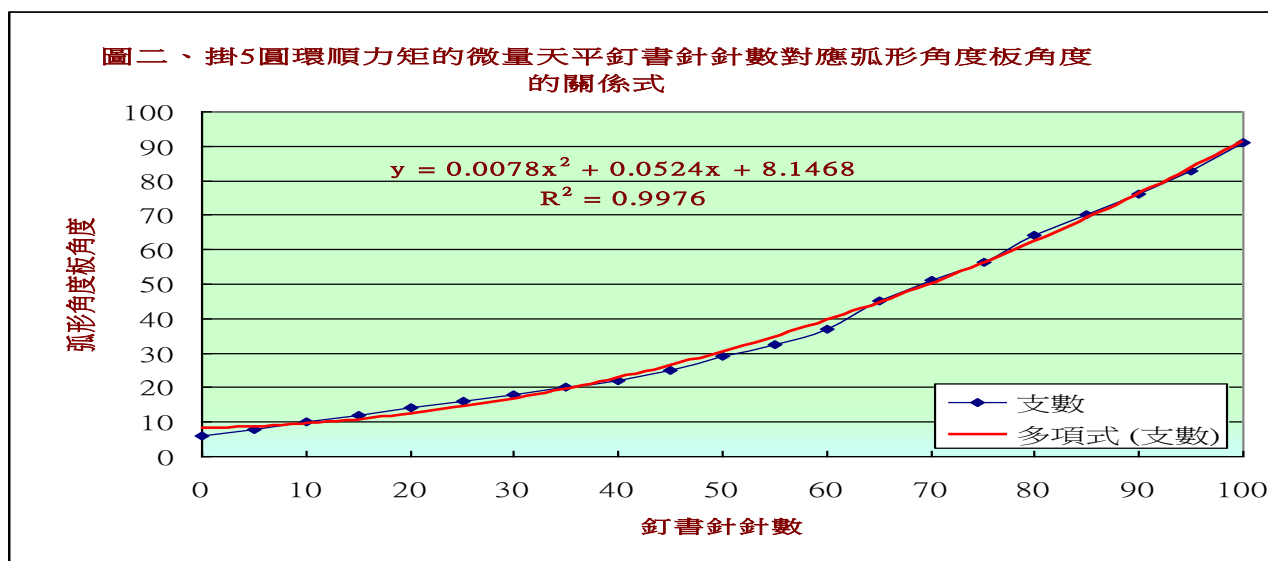
| 測試飽和溶液樣品 | 氯化鈉 | 硫酸亞鐵 | 硫酸銅 | 硫酸鋁 | 硫酸鋅 |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 右側加水滴數(取 5 次的平均值) | 31.0 | 38.0 | 32.0 | 33.0 | 33.67 |
| 圖示方程式計算的表面張力 (dyne/cm) | 64.31 | 81.70 | 66.80 | 69.28 | 70.94 |
| 以力矩實算*修正係數的表面張力(dyne/cm) | 63.17 | 73.35 | 65.20 | 67.64 | 68.61 |

七、在實驗七【微量天平測量各種液體的表面張力】中

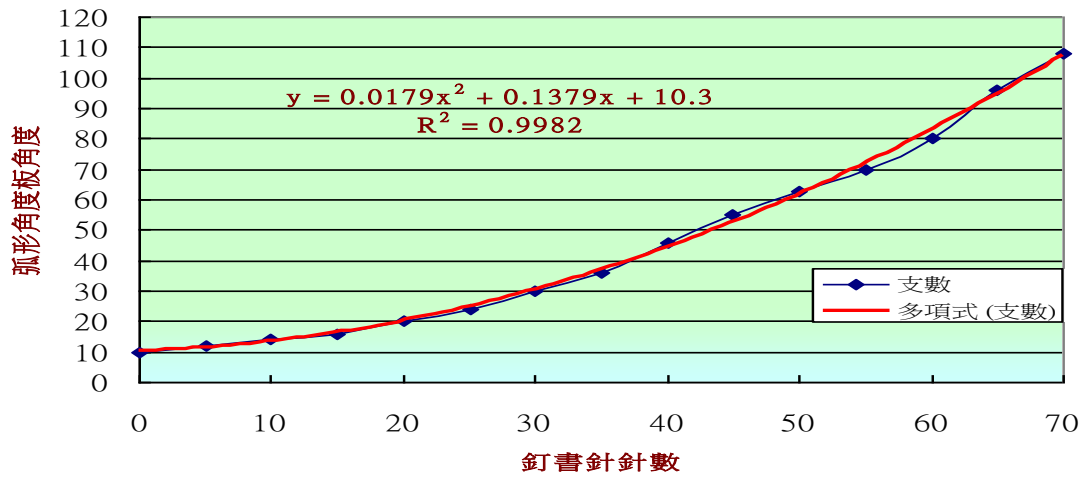
甲、第二代不等臂微量天平不同圓環數的順力矩與逆力矩質量對應角度

| 順力矩所施力的圓環數 | 5 | 4 | 3 | |
|------------|-----|-------|---------------|---------------|
| 訂書針 | 0 | 6° | 10° | 30° |
| 每支針的 | 5 | 8° | 12° | 38° |
| 平均重量 | 10 | 10° | 14° | 50° |
| 為 | 15 | 12° | 16° | 64° |
| 0.0206 克 | 20 | 14° | 20° | 79° |
| | 25 | 16° | 24° | 95°延長線至 94° |
| | 30 | 18° | 30° | 109°延長線至 108° |
| | 35 | 20° | 36° | |
| | 40 | 22° | 46° | |
| | 45 | 25° | 55° | |
| | 50 | 29° | 63° | |
| | 55 | 32.5° | 70° | |
| | 60 | 37° | 80° | |
| | 65 | 45° | 96°延長線至 94° | |
| | 70 | 51° | 108°延長線至 106° | |
| | 75 | 56.5° | | |
| | 80 | 64° | | |
| | 85 | 70° | | |
| | 90 | 76° | | |
| | 95 | 83° | | |
| | 100 | 91° | | |
| | 105 | 98° | | |
| | 110 | 105° | | |

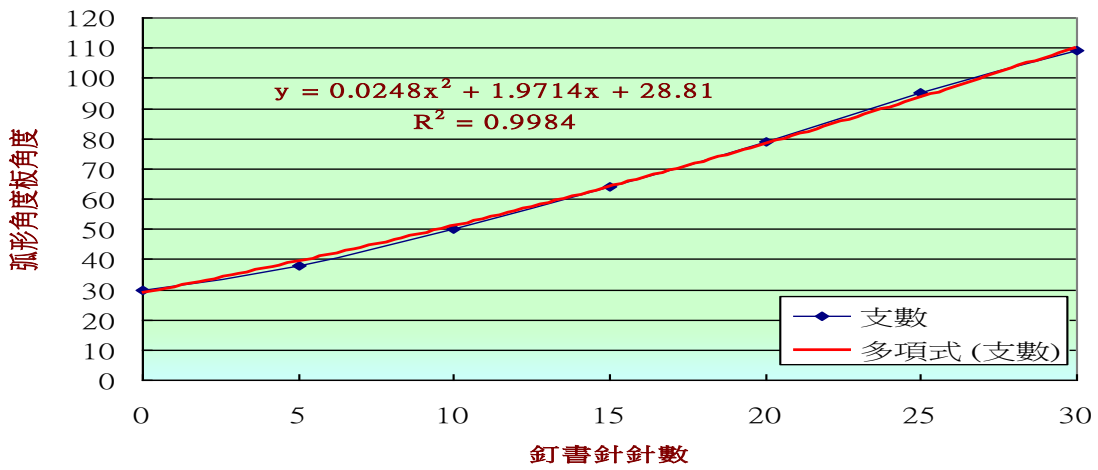
繪製第二代不等臂微量天平不同圓環數的順力矩與逆力矩質量對應角度的關係圖如下(圖二~圖四)：



圖三、掛4圓環順力矩的微量天平釘書針針數對應弧形角度板角度的關係式



圖四、掛3圓環順力矩的微量天平釘書針針數對應弧形角度板角度的關係式



乙、第二代微量天平量測逆滲透水及五種液體的重量

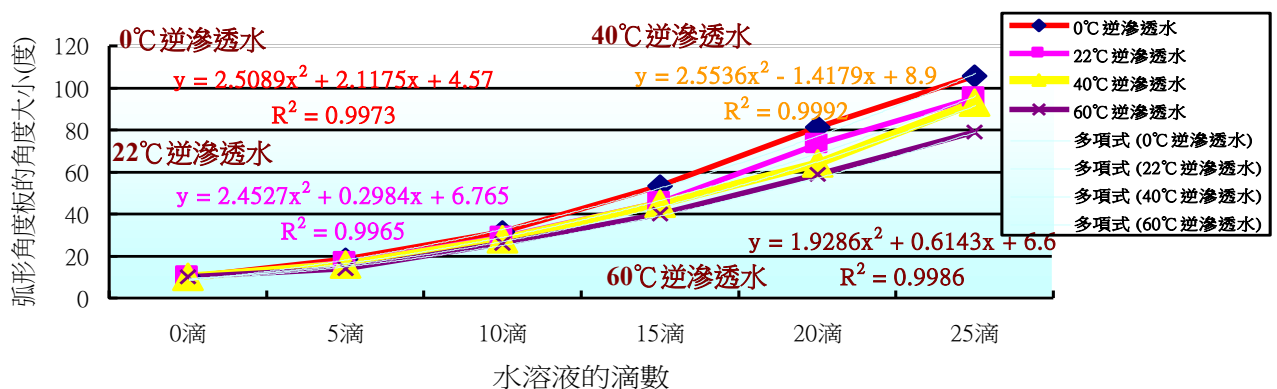
| 液滴種類 | 0 滴角度 | 5 滴角度 | 10 滴角度 | 15 滴角度 | 20 滴角度 | 25 滴角度 |
|------------------------|------------------|---------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|
| 一般自來水 21.5°C | 只掛冰袋微調至 10°，再現性高 | 16°、16°、16°、16°、16° 平均 16° | 28°、28°、26°、26°、28° 平均 27.6° | 40°、42°、42°、46°、38° 平均 41.6° | 60°、60°、64°、65°、68° 平均 63.2° | 80°、77°、80°、90°、80° 平均 79.2°，捨 90° |
| 飽和氯化鈉溶液 | 只掛冰袋微調至 10°，再現性高 | 14°、15°、15°、15°、15° 平均 14.8° | 24°、26°、27°、27°、26° 平均 26.0° | 38°、45°、45°、45°、45° 平均 45°，捨 38° | 60°、64°、64°、65°、65° 平均 63.4° | 84°、90°、94°、93°、92° 平均 92.3°，捨 84° |
| 飽和硫酸銅 | 只掛冰袋微調至 10°，再現性高 | 16°、16°、16°、16°、16° 平均 16.0° | 28°、29°、29°、28°、29° 平均 28.6° | 48°、52°、52°、50°、48° 平均 50.0° | 70°、76°、73°、73°、70° 平均 72.4° | 98°、99°、102°、100°、108° 平均 99.8°，捨 108° |
| 飽和硫酸亞鐵 | 只掛冰袋微調至 10°，再現性高 | 17°、17°、17°、17°、17° 平均 17.0° | 30°、34°、32°、32°、32° 平均 32.0° | 53°、58°、55°、56°、55° 平均 55.4° | 80°、89°、84°、86°、81° 平均 84.0° | 108°、120°、112°、115°、110° 平均 111.4° |
| 飽和硫酸鋁 | 只掛冰袋微調至 10°，再現性高 | 16°、17°、17°、17°、17° 平均 16.8° | 27°、30°、30°、30°、30° 平均 30.0°，捨 27° | 47°、52°、54°、53°、53° 平均 53.0°，捨 47° | 79°、78°、74°、78°、77° 平均 77.2° | 101°、108°、108°、107°、107° 平均 107.5°，捨 101° |
| 飽和硫酸鋅 | 只掛冰袋微調至 10°，再現性高 | 16°、16°、16°、16°、16° 平均 16.0° | 30°、32°、34°、32°、32° 平均 32.0° | 52°、55°、56°、55°、55° 平均 54.6° | 75°、84°、85°、84°、85° 平均 84.5°，捨 75° | 107°、112°、109°、110°、109° 平均 109.4° |
| 逆滲透水 0°C | 10° | 18、19、19、18、19、18 平均 18.5° | 30.5、30.0、31、33、33 平均 31.5° | 49、51、55、56、55 平均 53.2° | 79、80、83、83、81 平均 81.2° | 104、110、106、105、104 平均 105.8° |
| 逆滲透水 22°C | 10° | 17、17、17、17、17 平均 17° | 28、29、30、29、29 平均 29° | 45、45.5、45、47 平均 45.6° | 73、74、73、73 平均 73.25° | 95、95、96、97、93 平均 95.2° |
| 逆滲透水 38~40°C | 10° | 16、16、16、16、16 平均 16° | 27、28、28、28、29 平均 28° | 43、45、46、45、46 平均 45° | 64、66、63、63、64 平均 64° | 93、94、91、93、94 平均 93° |
| 逆滲透水 55~60°C (註) | 10° | 13、14、14、15、14 平均 14° | 25、26、25、26、28 平均 26° | 38、40、41、40、41 平均 40° | 59、61、60、57、58 平均 59° | 76、79、80、79、81 平均 79° |
| 酒精 | 10° | 5 次 12 平均 12° | 14、14.5、14、15、14.5 平均 14.4° | 16、16.5、3 次 17 平均 16.7° | 20、4 次 21 平均 20.8° | 24、26、25、28、28 平均 27.2° |
| 甘油 | 10° | 5 次 18 平均 18° | 5 次 26 平均 26° | 37、39、3 次 38 平均 38° | 60、3 次 59、58 平均 59° | 5 次 84 平均 84° |
| 橄欖油 | 10° | 5 次 13 平均 13° | 5 次 16 平均 16° | 4 次 22、23 平均 22.2° | 27、27、29、28、28 平均 27.8° | 36、35、37、37、36 平均 36.2° |

註：高溫的逆滲透水溫度降得較快，所以，只好重覆操作四次而已。

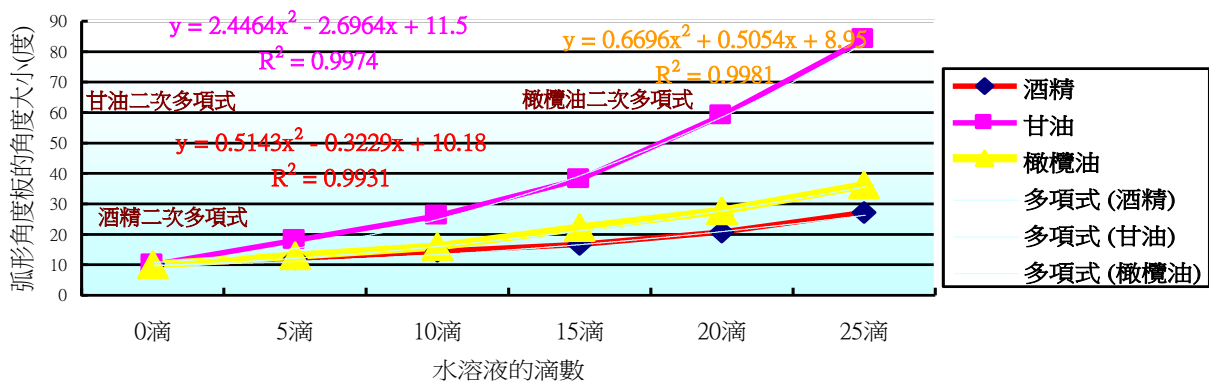
第二代微量天平量測逆滲透水及五種液體的角度(測 5 次的平均值)

| 液滴種類 | 0 滴角度 | 5 滴角度 | 10 滴角度 | 15 滴角度 | 20 滴角度 | 25 滴角度 |
|----------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 0°C逆滲透水 | 10° | 18.5° | 31.5° | 53.2° | 81.2° | 105.8° |
| 22°C逆滲透水 | 10° | 17° | 29° | 45.6° | 73.25° | 95.2° |
| 40°C逆滲透水 | 10° | 16° | 28° | 45° | 64° | 93° |
| 60°C逆滲透水 | 10° | 14° | 26° | 40° | 59° | 79° |
| 酒精 | 10° | 12° | 14.4° | 16.7° | 20.8° | 27.2° |
| 甘油 | 10° | 18° | 26° | 38° | 59° | 84° |
| 橄欖油 | 10° | 13° | 16° | 22.2° | 27.8° | 36.2° |
| 一般自來水 | 10° | 16° | 27.6° | 41.6° | 63.2° | 79.2° |
| 飽和氯化鈉 | 10° | 14.8° | 26.0° | 45° | 63.4° | 92.3° |
| 飽和硫酸銅 | 10° | 16.0° | 28.6° | 50.0° | 72.4° | 99.8° |
| 飽和硫酸亞鐵 | 10° | 17.0° | 32.0° | 55.4° | 84.0° | 111.4° |
| 飽和硫酸鋁 | 10° | 16.8° | 30.0° | 53.0° | 77.2° | 107.5° |
| 飽和硫酸鋅 | 10° | 16.0° | 32.0° | 54.6° | 84.5° | 109.4° |

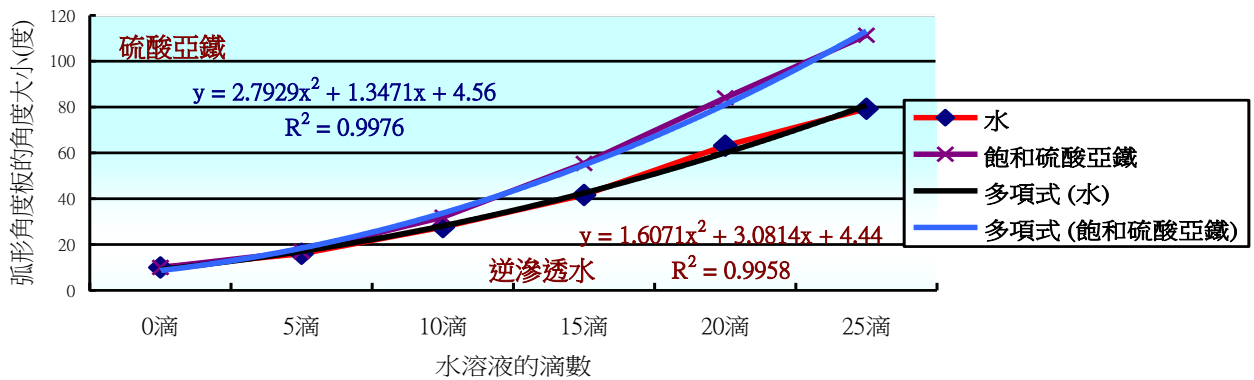
圖五、第二代微量天平量測不同水溫及不同滴數逆滲透水質量對應角度的關係式



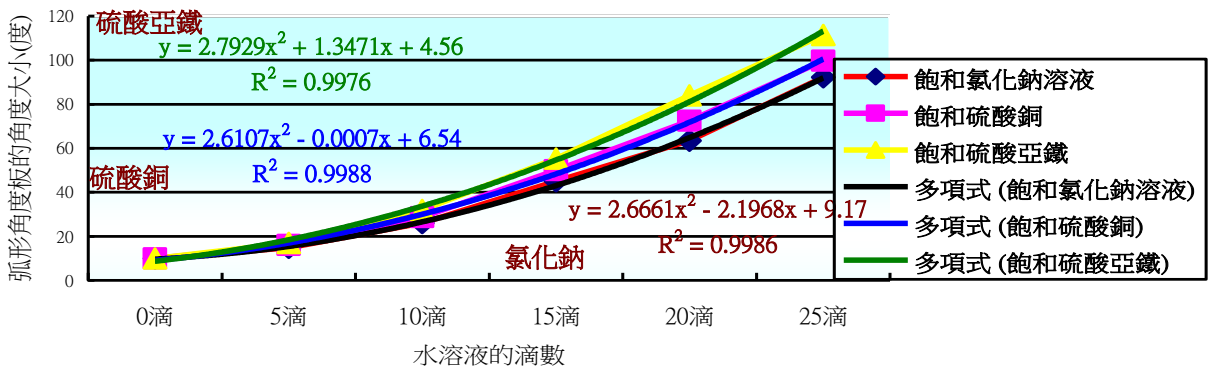
圖六、第二代微量天平量測不同滴數甘油、橄欖油、酒精質量對應角度的關係式



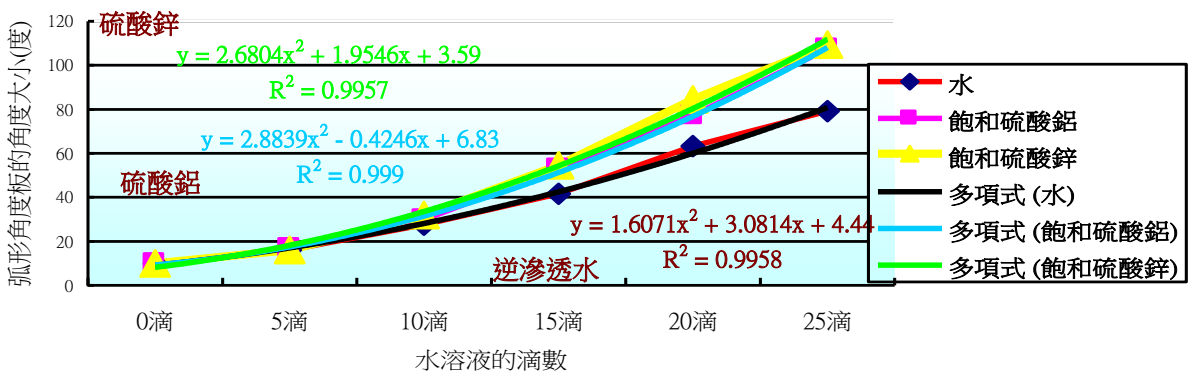
圖七、第二代微量天平量測逆滲透水及硫酸亞鐵水溶液質量對應角度的關係式



圖八、第二代微量天平量測氯化鈉、硫酸銅及硫酸亞鐵水溶液質量對應角度的關係式



圖九、第二代微量天平量測逆滲透水、硫酸鋁及硫酸鋅水溶液質量對應角度的關係式



第二代微量天平量測逆滲透水及五種液體的重量(測 5 次的平均值)

| 液滴數 | 每毫升滴數 | 5 滴質量 | 10 滴 | 15 滴 | 20 滴 | 25 滴 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0°C逆滲透水 | 17.08 | 0.33 | 0.639 | 0.966 | 1.218 | 1.48 |
| 22°C逆滲透水 | 18.17 | 0.287 | 0.587 | 0.872 | 1.152 | 1.35 |
| 40°C逆滲透水 | 19.04 | 0.258 | 0.566 | 0.864 | 1.073 | 1.327 |
| 60°C逆滲透水 | 19.71 | 0.197 | 0.521 | 0.790 | 1.030 | 1.200 |
| 酒精 | 45.75 | 0.133 | 0.209 | 0.278 | 0.392 | 0.548 |
| 甘油 | 22.5 | 0.316 | 0.521 | 0.757 | 1.026 | 1.242 |
| 橄欖油 | 34.7 | 0.165 | 0.258 | 0.43 | 0.56 | 0.728 |
| 一般自來水 | 19.1 | 0.258 | 0.557 | 0.815 | 1.066 | 1.201 |
| 飽和氯化鈉 | 20.5 | 0.221 | 0.521 | 0.864 | 1.068 | 1.32 |
| 飽和硫酸銅 | 22.5 | 0.258 | 0.579 | 0.928 | 1.145 | 1.402 |
| 飽和硫酸亞鐵 | 22.2 | 0.287 | 0.649 | 0.99 | 1.242 | 1.566 |
| 飽和硫酸鋁 | 21.1 | 0.281 | 0.608 | 0.963 | 1.185 | 1.505 |
| 飽和硫酸鋅 | 20.5 | 0.258 | 0.649 | 0.981 | 1.247 | 1.534 |

以上的質量數值為利用四圓環數據，以角度為橫座標、釘書針針數為縱座標，以電腦 Excel 繪圖，所得圖形趨勢線方程式，再以 Excel 試算表插入各角度（甚至角度有小數點都行），算出的質量。

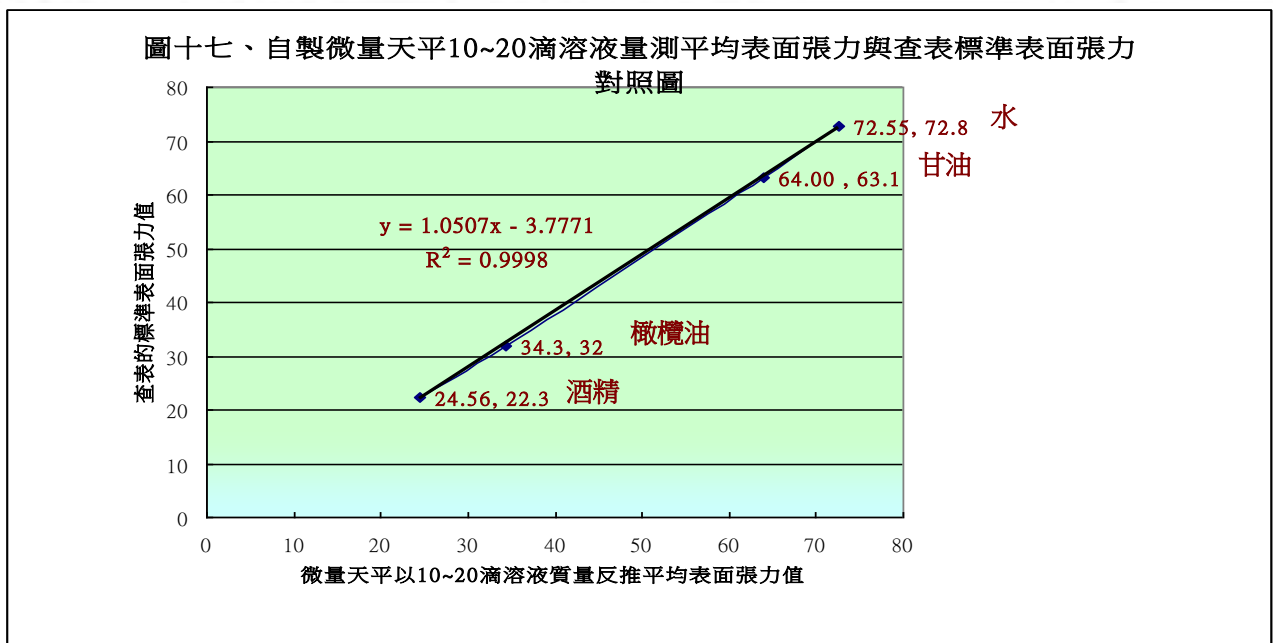
丙、以第二代微量天平量測液滴質量及每毫升液滴數法回推計算出的表面張力值(dyne/cm)

| 液滴種類 | 5 滴 | 10 滴 | 15 滴 | 20 滴 | 25 滴 | 5~25 滴平均 | 10~25 滴平均 | 10~20 滴平均 | 15~20 滴平均 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 0°C水 | 82.35 | 79.73 | 80.36 | 75.99 | 73.87 | 78.46 | 77.49 | 78.69 | 78.18 |
| 22°C水 | 71.62 | 73.24 | 72.54 | 71.87 | 67.38 | 71.33 | 71.26 | 72.55 | 72.21 |
| 40°C水 | 64.39 | 70.62 | 71.87 | 66.94 | 66.23 | 68.01 | 68.92 | 69.81 | 69.41 |
| 60°C水 | 49.16 | 65.01 | 65.72 | 64.01 | 59.89 | 60.76 | 63.66 | 64.91 | 64.87 |
| 22°C水 | 71.62 | 73.24 | 72.54 | 71.87 | 67.38 | 71.33 | 71.26 | 72.55 | 72.21 |
| 甘油 | 78.86 | 65.01 | 62.97 | 64.01 | 61.99 | 66.57 | 63.50 | 64.00 | 63.49 |
| 橄欖油 | 41.18 | 32.19 | 35.77 | 34.94 | 36.34 | 36.08 | 34.81 | 34.30 | 35.36 |
| 酒精 | 33.19 | 26.08 | 23.13 | 24.46 | 27.35 | 26.84 | 25.26 | 24.56 | 23.80 |
| 自來水 | 64.39 | 69.5 | 67.8 | 66.51 | 59.94 | 65.63 | 65.94 | 67.94 | 67.16 |
| 氯化鈉 | 55.15 | 65.01 | 71.87 | 66.63 | 65.88 | 64.91 | 67.35 | 67.84 | 69.25 |
| 硫酸銅 | 64.39 | 72.25 | 77.2 | 71.43 | 69.98 | 71.05 | 72.72 | 73.63 | 74.32 |
| 硫酸亞鐵 | 71.62 | 80.98 | 82.35 | 77.49 | 78.16 | 78.12 | 79.75 | 80.27 | 79.92 |
| 硫酸鋁 | 70.12 | 75.86 | 80.11 | 73.93 | 75.12 | 75.03 | 76.26 | 76.63 | 77.02 |
| 硫酸鋅 | 64.39 | 80.98 | 81.6 | 77.8 | 76.56 | 76.27 | 79.24 | 80.13 | 79.70 |

由上表回推表面張力值為橫座標對應查表的標準表面張力值，各圖表繪製太佔版面，所以，作表列出其線性方程式及相關係數如下：

自製微量天平 5~25 滴溶液量測表面張力與查表標準表面張力對照圖

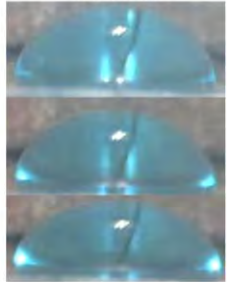
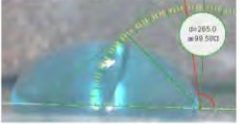
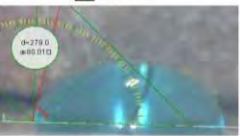


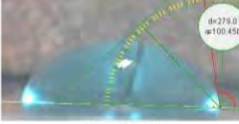
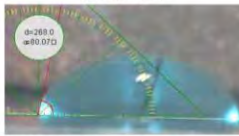

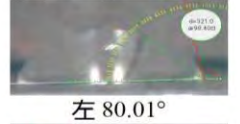

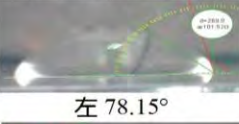

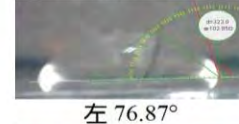


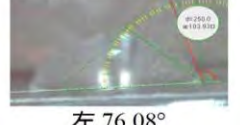

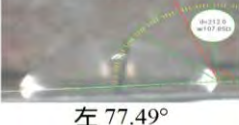

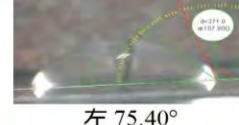

| 圖示編號 | 測表面張力溶液量 | 與查表標準表面張力對照之線性方程式 | 相關係數 |
|------|----------|------------------------|----------------|
| 圖十 | 5 滴 | $y = 1.0332x - 10.527$ | $z^2 = 0.9142$ |
| 圖十一 | 10 滴 | $y = 1.0299x - 3.0496$ | $z^2 = 0.9962$ |
| 圖十二 | 15 滴 | $y = 1.0487x - 3.42.5$ | $z^2 = 0.9961$ |
| 圖十三 | 20 滴 | $y = 1.0653x - 4.4563$ | $z^2 = 0.9989$ |
| 圖十四 | 25 滴 | $y = 1.2437x - 12.477$ | $z^2 = 0.9968$ |
| 圖十五 | 5~25 滴 | $y = 1.0946x - 7.4019$ | $z^2 = 0.9942$ |
| 圖十六 | 10~25 滴 | $y = 1.0934x - 5.7062$ | $z^2 = 0.9994$ |
| 圖十七 | 10~20 滴 | $y = 1.0507x - 3.7771$ | $z^2 = 0.9998$ |
| 圖十八 | 15~20 滴 | $y = 1.0576x - 3.9693$ | $z^2 = 0.9981$ |










八、在實驗八【測量液滴接觸角】中


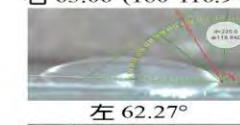












甲、液滴與投影片界面的接觸角 θ

| 液滴 | 一開始的接觸角 θ | 接觸五分鐘後的 θ | 接觸十分鐘後的 θ |
|------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 水 | 右 83.49°(180-96.51) 左 72.94° | 右 72.86°(180-107.14) 左 72.87° | 右 71.71°(180-108.29) 左 72.07° |
| 硫酸亞鐵 | 右 77.92°(180-102.08) 左 81.07° | 右 75.82°(180-104.18) 左 78.51° | 右 71.69°(180-108.31) 左 70.91° |

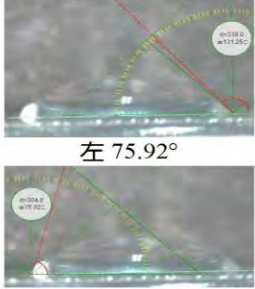
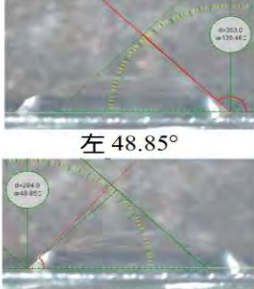
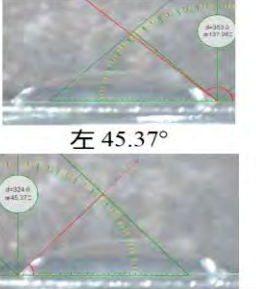
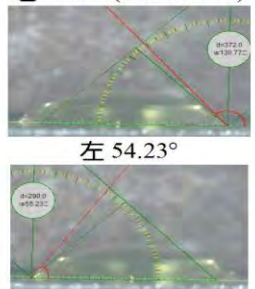
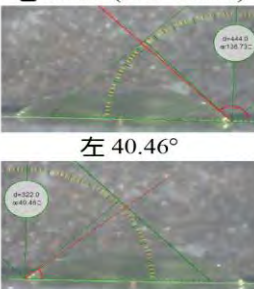
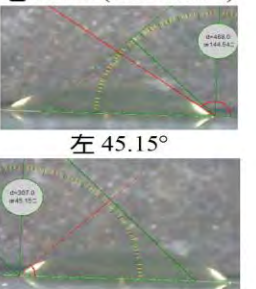
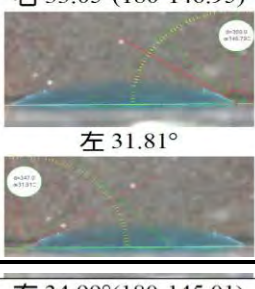
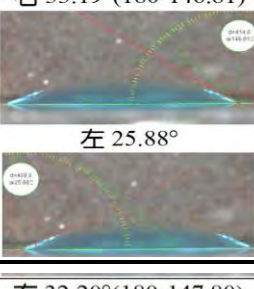
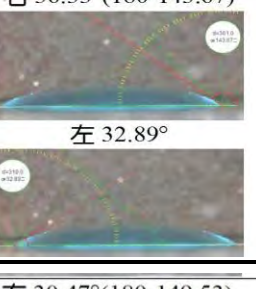
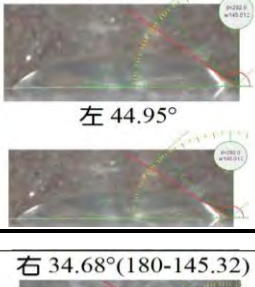
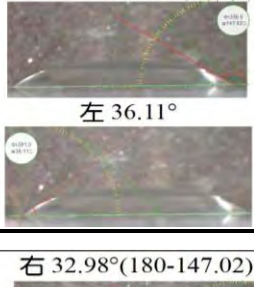
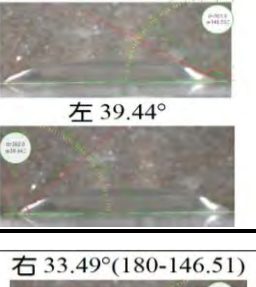
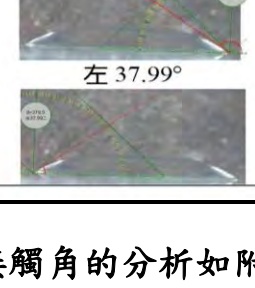
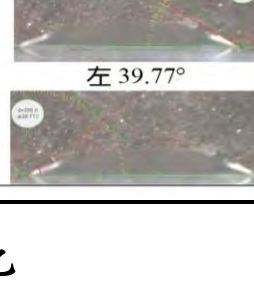
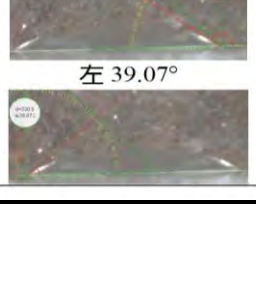
| | | | |
|---|---|---|---|
| <p>硫酸銅</p>  | <p>右 80.42°(180-99.58)</p>  <p>左 80.01°</p>  | <p>右 79.65°(180-100.35)</p>  <p>左 81.97°</p>  | <p>右 79.55°(180-100.45)</p>  <p>左 80.07°</p>  |
| <p>硫酸鋅</p>  | <p>右 81.6°(180-98.40)</p>  <p>左 80.01°</p>  | <p>右 78.48°(180-101.52)</p>  <p>左 78.15°</p>  | <p>右 77.15°(180-102.85)</p>  <p>左 76.87°</p>  |
| <p>硫酸鋁</p>  | <p>右 76.07°(180-103.93)</p>  <p>左 76.08°</p>  | <p>右 72.15°(180-107.85)</p>  <p>左 77.49°</p>  | <p>右 71.90°(180-108.10)</p>  <p>左 75.40°</p>  |

| 液滴 氯化鈉 | 一開始的接觸角 θ | 接觸五分鐘後的 θ | 接觸十分鐘後的 θ |
|---|--|---|---|
|  | <p>右 82.35°(180-97.65)</p>  <p>左 81.90°</p>  | <p>右 76.72°(180-103.28)</p>  <p>左 78.15°</p>  | <p>右 75.14°(180-104.86)</p>  <p>左 77.89°</p>  |

乙、液滴與投影片較粗糙界面的接觸角 θ

| | | | |
|---|--|--|--|
| <p>液滴 水</p>  | <p>一開始的接觸角 θ</p> <p>右 63.06°(180-116.94)</p>  <p>左 62.27°</p>  | <p>接觸 3 分鐘後的 θ</p> <p>右 48.37°(180-131.63)</p>  <p>左 56.10°</p>  | <p>接觸 4 分鐘後的 θ</p> <p>右 46.72°(180-133.28)</p>  <p>左 49.02°</p>  |
| <p>硫酸亞鐵</p>  | <p>右 68.49°(180-111.51)</p>  <p>左 78.07°</p>  | <p>右 47.35°(180-132.65)</p>  <p>左 61.86°</p>  | <p>右 46.4°(180-133.60)</p>  <p>左 55.38°</p>  |

丙、液滴與玻片界面的接觸角 θ

| 液滴 | 一開始的接觸角 θ | 接觸五分鐘後的 θ | 接觸十分鐘後的 θ |
|--------|---|--|---|
| 水 | 右 48.75°(180-131.25) 左 75.92°  | 右 44.54°(180-135.46) 左 48.85°  | 右 42.94°(180-137.06) 左 45.37°  |
| 硫酸亞鐵 | 右 49.23°(180-130.77) 左 54.23°  | 右 43.27°(180-136.73) 左 40.46°  | 右 35.46°(180-144.54) 左 45.15°  |
| 第二次硫酸銅 | 右 33.05°(180-146.95) 左 31.81°  | 右 33.19°(180-146.81) 左 25.88°  | 右 36.33°(180-143.67) 左 32.89°  |
| 硫酸鋅 | 右 34.99°(180-145.01) 左 44.95°  | 右 32.20°(180-147.80) 左 36.11°  | 右 30.47°(180-149.53) 左 39.44°  |
| 硫酸鋁 | 右 34.68°(180-145.32) 左 37.99°  | 右 32.98°(180-147.02) 左 39.77°  | 右 33.49°(180-146.51) 左 39.07°  |

甲~丙液滴與界面接觸角的分析如附件乙

陸、討論

一、在研究一中

- 1.比較硫酸亞鐵及硫酸銅溶液的攀晶結果，很顯然地硫酸亞鐵溶液的攀晶速率比硫酸銅的快。
- 2.硫酸亞鐵則因結晶所產生的毛細通道最多攀緣結晶速率最快，水的蒸發速率也是最快的，第八天時就幾乎已無殘液量，非常特別的是，硫酸亞鐵的結晶居然可以產生一層層片狀的結晶，可能是結晶表面的毛細通道並非全為直線，一旦產生斜線或曲線，結晶粒子推積的速率就會不同，結晶分子就可能排列成凸起的曲面。
- 3.硫酸銅則可能分子間的內聚力較強，所以第九天溶液全乾時，結晶時的分子排列可以聚集形成大的菱形塊狀。我們還發現，當飽和溶液中有塊狀結晶形成後，殘液量濃度降低(顏色看起來較淺)，可能反而使溶液有利於攀晶。
- 4.實驗二中，我們發現不同間距平行玻板與液面接觸，呈現中間液面略下凹，而液固接觸的地方向上拉高，且平行玻板間距愈小，拉高的程度愈明顯，這表示接觸角的角度愈小。由此可知，不同間距的平行玻板設計可使溶液與容器的接觸角產生改變而順利攀晶。
- 5.實驗三中，即使將投影片用砂紙磨擦出細痕通道，仍無法改變硫酸銅不易附著在投影片壁面攀晶的事實，而且最快攀晶的地方是投影片與玻片接合的窄窄空隙中，由此可證明毛細現象影響攀晶的事實。
- 6.實驗四之丙-1 實驗中，用一滴來測試，果然液滴結晶分佈有呈現分散的畫面，所以磁場對電解質溶液的結晶是有效的！
- 7.實驗四之丙-2，實驗經 2 小時後，水份蒸發速率且結晶速率最快者為液滴左右側為 NS 異名極磁場且承載液面為玻片 > NN 同名極 > SS 同名極 > 無磁場對照組。
- 8.實驗四之丙-3 實驗中，硫酸銅溶液(到第五天才結晶)的攀晶速率很明顯小於硫酸亞鐵溶液(不到三天就結晶)。且硫酸銅的結晶由底部開始，而硫酸亞鐵溶液竟先與杯壁成環狀的結晶。磁場的確可對這兩種溶液造成影響：上下方異名極的硫酸銅結晶竟成分離的兩塊，而同名極 NN 或 SS 的硫酸銅結晶竟成堆疊成上下方連在一起的一塊；對照組無磁場作用由此可知，硫酸銅形成大塊結晶後，殘留液體濃度變低才能產生攀晶，內聚力大的液體在高濃度時，可能不利於攀晶。丙之四實驗中，硫酸銅攀晶速率大小為：異名極相對 > NN 或 SS 同名極相對 > 無磁場對照組。
- 9.實驗六之丁之實驗中，由結晶面積大小可知，曲面的確影響結晶分佈的結果。其中培養皿對照組分佈面積大小：硫酸亞鐵(玻璃培養皿) > 硫酸銅(玻璃培養皿) > 硫酸亞鐵(塑膠培養皿) > 硫酸銅(塑膠培養皿)，其中()內為承載液體接觸面
曲面 1.9mL 液量分佈面積大小：雙凹透鏡 > 凹透鏡 > 凸凹透鏡，且全是硫酸亞鐵 > 硫酸銅

錶玻璃曲面 3.0mL 溶液量分佈面積大小：硫酸亞鐵 > 硫酸銅

實驗結果，還是因為硫酸銅液體的內聚力強，加上接觸角變化不大才而形成液滴分佈面積小，同體積量的硫酸亞鐵液體分佈面積則較大。

10. 原本各曲面的結晶形，我先用投影片設計同方格大小的格子表面，再把承載結晶的曲面放到格子上，準備在電腦中繪製已知規格的格線來對照，利用不規則面積方格法來計算面積大小，但這樣實在很麻煩。後來，才知道有 Image J 的面積計算程式可利用，所以，我就在結晶旁放一支直尺，以等高的相機距離進行拍攝，利用此電腦程式算出準確的不規則面積。



二、在研究二中

1. 毛細管垂直插入液中時，如果液體與玻璃的附著力大，使液體與玻璃間的**接觸角**變得很小，在 θ 的測量上恐會相當不容易，可以想像誤差量應該不會太小。所以，才有 2008 年國際科展物理與太空科學科「表面張力測量新方法-連通管原理的再應用」等作品陸續出現。

2. 影響攀晶速率的可能原因的**毛細管法**反推液體的表面張力似乎可行：由於液體的表面張力不同，使液體在管中產生升降不同的液面高度。

管內液柱的上升高度 $h = 2T \cos\theta / \rho g r$ ， $\therefore T = (h \rho g r) / (2 \cos\theta)$ 。其中 T ：表面張力 (dyne/cm)、 r ：毛細管半徑 (cm)、 θ ：液體和玻璃的接觸角、 ρ ：液體密度 (g/cm^3)、 h ：毛細管內液面上升高度 (cm)。問題是，在毛細管垂直插入液中時，如果液體與玻璃的附著力大，使液體與玻璃間的**接觸角**變得很小，在 θ 的測量上恐會相當不容易，可以想像誤差量應該不會太小。所以，才有 2008 年國際科展物理與太空科學科「表面張力測量新方法-連通管原理的再應用」等作品陸續出現。

3. 我們最後再仔細研究的結果是：毛細管中的液柱所受表面張力的總合 ($=F \cos\theta$) 與液柱的重量 (mg) 可以達靜力平衡， $F \cos\theta = mg$ ，那如果我們用滴管滴出液體，液滴的重量也應該會和表面張力平衡，而且優點是不用去量測接觸角！

4. 然而，是否不同液體的表面張力不同，會產生不同的滴數而能反推表面張力呢？我們立刻用不同的液體來滴滴看，果真是如此！問題是：

水滴重量 = 水滴體積 \times 水滴密度 \times 重力場強度 = $4/3\pi R^3 \rho g$

水滴與滴管管口的接觸形狀為圓形，接觸長度恰為滴管內部圓周長 = πD

\therefore 向上的拉力 = $T \times \pi D$

平衡時 $\pi T D = (4/3\pi R^3 \rho) g$ ，每滴質量 $(4/3\pi R^3 \rho) = \pi T D / g$

則可由已量測的液滴質量回推表面張力為： $T = \text{每滴質量} (4/3\pi R^3 \rho) \times g \div (\pi D)$

也就是要能精確測量液滴的質量才行！

三、在研究三中

1. 成本不到 30 元的改良第二代輕量天平以 1/2 冰袋集中承載逆滲透水滴當成液態砝碼。可測出液滴數與查表標準表面張力之間呈線性關係： $T(\text{dyne/cm}) = 2.4834X - 12.673$ ，相關係數高

達 0.9985，證明此獨創自製的表面張力儀雖然便宜，但設計結果已可被採用。

- 2.但我們對於實驗須清洗金屬圓環、培養皿及液體用量多不是很滿意，尤其在以圖示方程式計算的表面張力和以力矩實算的結果差異頗大，得乘上自己設定的修正係數來對照的方式並不客觀。

四、在研究四中

- 1.更便宜的第二代不等臂微量天平及配合擺動角度所需的弧形曲線板，可利用吊掛不同的圓環數來操控不同的承載物以落在更大的弧形角度範圍內，以提高測量的準確度。各液體 5 滴測得的角度不易有明顯差距，25 滴測得的角度對應質量又差距太大，所以，取 10~20 滴滴數的質量，以 $T = \text{每滴質量} \times g \div (\pi D)$ 算式回推表面張力值後再算平均，與查表標準張力之間呈線性關係： $T(\text{dyne/cm}) = 1.0507 X - 3.7771$ 的斜率 1.0507 與 1 頗為接近，且相關係數高達 0.9998 可知，設計及實驗成功！

五、在研究五中

- 1.以八爪可調式角架支撐 Dino-Lite 顯微鏡頭的設計，成功地組裝側照液滴接觸角的裝置，且利用 MB-Ruler 電腦角度板準確地測出不同液滴在不同的承載接觸面的接觸角(我還很細心地在液滴與接觸面的交點拉一條淺綠色直線，這樣在對應角度板時會更容易看得準)，終於發現了為什麼硫酸亞鐵表面張力測定值最大，以玻片當承接液滴的接觸面時，不是因為接觸角比較小，所以才容易攀晶，而是因為它的「**接觸角變化最大**」才是攀晶的主因。

柒、結論

一、獨創設計：

- 1.改良第二代輕量天平→30 元不到
- 2.第二代不等臂微量天平及弧形曲線板→20 元不到
- 3.測液滴質量回推表面張力新方法的實驗設計
- 4.支撐圓筒可攜式顯微鏡頭的八爪可調式角架
- 5.組裝側照液滴接觸角的裝置
- 6.平行玻板及水平、垂直磁場裝置設計

容易普及化的設計

二、實驗結果與發現：

- 1.集中承載待測液體或液態砝碼輕質容器：1/2、1/4 冰袋吊盤。
- 2.找到便宜、規格齊一的輕型砝碼(手牌 10 號釘書針平均每支針為 20.6mg，約為 200g 砝碼盒內小型砝碼 100mg 的 1/5)可做為校正水滴質量的材料。
液態砝碼→水滴及輕型砝碼→手牌 10 號釘書針。
- 3 改良第二代輕量天平以 1/2 冰袋集中承載逆滲透水滴當成液態砝碼。可輕易操控、比較觀察各液體表面張力的大小，所測出的液滴數與查表標準表面張力之間呈線性關係：
 $T(\text{dyne/cm})=2.4834 X -12.673$ ，相關係數高達 0.9985
- 4.第二代不等臂微量天平及配合擺動角度所需的弧形曲線板，以
 $T = \text{每滴液體質量} (4/3\pi R^3 \rho) \times g \div (\pi D)$ 算式回推表面張力值與查表標準張力之間呈線性關係： $T(\text{dyne/cm})=1.0507 X -3.7771$ ，相關係數高達 0.9998 設計成功！
- 5.以鐵粉取代重金屬硫酸鹽形成的硫酸亞鐵鹽結晶形為層狀結構。
- 6.找到容易攀晶的主因→液體與接觸周邊接觸角變化大。
- 7.除了提高溫度外，找到可改變接觸角及攀晶速率的條件→
 - (1)改變液面間距、傾斜及接觸面曲度。
 - (2)外加磁場，且水平磁場效果優於垂直磁場效果。

三、推廣應用價值：

- 1.便宜、規格齊一的「手牌 10 號釘書針」可做為輕型砝碼，逆滲透水滴當成液態砝碼。
- 2.第二代輕量天平可輕易操控、比較觀察各液體表面張力的大小。
- 3.第二代不等臂微量天平及弧形曲線板便宜、校正容易、偵測液滴質量倒推表面張力法精確，可做為實測表面張力的新方法。
- 4.校園基礎實驗研究(例如：專測各種液體質量、密度及表面張力、接觸角)可普及進入微小化及環保減廢的階段。

捌、參考資料：

1. 聯合報行政院國科會補助新聞中的科學文教版專題「微孔珊瑚暗藏地震密碼」的報導
2009.1.14
2. http://resources.edb.gov.hk/~s1sci/R_S1Science/sp/ch/syllabus/unit5/act-byosas.htm 製作鐘乳石
和石筍
3. 鐘乳石生長的數學模型 編輯 John C. H. Chen 報導 <http://www.sciscape.org>
原始論文 Short et al., Physical Review Letters, 14 January 2005
4. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/surten.html>
5. 蓮花的自潔功能與奈米科技的應用 徐世昌，科學發展月刊，354 期
6. 表面張力的應用 柯賢文，科學發展月刊，411 期
7. 臺灣 2008 年國際科展 物理科 表面張力測量新方法-連通管原理的再應用
8. 物理雙月刊 表面張力測定儀
9. <http://en.wikipedia.org/wiki/Portal:Physics>
10. University Physics, 12th ed (H. D. Young & R. A. Freedman.)
11. Fundamentals of Physics, Fifth Edition (by David Halliday, Robert Resnick, Jearl Walker)
12. 臺中教育大學 科教網站 微形天平製作
13. 國立台灣師範大學科學教育中心(1999): 高級中學物理實驗手冊第二冊，國立編譯館出版。
14. 南一版新超群物質科學物理篇 陳忠城編著 南一 2005
15. 高中物理 表面張力單元 龍騰文化出版
16. 國中自然課本第四冊第六章力、第五冊第二章第四節力矩與槓桿、第三章功與能

【評語】 030104

利用攀晶現象，探討表面張力與接觸角的關係，內容活潑有趣且實驗設計用心，作者表達能力佳，內容主題適切，建議對於晶體結構能深入探討，作者積極富創意並努力完成作品，科學態度良好。