

物理學的發展到了十九世紀末，已經建立起相當完整的理論體系，其範圍涵蓋有力學、熱學、光學和電磁學等等。利用這些理論，我們可以解釋許多自然界的現象，了解其成因，大致滿足了人類的好奇心。而在物理知識的實際應用上，也取得了輝煌的成就，使人類的生活形態大為改觀。當時有些物理學家認為，自然界的基本規律可能已盡為人知，物理學的發展已達巔峰，不會再有重大的發現了，將來的研究重點應改換在細節的修正與物理知識的實際應用上。

但是就在十九世紀即將結束之際，三項重大的物理發現，拉開了二十世紀物理學大發現時代的序幕（圖 10-1）：1895 年德國物理學家倫琴（Wilhelm Röntgen, 1845-1923）發現了 X 射線；1896 年法國物理學家貝克勒（Henri Becquerel, 1852-1908）發現了天然放射性元素（natural radioactive element）^註；1897 年英國物理學家湯姆森（Joseph John Thomson, 1856-1940）發現了電子（electron）。

接著在二十世紀一開始的 1900 年，德國物理學家普朗克（Max Planck, 1858-1947）提出了革命性的量子（quantum）概念，不但促成日後愛因斯坦以光量子（light quanta）的概念解釋光電效應（photoelectric effect），也為物理學開啟了一個嶄新的方向。

量子概念的提出是物理學發展的分水嶺，在此之前的物理學稱為古典物理學（classical physics）；在此之後，則稱為近代物理學（modern physics）。近代物理學的發展正如美國物理學家密立坎（Robert Andrews Millikan, 1868-1953）所說的：「科學要倚賴理論和實驗這兩隻腳來前進。有時是這一腳超前，有時是另一隻腳超前；但是只有兩隻腳同時前進，才能使得科學持續進展。」因此本章將從認識這些在世紀更迭之際引領物理學發展的一些重大發現，來瞭解近代物理的內涵。



(a)



(b)



(c)

▲ 圖 10-1 (a)倫琴以 X 射線為夫人拍攝的手部照片；(b)貝克勒觀察到放射性元素的底片；(c)湯姆森發現電子的實驗裝置。

^註 關於貝克勒與放射性元素將於第十一章第四節有更詳細的介紹。

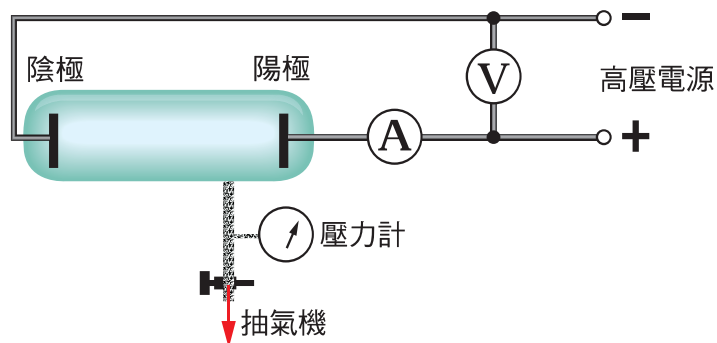
10-1 電子的發現

1803 年英國科學家道耳頓 (John Dalton, 1766-1844) 提出原子論，認為**原子** (atom) 是組成各種不同元素的最基本物質，不可再被分割，不同元素則是由不同原子所組成，但一直到十九世紀末二十世紀初，在
5 眾多科學家的努力下，自氣體動力論及布朗運動等的研究中，終於確立了原子的存在 (參閱選修物理 (上) 第一章延伸閱讀)。但原子就是組成物質的最基本粒子了嗎？湯姆森發現的電子似乎告訴我們在原子之中還有更多值得探索的空間。

1. 氣體放電

10 十九世紀中葉起，歐洲的許多科學家們就致力於研究**氣體放電** (gas discharge) 的現象，也就是在裝有特定氣體的管子兩端施以高電壓，觀察其放電發光的現象。然而，造成氣體放電發光的原因有各式各樣的來源，而當時許多相關的實驗研究都複雜過頭了，直至科學家意識到物理上一個很重要的概念 — 簡化問題。利用抽真空來簡化實驗，使探討的
15 變因單純化，人們才有機會從氣體放電現象的研究中得到更進一步的結果，進而發現電子。

改良過後的氣體放電實驗裝置如圖 10-2 所示。在玻璃管內置入一對電極後，將管內的空氣抽出，並接通高電壓直流電源，觀察管中的氣體放電現象。



▲ 圖 10-2 研究氣體放電的實驗裝置。

圖 10-3 所示為管內空氣壓力從 50 mmHg 降至 0.02 mmHg 時，管內空氣的發光情況。當管內空氣的壓力降至約 10 mmHg 時，管內的空氣發出輝光，並開始導電。當空氣壓力繼續降至 0.02 mmHg 時，管內的空氣密度極為稀薄，輝光已相當黯淡，但是電路上的安培計仍然顯示有電流通過，表示管內必然有電荷在兩電極之間流動。這些電荷是如何流動的呢？



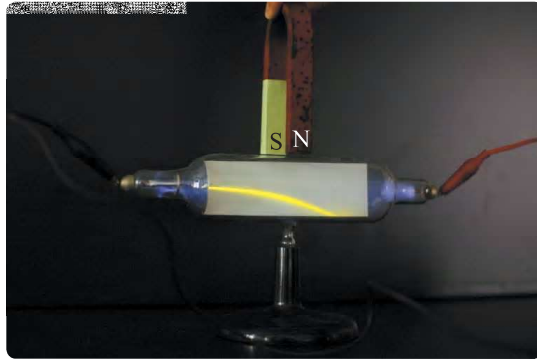
▲ 圖 10-3 當氣壓降至約 10 mmHg 時，高電壓氣體放電管內的空氣放出輝光；當氣壓繼續下降至約 0.02 mmHg 時，輝光已相當黯淡。

為了瞭解管內電荷的移動方向，可以事先在玻璃管中間裝置十字形金屬片，然後才將管內抽成真空，並於兩端加上高電壓。結果可在陰極對面塗有螢光劑的管壁上觀察到陰影，如圖 10-4 所示，這顯示出帶電粒子是自陰極射出，因此將此帶電粒子流稱為陰極射線（cathode ray），同時將這種真空管稱為陰極射線管（cathode ray tube）。

為了進一步了解陰極射線的性質，可觀察陰極射線在磁場中的偏轉，由圖 10-5 所示陰極射線受磁場作用而產生偏向的情形，可以判知陰極射線是帶有負電荷的粒子流。



▲ 圖 10-4 受陰極射線照射使十字形物體在管壁上形成陰影。



▲ 圖 10-5 陰極射線受磁場的作用而偏向。注意圖中黃色是陰極射線在螢光板上所顯示出來的顏色而非陰極射線的顏色。



陰極射線的發現

陰極射線最早是由德國物理學家普呂克（Julius Plucker, 1801 ~ 1868）在 1858 年觀察氣體放電現象時所發現，隨後在 1876 年由另一位德國物理學家哥爾茨坦（Eugen Goldstein, 1850 ~ 1930）確認這種射線是由陰極所發出的，而命名為陰極射線。但是一直到十九世紀末，科學界仍對陰極射線的本質爭論不休，主要是因為一方面觀察到陰極射線在磁場中的偏轉，而認為陰極射線是帶負電的粒子流，但另一方面則因為沒有觀察到陰極射線在電場中的偏轉，而主張陰極射線是電磁波，這兩種觀點皆有其擁護者。之後更加仔細的研究終於確認陰極射線應是帶負電的粒子流，之所以當初沒有觀察到在電場中的偏轉，乃是因為高速運動的負電荷在電場中偏向極微小不易觀察之故。



「看」到陰極射線的軌跡

在圖 10-4 的真空管中，利用陰極對面塗上螢光劑的管壁來觀察陰極射線被障礙物阻擋的情形，但要如何才能觀察到圖 10-5 中陰極射線的軌跡呢？讓我們來看看這個聰明的設計，如圖 10-6 所示，在真空管中斜放一片塗有螢光劑的板子，因此從圖中左側射出來的一束陰極射線，在打到螢光板時就可以顯示出陰極射線的軌跡，這也說明了在圖 10-5 中所看到的黃色是陰極射線打在螢光板上所顯示出來的顏色，而非陰極射線本身的顏色。



▲ 圖 10-6 自真空管左側射出的電子束（以灰色區域示意）打到斜放的螢光板可以顯示出陰極射線軌跡（以黃色實線示意）。

2. 電子的荷質比的實驗

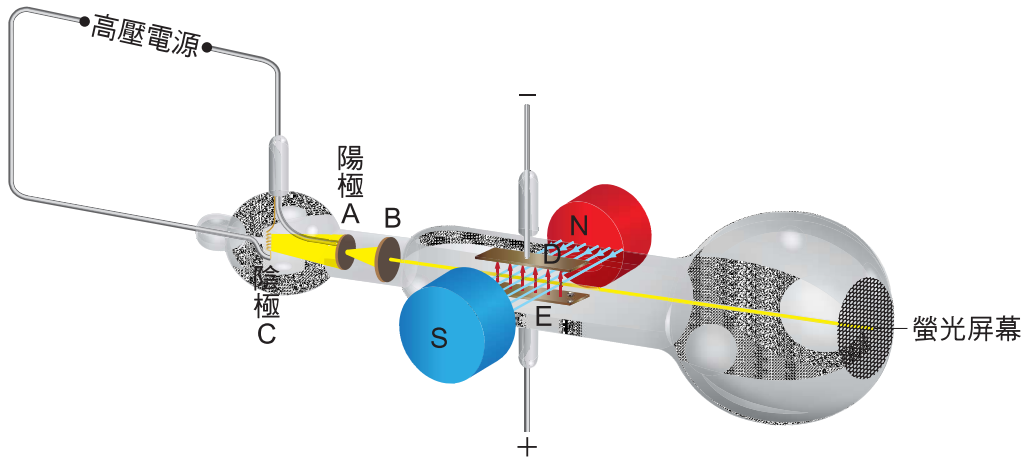
為了更進一步瞭解陰極射線所帶的電荷與質量等資訊，科學家設計了各式各樣的實驗，但是由於帶電粒子的受力與其電荷有關，而我們能測量的加速度造成的影響又和其質量有關，因此這些實驗量測皆無法單獨得到電荷或質量的資訊，而僅能得知電荷與質量的比值 — 簡稱為**荷質比**（charge-to-mass ratio）。在陰極射線荷質比的實驗中貢獻最大的首推湯姆森（圖 10-7）。



▲ 圖 10-7 電子的發現者—湯姆森。

湯姆森從 1894 年起開始對陰極射線詳加研究，他之所以能在眾多研究陰極射線的科學家中脫穎而出，最早確認陰極射線的荷質比，其關鍵在於他將陰極射線管中的氣體，盡可能地抽出，使內部形成高度的真空，因此從陰極射出的陰極射線，在運動過程中和管內氣體分子發生碰撞的機率非常微小。

圖 10-8 是他研究使用的陰極射線管示意圖，圖中的 C 和 A 分別代表陰極和陽極，兩極之間的高電壓可以加速自陰極射出的陰極射線。A 和 B 為一對中心鑽有小洞的平行板，用以限制只有直線前進的陰極射線才能通過。D 和 E 為另一對上下平行的電極板，可以接通電源在兩板之間形成電場，使通過其間的陰極射線向上或向下偏轉。在 D 和 E 電極板的前後，還可以從管外施加磁場，以研究陰極射線在磁場中的性質。最後陰極射線撞擊在塗有螢光劑的玻璃屏幕上，形成亮點，顯示其位置。



▲ 圖 10-8 湯姆森測量電子荷質比的實驗裝置示意圖。

湯姆森在 1897 年發表的論文中，指出一個重要的發現：構成陰極射線的粒子流性質，和使用的電極材料無關，也和管中的氣體種類無關，所測得的荷質比皆相同，因此可認定這些粒子確實從陰極射出，且普遍存在於所有的物質內。此外他進一步確認構成陰極射線粒子流的荷質比，並採用當時的命名建議，稱個別的粒子為電子，而他也因為發現電子獲得 1906 年諾貝爾物理獎。



電子的命名

帶電體存有一個基本單位電荷的想法，最早是由法拉第在 1834 年所提出，用以解釋電解實驗的結果。1874 年愛爾蘭科學家史東尼 (George J. Stoney, 1826-1911) 首先建議將氫離子所帶的正電量命名為 *electrine*。依據當時已有的原子假說，所有的原子應有等量的正電和負電。因此於 1891 年，他又建議將氫原子所帶負電量稱為 *electron*，即是我們所沿用的電子名稱。

以下讓我們看看湯姆森如何利用電場測出電子的荷質比^{註1}。假設在圖 10-8 中的 E 板接到電池的正極，而 D 板接到負極，則兩電極板間的電場方向向上，因此使通過其間的電子向下偏轉。設電子的電荷為 e ，電場的量值為 E ，則電子所受向下的電力量值為 $F_e = eE$ 。另若所加均勻磁場的方向垂直於紙面向外，可使電子受到磁力的作用而向上偏轉。設磁場的量值為 B ，電子通過磁場時的速率為 v ，則電子所受向上的磁力量值為 $F_m = evB$ 。由於電子的重力和上述的電力及磁力相比，其值非常微小，可忽略不計^{註2}。如果調整電場或磁場的量值，使兩力的量值相等，即 $eE = evB$ ，則電子束將不會偏轉，而直接射中陰極射線管中右方屏幕的中央，故可得電子的速率為

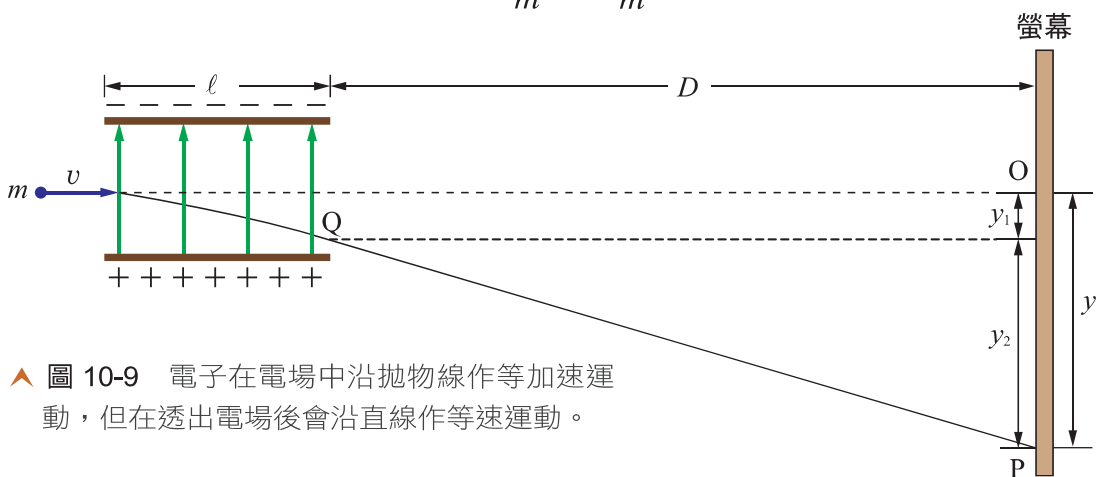
$$v = \frac{E}{B}$$

10-1 式

然後除去所加的磁場，使電子在電極板範圍內只受到向下的電力。設電子的質量為 m ，則其加速度量值 a 為

$$a = \frac{F_e}{m} = \frac{eE}{m}$$

10-2 式



▲ 圖 10-9 電子在電場中沿拋物線作等加速運動，但在透出電場後會沿直線作等速運動。

若電場保持不變，則因加速度為定值，故電子在電場中作等加速運動，其路徑為拋物線，如圖 10-9 所示。電子在 Q 點透出電場後，由於不再受力，故作等速運動，沿直線前進入射在螢幕上的 P 點，產生一亮點。螢幕中央 O 點和該亮點 P 之間的距離 y 是由兩部分的偏折造成：一是

^{註1} 湯姆森也曾利用磁場來測出電子的荷質比，相關內容請參考第 171 頁習題 12。
^{註2} 實驗中 $\frac{qe}{mg} \approx 10^{13}$ ，故電子所受的重力，相對於所受的電力，可忽略不計。

在電場中的偏折距離 y_1 ，另一是透出電場後的偏折距離 y_2 ，即

$$y = y_1 + y_2$$

由於電子沿水平方向進入兩電極板之間，但其所受的電力向下，垂直於其射入電場的速度方向，故電子在水平方向上不受力，其速度分量
5 維持為原速率 v 。若電極板的寬度為 ℓ ，則電子通過電場所需的時間為

$$t_1 = \frac{\ell}{v}$$

利用等加速運動公式，可得電子在穿過電場的過程中，向下偏折的距離為

$$y_1 = \frac{1}{2} at_1^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{eE}{m} \right) \left(\frac{\ell}{v} \right)^2 = \frac{eE\ell^2}{2mv^2}$$

當電子從 Q 點透出電場時，在 y 方向的速度分量為

$$10 \quad v_y = at_1 = \left(\frac{eE}{m} \right) \left(\frac{\ell}{v} \right) = \frac{eE\ell}{mv}$$

設電場右側邊緣至螢幕之間的距離為 D ，則電子自 Q 點至螢幕所需的時間為

$$t_2 = \frac{D}{v}$$

10-3 式

所以電子在透出電場後，向下偏折的距離為

$$15 \quad y_2 = v_y t_2 = \left(\frac{eE\ell}{mv} \right) \left(\frac{D}{v} \right) = \frac{eE\ell D}{mv^2}$$

所以電子在整個飛行過程中，偏離 O 點的總距離為

$$y = y_1 + y_2 = \frac{eE\ell}{mv^2} \left(\frac{\ell}{2} + D \right)$$

10-4 式

由上式可得電子的電量 e 和質量 m 的比值為

$$\frac{e}{m} = \frac{yv^2}{E\ell \left(\frac{\ell}{2} + D \right)}$$

10-5 式

20 式中的 y 、 E 、 ℓ 和 D 均可從實驗中直接測得，另電子的速率可利用 (10-1) 式得知，將實驗數據代入上式，得到了

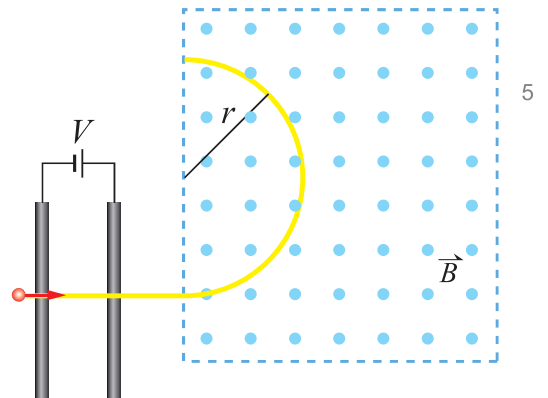
$$\frac{e}{m} = 1.76 \times 10^{11} \text{ C/kg}$$

10-6 式

湯姆森成功獲得的電子荷質比，將待後續科學家繼續深入探索，讓世人對電子的電荷與質量有更進一步的了解。

◎範例 10-1

在陰極射線管中，電子的動能是電子經由陰極和陽極之間的電位差加速而得。設兩極之間的電位差為 V ，電子經加速後，沿垂直於磁場的方向進入一均勻磁場中（沒有電場），若磁場為 B ，且測得電子的迴轉半徑為 r ，如圖 10-10 所示，試求電子的荷質比。



▲ 圖 10-10

[解答] 電子經電位差 V 加速後，所減少的電位能 eV 轉變為其動能，即

$$\frac{1}{2} mv^2 = eV \quad \text{①}$$

式中 m 為電子質量、 v 為電子進入磁場時的速度量值。當電子以垂直於磁場的方向進入磁場後，以所受的磁力 $F_m = evB$ 作為圓周運動所需的向心力，即

$$evB = \frac{mv^2}{r}$$

$$v = \frac{eBr}{m} \quad \text{②}$$

將②式代入①式，解得電子的荷質比為 $\frac{e}{m} = \frac{2V}{B^2 r^2}$ 。

3. 電子電荷的測定

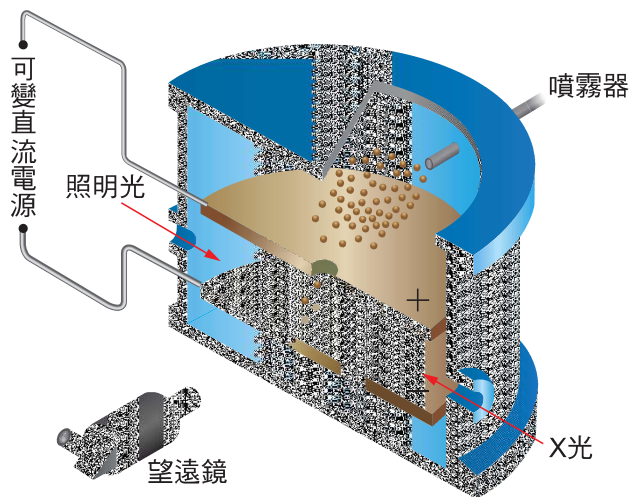
密立坎（圖 10-11）和他的學生夫列契（Harvey Fletcher, 1884-1981）在 1909 至 1912 年期間，創想出油滴實驗（oil-drop experiment）來測定電子所帶的電荷。

圖 10-12 所示為密立坎油滴實驗裝置的剖面透視圖。在封閉的容器中，一對隔開的平行金屬板分別連接可變直流電源的正極和負極。另外，由噴霧器噴出的微小油滴，在通過噴霧器的噴嘴時因摩擦而帶電^註，所以當從上方金屬板的中央小孔進入兩金屬板之間後，會受到電力與重力的作用。而觀察者則利用自左側窗口射入的照明光，透過望遠鏡觀察並記錄油滴的運動。

進行實驗時，若能調整電場的量值與方向使油滴靜止於空中，則只要透過簡單的靜力平衡分析，便可以得知油滴所帶的電荷。雖然實際在進行實驗時要讓油滴靜止在空中相當不容易做到，通常都是觀察非靜止油滴，但分析方法大同小異，因此本書正文仍將以靜止油滴為例說明如何獲知電子的電荷。至於非靜止油滴的分析由於需用到終端速度的概念，超出高中課程範圍，因此僅列在第 142 頁延伸閱讀供有興趣的同學自行參閱。



▲ 圖 10-11 首先測出電子的電量的密立坎。

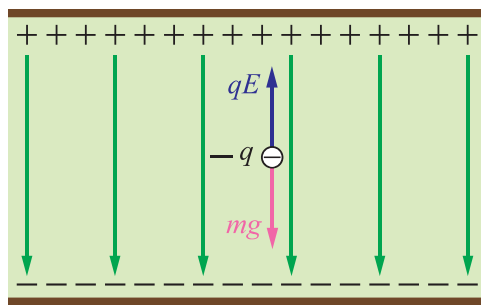


▲ 圖 10-12 密立坎油滴實驗裝置的剖面透視圖。

^註 若欲使油滴帶電更多，可由右側窗口引進 X 光，游離空氣分子並使生成的電子依附在油滴上。

如圖 10-13 所示，當一顆質量為 m 且帶電荷為 $-q$ 的油滴靜止於量值為 E 的電場中時，所受向下的重力與向上的電力恰達平衡，亦即

$$mg = qE \quad \text{10-7 式}$$



上式中只要能決定油滴的質量 m ，便可得知各油滴所帶的電荷 $q = \frac{mg}{E}$ 。

密立坎與夫列契發現利用此方法所測得的各油滴電荷，恰成一簡單整數比，因此推論電荷有一最小單位電荷的存在，此一最小單位電荷即為一個電子的電荷，稱為基本電荷 (elementary charge)，符號為 e 。他們從實驗中發現基本電荷為

$$e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C} \quad \text{10-8 式}$$

密立坎油滴實驗不但測得基本電荷，也暗示了物體的帶電是由於電子的轉移所致，因此之故各個油滴所帶的電荷均是基本電荷 e 的整數倍，這種現象稱為電荷量子化。

承續湯姆森自陰極射線獲得的電子荷質比，電子的電荷測出後，電子的質量 m 也馬上被算出為

$$m = \frac{1.6 \times 10^{-19} \text{ C}}{1.76 \times 10^{11} \text{ C/kg}} = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg} \quad \text{10-9 式}$$

電子具有固定的電荷與質量，但它既輕且小，時至今日仍未能發現其內部結構，故一般將其當作是沒有大小可言的基本粒子，現今其電荷的公認值約為 $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ ，其質量的公認值約為 $m = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ 。

另外基本電荷的發現，也讓當時一直懸而未決的亞佛加厥常數 N_A 隨之而解，應用法拉第電解定律，可知 1 莫耳電子的電荷等於 96500 C，故亞佛加厥常數為

$$N_A = \frac{96500 \text{ C/mol}}{1.602 \times 10^{-19} \text{ C}} = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1} \quad \text{10-10 式}$$

◎ 範例 10-2

小夫在密立坎油滴實驗中，得到下列油滴帶電量的數據：

$$\begin{array}{cccc}
 6.56 \times 10^{-19} \text{ C} & 8.20 \times 10^{-19} \text{ C} & 11.50 \times 10^{-19} \text{ C} & 13.13 \times 10^{-19} \text{ C} \\
 16.42 \times 10^{-19} \text{ C} & 18.07 \times 10^{-19} \text{ C} & 19.71 \times 10^{-19} \text{ C} & 22.98 \times 10^{-19} \text{ C}
 \end{array}$$

- 5 試利用這些數據，估計電子的電量。

[解答] 這些電量的數據中，以 $6.56 \times 10^{-19} \text{ C}$ 為最小值，以此為準，計算其他電量對此電量的比值，並取最接近的整數比，得

$$\begin{array}{ll}
 \frac{8.20 \times 10^{-19} \text{ C}}{6.56 \times 10^{-19} \text{ C}} = 1.25 = \frac{5}{4} & \frac{11.50 \times 10^{-19} \text{ C}}{6.56 \times 10^{-19} \text{ C}} = 1.75 = \frac{7}{4} \\
 \frac{13.13 \times 10^{-19} \text{ C}}{6.56 \times 10^{-19} \text{ C}} = 2.00 = \frac{8}{4} & \frac{16.42 \times 10^{-19} \text{ C}}{6.56 \times 10^{-19} \text{ C}} = 2.50 = \frac{10}{4} \\
 \frac{18.07 \times 10^{-19} \text{ C}}{6.56 \times 10^{-19} \text{ C}} = 2.75 = \frac{11}{4} & \frac{19.71 \times 10^{-19} \text{ C}}{6.56 \times 10^{-19} \text{ C}} = 3.00 = \frac{12}{4} \\
 \frac{22.98 \times 10^{-19} \text{ C}}{6.56 \times 10^{-19} \text{ C}} = 3.50 = \frac{14}{4}
 \end{array}$$

若以 e 代表電子的電量，則可得各油滴電量與 e 的關係如下表：

油滴電量 (C)	e 的倍數	e (C)
6.56×10^{-19}	4	1.64×10^{-19}
8.20×10^{-19}	5	1.64×10^{-19}
11.50×10^{-19}	7	1.643×10^{-19}
13.13×10^{-19}	8	1.641×10^{-19}
16.42×10^{-19}	10	1.642×10^{-19}
18.07×10^{-19}	11	1.643×10^{-19}
19.71×10^{-19}	12	1.643×10^{-19}
22.98×10^{-19}	14	1.641×10^{-19}
平均		1.64×10^{-19}

由上表最後一列的數據可得電子的平均電量為 $1.64 \times 10^{-19} \text{ C}$ 。

延伸閱讀

In-depth Readings

1 利用終端速度分析油滴所帶電荷

實際上在進行密立坎油滴實驗時，不容易觀察到靜止的油滴，此時可透過以下對終端速度的分析來求出油滴的電荷。首先將電源切斷使兩金屬板之間沒有電場，當油滴受重力 $m\vec{g}$ 而向下運動，亦會受到一向上的空氣阻力 \vec{F}_a 作用。已知空氣阻力 \vec{F}_a 的量值與速度 \vec{v} 的量值成正比，可寫成

$$F_a = kv \quad (1)$$

式中 k 為比例常數，且空氣阻力的方向與油滴的速度方向相反。由上式可知，當油滴受到重力而加速下落時，空氣阻力亦隨油滴速度的增加而變大。當空氣阻力增大至與重力量值相等時，油滴所受的合力為零，此時油滴的速度將不會再繼續增加，而保持等速運動，如圖 10-14 (a) 所示，這時的速度稱為**終端速度** (terminal velocity)。設所測得的終端速度量值為 v_0 ，則

$$mg = kv_0 \quad (2)$$

接著，將兩金屬板接通電源，使兩板之間多了一個均勻向下電場 E 。若觀察中的油滴電荷為 $-q$ ($q > 0$)，則此時油滴除了上述的重力和空氣阻力外，也受到電力 \vec{F}_e 的作用，其值為

$$F_e = qE \quad (3)$$

由於油滴帶負電，故 \vec{F}_e 的方向向上。若油滴所受電力小於重力，油滴會向下加速，直到當油滴所受三力的合力為零，油滴再次成為等速運動，如圖 (b) 所示。設新測得的終端速度量值為 v ，則

$$mg = qE + kv \quad (4)$$

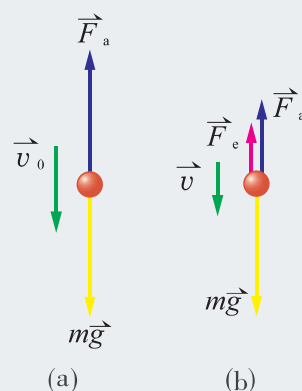
由②④二式可解得

$$q = \frac{mg}{E} \left(1 - \frac{v}{v_0}\right) \quad (5)$$

反之若油滴所受電力大於重力，則油滴會向上加速至量值為 v' 的終端速度，類似過程亦可解得

$$q = \frac{mg}{E} \left(\frac{v'}{v_0} + 1\right) \quad (6)$$

不論是⑤式或⑥式，仍需配合其他物理定律求出油滴的質量 m ，才可得到油滴所帶的電荷 $-q$ 。



▲ 圖 10-14 (a) 在無電場的情況下，油滴的終端速度為 v_0 ；(b) 在有電場的情況下，油滴的終端速度為 v 。

2 密立坎油滴實驗中油滴質量的測定

依據斯托克斯定律 (Stokes's law)，當半徑為 r 的油滴在空氣中以速率 v 運動時，其所受的阻力量值 F_a 為

$$F_a = 6\pi\eta rv \quad \text{①}$$

式中 η 為已知的比例常數。在密立坎油滴實驗中，若兩板間未接通電源時測得油滴的終端速度量值為 v_0 ，則因油滴所受合力為零之故

$$mg = 6\pi\eta rv_0 \quad \text{②}$$

設油滴的密度為 ρ ，則其質量 $m = \frac{4}{3}\pi r^3\rho$ ，代入②式，可解得

$$r = \sqrt{\frac{9\eta v_0}{2\rho g}} \quad \text{③}$$

故油滴的質量為

$$m = \frac{4}{3}\pi\rho\left(\frac{9\eta v_0}{2\rho g}\right)^{3/2} \quad \text{④}$$

請注意上式中等號右邊的物理量 ρ 、 η 和 g 皆為已知，而 v_0 則可直接從實驗中測得，因此可計算求得油滴的質量 m 。