

中華民國第42屆中小學科學展覽會

::: 作品說明書 :::

高中-物理科

科 別：物 理 科

組 別：高 中 組

作品名稱：你看！有流星！

關 鍵 詞：終端速度、基本電荷

編 號：040114

學校名稱：

臺中市立忠明高級中學

作者姓名：

陳烜君、吳怡樺、張桓熏、林詩容

指導老師：

游淑婷、蘇素冠



一、研究動機

1.6×10^{-19} 是一個極小的數字，而且一直到現在都還正確無誤，很好奇它到底是用什麼方法測得，剛好又在課本上看到簡略的介紹，覺得原理不難懂，又聽老師說這實驗不好做因為很難觀察。不過我卻發現油滴實驗在歐美國家的營隊活動裡是常出現的主題，但在台灣卻是高中碰不到的，所以便想一探這實驗的究竟，且希望能讓它變的普遍化。

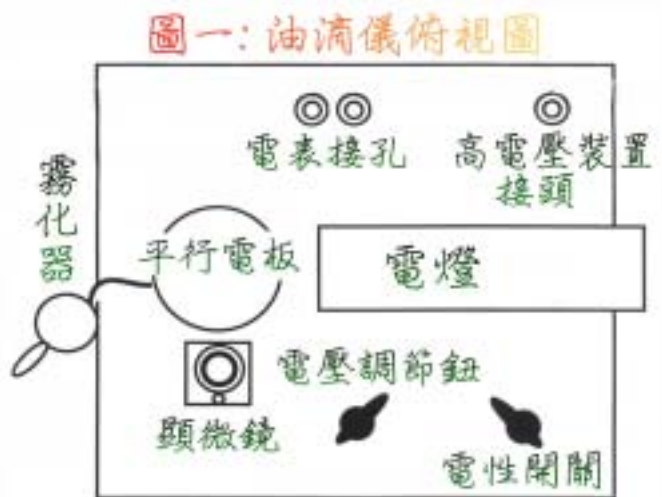
二、研究目的

- (一) 驗證電荷的不連續性及基本電荷的大小呈一整數倍。
- (二) 探討不同因素對數值之影響。
- (三) 比較不同方法使實驗能更易操作。

三、研究設備及器材

- (一) 油滴儀（型號：HME-200949）：其配置如下圖一。

- 1、電表接孔。
- 2、高電壓裝置接頭。
- 3、平行電板：
產生電場，使噴入之噴劑能受電場影響。
- 4、電燈：6V，3A。
- 5、霧化器：
使噴劑噴出能呈顆粒較小的霧氣狀，但因原廠提供的霧化器效果不佳，後有改良（如下圖二）。



- 6、顯微鏡：內附刻度，每3格為實際距離0.05 cm，焦距已定。
- 7、電壓調節鈕：由此調節電壓大小。
- 8、電性開關：調節正電、負電或不加電壓的開關。

- (二) 電源供應器 (型號：H.S)：50V，5A。
- (三) 高電壓發生器：500V。
- (四) 三用電錶 (型號：YH-380)：1000V。
- (五) 噴劑：沙拉油、水溶性 PU。
- (六) 溫度計。
- (七) 碼錶。

實驗裝置如以下圖二、圖三。



← 圖二：
經多次改良後效果超讚的霧化器。

↓ 圖三：
密立根實驗全裝置圖。



四、研究原理及步驟

(一) 原理：(所有物理量採 C.G.S 制)

圖四：一般狀態

一般狀態下，一顆粒在一介質中下降時所受到的作用力有：**重力**向下、**空氣浮力**向上以及介質對於顆粒的**黏滯力**。我們假設一質量很小的顆粒進入一介質後，很快的將達到**終端速度** v_d 下降，故此時合力為零。可由 **Stoke's law** (註 1) 得知，顆粒在介質中所受的黏滯力大小會與終端速度成正比，而此顆粒下降仍會排開空氣，故浮力不可省(如右圖四)，即可列出下式：

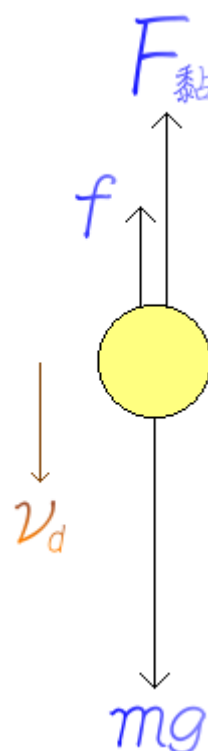
$$mg = kv_d + f \quad \dots\dots\dots 1$$

mg ：重力。

kv_d ：黏滯力。

k ：為比例常數。

f ：空氣浮力。



若賦予兩平行電板間一足夠之電場 E ，則顆粒將以一新的**終端速度** v_E 上升(如下圖五)，即：

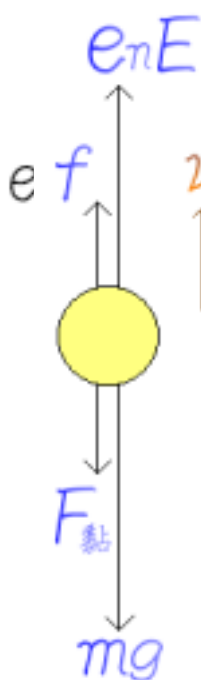
$$e_n E - (mg - f) = kv_E \quad \dots\dots\dots 2$$

圖五：加電場

e_n ：顆粒所帶電量，即所求。

整理 1, 2 後可得：

$$e_n E + e f = (v_d + v_E) \quad \dots\dots\dots 3$$



根據 **Stoke's law** 我們可以知道，比例常數 $k = 6\pi a \eta$ ，式中的 a 為顆粒半徑、 η 是黏滯係數；而電場 $E = V/300d$ ， V 為加入的電壓值、 d ：平行電板之距離，300 則是單位換算之值。利用此二關係式，可將式 3 改寫成

$$e_n = \frac{6\pi a \eta \cdot (v_d + v_E)}{(V/300d)} \quad \dots\dots\dots 4$$

但因顆粒半徑 a 值太小無法測量，故可利用其密度得知其質量與體積的關係。將顆粒當作一半徑為 a 之球體，其質量為：

$$m = \frac{4}{3} \pi a^3 \sigma \quad \sigma: \text{噴劑密度} \quad \dots\dots\dots 5$$

又空氣浮力為：

$$f = \frac{4}{3} \pi a^3 \rho g \quad \rho: \text{空氣密度} \quad \dots\dots\dots 6$$

利用此關係及 4，5 帶回 1，即得：

$$\frac{4}{3} \pi a^3 (\sigma - \rho) g = 6 \pi a \eta v_d \quad \dots\dots\dots 7$$

$$\therefore a = \sqrt{\frac{9 \eta v_d}{2 g (\sigma - \rho)}} \quad \dots\dots\dots 8$$

用式 8 算出半徑 a 後，帶回式 4 即可算出基本電荷 e_n 之值。

若於有加電場的狀況下，慢慢調整電壓，使顆粒靜止，則 $v_E = 0$ ，帶入式 4 可推出下式：

$$e_n = \frac{6 \pi a \eta v_d}{(V/300d)} \quad \dots\dots\dots 9$$

註：(1) **Stoke's law**：是涉及落體通過流體介質之情形。落體經過流體介質之重力與流體本身的摩擦力相反，此摩擦力（或稱黏滯力）隨落體速度增加而增加（即成正比），當此球形落體以定速度運

動，其黏滯力可表示成：

$$F_{\text{黏}} = 6\pi a \eta v \quad (a: \text{球體半徑}、\eta: \text{黏滯係數}、v: \text{某一定速度})。$$

由此可知，黏滯力大小為一個常數

乘上某定速度，而此常數大小由關係式中可得為： $6\pi a \eta$ 。

(2) 所求得之 e_n 單位為 e. s. u.

(3) e 之標準值 $= 4.803 \times 10^{-10}$ e. s. u. ($= 1.602 \times 10^{-19}$ coul.)

(4) 本實驗已知數據：

a. $g = 980 \text{ cm/s}^2$

b. $\sigma = \text{沙拉油} : 9.1625 \times 10^{-1} \text{ g/cm}^3$

水性 PU : 1 g/cm^3

c. $\rho = 1.29 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$

d. $\eta = 1.872 \times 10^{-4} \text{ g/cm} \cdot \text{s} (30^\circ\text{C})$

e. $d = 1 \text{ cm}$

(二) 步驟

由以上可推得，未知數據有 e_n 、 a 、 v_d 和 v_E 。而 e_n 為所求、 a 值可利用式 8 算出，所以待測值就只剩 v_d 和 v_E 。

因為我們想讓實驗更容易操作，故以三種不同的方法測量待測值，並比較其準確度及簡易程度。

1、準備工作：

1、開始實驗時，先將電燈連接到電源供應器；高電壓發生器和高電壓裝置接頭相接；於電表接孔插上三用電錶；霧化器則接到平行電板內（若需更換「噴劑」則要先清洗霧化器內外，再以「封口膜」密封）；碼錶需歸零。

2、打開電源供應器，電壓調至 6V 使燈亮。將電燈調焦至能清楚看見顆粒的位置；若仍不見顆粒，可將平行電板上蓋打開，調至有一條光線經過其中，電燈焦距就算調整完畢（因顯微鏡焦距已固定，所以不需再調焦）。而此步驟之作用：利用光的散射性質，使顆粒成為亮點以進行觀察。

3、等待箱中溫度升高至欲觀察之溫度，若需至低溫則在此步驟加入乾冰或冷劑（此步驟是為了固定儀器所在的環境之溫度）。溫度確定後便可開始進行觀測。

2、方法一：利用不同顆粒，分開測得 v_d 和 v_E 。

一般狀態 (v_d)

(1) 把噴劑噴入平行電板，利用顯微鏡幫助觀察顆粒運動情形（雖然在顯微鏡的視野下應呈上下左右皆為顛倒之像，但因經過一平面鏡反射，所以仍為正向只是左右相反，但對我們要觀察的顆粒並無影響）。

(2) 在顯微鏡的視野下，可見到顆粒運動之情形（如繁星）。挑選較小的顆粒進行觀測。

加電壓 (v_E)

(1) 打開高壓發生器，利用電性開關選擇「+」或「-」電後，調整電壓調節鈕，將電壓調至預測電壓值（此電壓值最小應為有顆粒向上運動之值，可由三用電錶得知）。電壓確定後，將噴劑噴入即可開始觀。

(2) 在顯微鏡的視野下，可見到顆粒運動之情形（應看到向上、向下皆有）。務必挑選「向上運動」的顆粒進行觀測且大小盡量一致，以減小誤差值。

END：分別記錄時間，再換算出實際距離，距離 $\div$ 時間即可得 v_d 與 v_E 。

3、方法二：利用 **同一顆粒**，測得 **一組** v_d 和 v_E 。

(1) 將電壓調至預測之值（在此電壓下需有顆粒向上運動）。



(2) 選定一向上顆粒後，請隊友協助快速的記下距離與時間，即可得 v_E 。



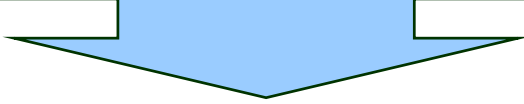
(3) 記錄後，立刻將電壓歸至於零（此時該顆粒應向下運動），再記錄該顆粒向下的距離與時間，所得為 v_d 。



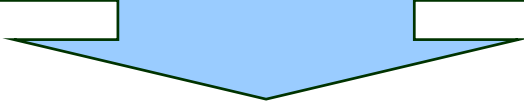
END：若於該顆粒向下掉時，不幸跟丟或遺失，則上記之 v_E 就 **不可採用**。此時必須重頭紀錄一組新數據，如此反覆觀測數個。

4、方法三：利用 **同一顆粒**，使其 **靜止**，測得一組電壓值與 v_d 。

(1) 將電壓調至預測之值（在此電壓下需有顆粒向上運動）。



(2) 找定一向上運動的顆粒後，緩緩調整電壓使其最後能靜止。



(3) 紀錄其靜止時的電壓值，同時將高壓電發生器的開關關掉，則原靜止的顆粒會向下運動，再記下向下的時間與距離（得 v_d ）。



END：若於該顆粒向下掉時，不幸跟丟或遺失，則上記之電壓值就**不可採用**。此時必須重頭紀錄一組新數據，如此反覆觀測數個。

五、結果與討論

(一) 結果：只列出最後算出的 e_n 值，單位為 e.s.u。

1、【表 1】：方法一之結果，兩種噴劑皆取 200 顆之平均值。

噴劑 \ 電場	400V	300V	200V
沙拉油	5.59×10^{-9}		
PU	1.97×10^{-8}	1.44×10^{-8}	2.03×10^{-8}

←註：沙拉油在
300V & 200V
下，無顆粒反向

2、【表 2】：方法二之結果，僅列舉出 10 顆。

噴劑 & 電場 \ 顆數		1.	2.	3.	4.	5.
油	400V	5.80×10^{-9}	5.91×10^{-9}	3.97×10^{-9}	3.70×10^{-9}	3.55×10^{-9}
PU	400V	5.18×10^{-9}	4.48×10^{-9}	4.70×10^{-9}	4.40×10^{-9}	4.51×10^{-9}
	300V	4.68×10^{-9}	5.39×10^{-9}	5.83×10^{-9}	5.82×10^{-9}	5.67×10^{-9}
	200V	6.61×10^{-9}	6.47×10^{-9}	6.95×10^{-9}	9.78×10^{-9}	10.1×10^{-9}
噴劑 & 電場 \ 顆數		6.	7.	8.	9.	10.
油	400V	3.99×10^{-9}	5.10×10^{-9}	4.52×10^{-9}	4.86×10^{-9}	4.56×10^{-9}
PU	400V	4.69×10^{-9}	4.15×10^{-9}	4.06×10^{-9}	4.07×10^{-9}	5.47×10^{-9}
	300V	7.40×10^{-9}	6.19×10^{-9}	7.37×10^{-9}	6.80×10^{-9}	7.08×10^{-9}
	200V	10.8×10^{-9}	10.9×10^{-9}	11.7×10^{-9}	11.0×10^{-9}	12.3×10^{-9}

3、【表 3】：方法三之結果，僅列舉出 10 顆。

顆數 噴劑	1.	2.	3.	4.	5.
沙拉油	1.68×10^{-9}	2.59×10^{-9}	4.55×10^{-9}	2.82×10^{-9}	4.41×10^{-9}
PU	6.52×10^{-8}	6.61×10^{-8}	5.49×10^{-8}	5.66×10^{-8}	8.28×10^{-8}
顆數 噴劑	6.	7.	8.	9.	10.
沙拉油	4.21×10^{-9}	5.07×10^{-9}	2.83×10^{-9}	3.38×10^{-9}	2.09×10^{-9}
PU	6.78×10^{-8}	5.63×10^{-8}	5.76×10^{-8}	6.14×10^{-8}	4.92×10^{-8}

(二) 討論：

1、摩擦起電的帶電量應小於 1 微庫倫，所以我們做出來的數據還在可接受範圍內。但實驗的誤差還是不可忽略，而造成系統誤差的原因有很多，如：

(1) 儀器的精密度。

Ex：使用碼表與數字型計時器的準確度就有差、用肉眼觀察或利用機器觀測也相差甚多，另外如：顯微鏡的放大倍率、所選用噴劑的穩定性.....等等，都會影響到算出來的結果。

(2) 實驗假設的理想狀態和帶入公式的常數。

Ex：a、以黏滯係數而言，此一常數適用於乾燥的理想氣體下，且會隨溫度增高而變大，故不能 100% 確定所帶入之常數一定符合每一個顆粒的環境。

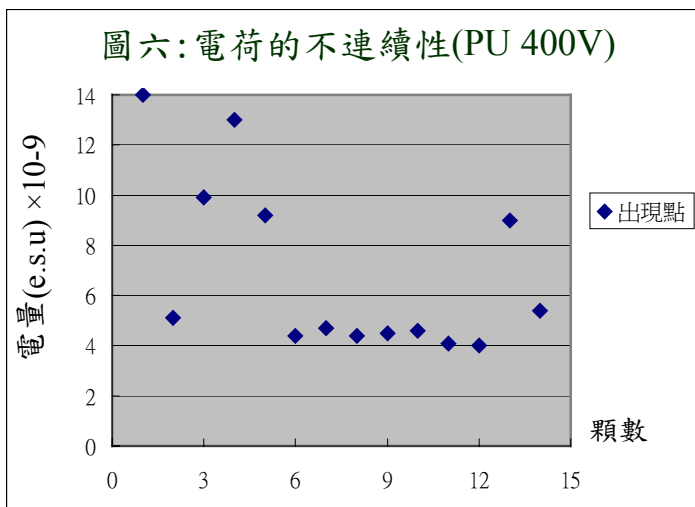
b、假設賦予的電場為一均勻電場，但其條件是兩無限延伸的平行電板，但事實上我們的平行電板是有範圍的，故在此多少也會產生誤差。

c、假設球形落體為一正球體，但其受重力作用下降時應被拉

成橢圓狀（有長、短軸），且落體質量越大，形變程度越明顯。故應以橢圓方程式帶入修正，不過此點太複雜，所以我們在進行實驗時選用較小的顆粒，使其能接近理想狀態，以減低考量。

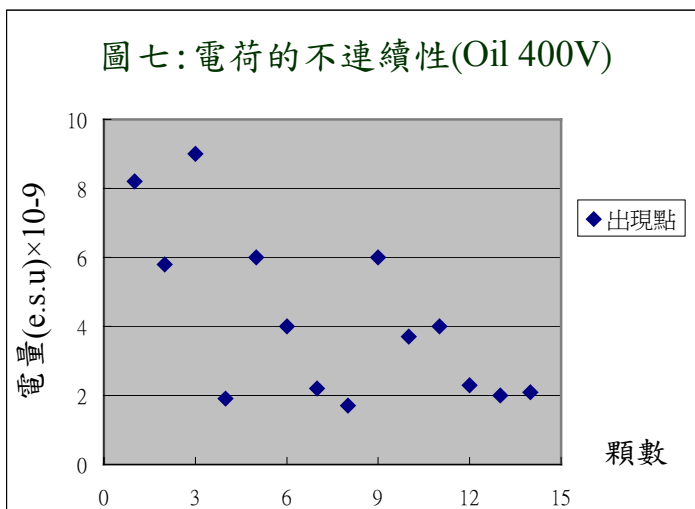
2、電荷的不連續性。

探討電荷的不連續性質，一般常見的方式是利用求最大公因數或兩兩數字相減，將逼近基本電荷值，而後再比較其不連續性。不同於其他我們用另一種 x-y 分布圖 的方式加以呈現以及證實。



說明：

根據此圖除了可看出電荷有不連續的性質外，還可看出電荷呈一整數倍的關係。聚集在4附近的電荷為基本電荷的十倍，向上以此類推。



說明：

與上圖比較，可發現沙拉油作出來的數據較PU不穩定，但還是可看出不連續性與整數倍關係。

3、三種做法的準確度與簡易度。

由三個表可看出，方法二做出來之值最平均而且準確。原因：

(a)方法一的問題是出在選取不同顆粒，求平均。每一個顆粒的黏滯力不同、帶電量不同、質量亦不同，雖然我們以量多（200 顆）的方式求均值，原以為求兩百顆平均後之值會接近理想值，且能減小誤差（因為量多），但顯然效果沒有比預期中好，但此方法是最容易操作的，若不是因為基本電荷是一極小的數值，即使一點點不合也會造成很大的誤差，此法應該可行。

(b)方法三問題的癥結在於操作上的困難。要在一視野下找尋一質量小且能使其完全靜止的顆粒實屬不易，充其量我們只有辦法調整電壓使其不上不下，但此不上不下的定義因人而異而有不同的取決，故猜測實驗的誤差大多來自於此。且在我們觀察時發現有些顆粒在垂直方向上已靜止，但受噴出時的初速度影響，水平方向上仍以某速度前進，也許這也是造成部份誤差的可能性之一。

4、沙拉油與 PU。

我認為在油滴實驗裡噴劑扮演著一個很重要的角色，當年密立根在實驗的時候先是用水進而才改成油。而我們選用的 PU 是一種水溶性樹脂，它的好處就在於可依不同觀察者的稀釋成所需的量（水加的多視野下看到的光點就少，反之則視野下看到的光點就多）。

另外，觀測中發現：PU 的光點較亮，且因經過適量稀釋，光點的量不會太雜而阻礙到觀測。

由【表三】可發現：PU 的數據較均勻（因為顆粒大小較勻稱），而沙拉油比較不穩，但沙拉油做出來的數據卻較 PU 小，可能原因出在電壓值。在計算的過程中我們發現：使顆粒靜止的電壓值越大，算出的 e_n 值就越小。而沙拉油需超過 300V 以上才恰可使一部份顆粒靜止，而 PU 僅需不到 50V 就有部分顆粒能靜止。

5、其他因素。

- (a) **霧化器**。我們觀察到的顆粒會因霧化氣的好壞而有所差別。剛開始原廠儀器的霧化器噴出的效果很差，經過不斷的嘗試&改進後（可比較圖一的霧化氣與圖二），終於可以觀察到像星星一樣的顆粒，也因此實驗才能順利進行。
- (b) **溫度**。我們發現黏滯係數跟溫度成一正比的線性關係（參考附圖一），但發現圖中並沒有畫出低溫部分，所以就想做剛溫跟低溫的對數值的影響。製造一高溫的環境不事件難事，因為電燈會提高環境溫度，但低溫則非常難做，剛開始想移掉熱源改用不會釋放出熱能的雷射光，但試過之後才猛然發現，雷射光不具散射性質，所以無法將顆粒變成亮點觀察。而後來改用乾冰降低環境溫度，但乾冰揮發的氣體影響到焦距，且讓顆粒忽上忽下、忽左忽右的非常不穩定，到最後一值沒有突破，所以我們並沒有這一方面的結果。

六、結論

- 1、在儀器方面的最佳組合早就定案了（就像各大學的一整套精細的設備），所以剩下來還有進步空間的只剩選用的噴劑種類。而水溶性的東西是個不錯的選擇方向（水溶性 PU），因為你可以將它稀釋（這是一般油脂類辦不到的），而且因為其所加的電場值範圍很廣，故可以利用此點設計出較好算的數字，只要實驗的環境盡可能接近理想狀態，就不會影響準確度。
- 2、再次驗證出電荷確實有不連續的性質。
- 3、利用同一顆，測一組向上及向下的終端速度，此方法的準確度頗佳。

七、參考資料及其他

(一) 網路資料：搜尋「密立根油滴實驗」。

1、國立彰化師範大學物理系---近代物理網路實驗室

<http://www.phys.ncue.edu.tw/~mod-phys/>

2、成功大學物理學系---近代物理實驗室

http://energy.phys.ncku.edu.tw/mod_phys/firegun/Millikan.htm

3、密立根 (Millikan) 油滴實驗

<http://www.ied.edu.hk/has/phys/millican/>

(二) 書面資料：

1、彰師大物理系---密立根油滴實驗簡介。

2、師大物理系近代物理實驗室---密立根油滴實驗說明書。

3、原場儀器附帶的說明書。

4、物理化學 (修定二版 1987/07/15)，著者：物理化學編輯委員會，主編：黃定加，出版：高力圖書有限公司，頁數：P.78~81。