

# 電子七十年

喬治湯姆遜爵士作  
林棟樑譯

作者簡介：\*本文作者是電子發現者湯姆遜的兒子，繼其父後，在  
1937年與大衛森同時得到諾貝爾獎金。

電子的觀念已經由陰極射線的研究，質量及電荷的測定，進化到對它的波動性質之試驗及預測上了。

西元1897年可以說是電子誕生最適宜的歲月，因為以後的三十年內，物理學家所塑成之觀念中，主要的部份皆在這一年內闡明清楚，而且有有力的證據支持這些觀念。

在電子發展冗長而複雜的歷史中，限於篇幅，我只能夠選取幾個重點敘述，所以我必須選擇那些最能夠顯示出許多能幹的研究者，在這方面的研究是如何由實驗與心理的因素得到幫忙抑或阻礙。

電子的觀念在發展過程中，曾經歷很大的改變。最初，它是因為單位電荷而得名。史敦奈（Johnstone Stoney），一個愛爾蘭物理學家，把法拉第定律中，隱含自然電荷單位之觀念加以利用，在1891年介紹了“電子”這個名詞。「在電解中，每個化學鍵斷了以後，都有一定的電量通過電路，此量在各種場合皆不變。化學原子的每一個鍵上都負有此量的電，方便上，我們把此電荷叫電子，它不能從原子裏移動出來，而當原子間起化學結合時，它却隱而不顯」。史敦奈之敘述被證明有一部份是錯誤的。但他所取的名字，現在却被用在原子的一個可分離部份，此名字之內含有許多性質，電荷只不過是其中一個而已。

在十九世紀末，麥克斯威（James Clerk Maxwell），繼法拉第之後，強調介質之重要性全在於它所分離的電荷上，於是「根據這個理論，所有的電荷皆為介電質的電極化之殘餘效應」，但是「在我們了解電解的真實性質後，還要不惜任何方式地保留電荷的理論是不可能的。」

法拉第他自己決不會信服我們現在對他的定律的解釋。但是約1895年時，存有一種自然單位電荷之觀念已有強有力的證據，在1880年初，亥姆霍茲（Hermann Helmholtz）已經強調它的存在，但是它具有物質的實際特性却尚無明證，它可能只不過是支配電流傳遞的一個單位，如輻射中的一個量子，而不是如我們現在所知道的電子。把史敦奈對電子的觀念，變成一種流行了卅年的觀念之決定性證據，是得自於陰極射線之研究。

## 陰極射線的性質

陰極射線之謎很久沒被解開，它們是帶電的粒子，或是以太中的某種現象，或許是通常臆測的縱波？在1897年1月1日，有關的事實為：

它們在磁場作用下偏折，正如由陰極發出的的一條帶負電的導線受偏折一樣。

它們能穿透固體薄膜，如金箔等，而不造成洞。

這個事實是在1892年由赫芝（Heinrich Heitz）所發現，以後被勒納（Philipp Lenard）充分利用，他在大氣層以及裝滿氣體的容器中研究這種現象，勒納證明它們會被物質吸收，而且，如果各種不同物質每平方厘米暴露面所用的重量相同，則發現吸收它們的量幾乎相同。

勒納同時又證明，陰極射線的吸收係數與放電的電壓有關，如果電壓保持一定，則磁場所引起的偏折與放電管中的氣體無關，他並沒有利用各種不同的氣體做放電的實驗。

培林（Jean Perrin）用一個中空的容器面對陰極射線，當此等射線撞入容器內後，顯示出射線是荷負電，這現象取代了克魯克斯（William Crookes）及赫芝錯誤的結果。

最後到1883年，赫芝的論文中提出射線不受電場偏折。

對於把射線視為荷電粒子者，這個論文是一個極嚴重的打擊，觀察的現象顯出此等射線在穿透薄片固體時並無留下任何洞口。

解釋陰極射線為荷電粒子之有力事實為磁場偏折及培林的實驗，後來的一件事使我們更信服這種解釋，即我們通常所經驗的次級輻射（Secondary Radiation）。

在1897年1月7日，科尼茲堡（Konigsberg）科學經濟協會中，維恰德（Wiechert）宣布他的論文，它所得的讚譽，倍於此協會以往所發表的論文。維氏相信射線是粒子的解釋，並且還想測一測  $\frac{m}{e}$  之值，藉由赫芝振盪器作用於一個快門上，測

出  $u$  值，再由磁場偏折計算  $\frac{mu}{e}$ ，代入  $u$  則可得  $\frac{m}{e}$

這種測量由考德瑞斯（T. Des Coudres）完成。

遺憾的是維氏的第一篇論文中，振動速度不夠

快，以至無法實際測量  $u$ ，只能得  $u$  的較低極限；又指示出正確值約為兩倍，於是所得值與電解中氫離子的  $\frac{m}{e}$  比較，約為  $\frac{m}{e}$  的二千分之一。

維氏論文的偉大功勞全在於他敢大膽倡言陰極射線是一種「帶電原子」，並且強調它們的普遍性，但還沒認為它們是構成化學原子之成份。這種早期實驗的弱點，在於沒有形成一股駁斥相信以太波理論者之力量。以太波理論推測陰極射線的速度比維氏的極限速度還要大，可能也比光速大。維氏後來的論文指出，同樣在磁場偏折作用下，它的速度變化情形類似於質點速度之變化。但是這已是湯姆遜實驗之後的事了。在1897年5月，考夫曼（Kaufmann）送給物理與化學年刊（*Annalen Der Physik und Chemie*）一份論文，說明他研究在不同電位差下，放電所形成的射線，受磁場偏折的情形，他相信這種射線是波，但如假設這些射線得到放電電位差的全部能量時，則在計算  $m/e$  後，他發現射線竟是一種質點，這種假設雖尚待評論，但在他的情況下，這事實上幾近真確，的  $m/e$  約為  $\frac{1}{1000}$

，但他終於放棄掉這個值，因為它太小了，並且他又放棄了質點的觀念，因為他假定這些質點與放電管中氣體及陰極物質二者有關。

## · 陰極射線為帶電質點

在四月的最後一天，湯姆遜在法拉第之老家——皇家研究院（*Royal Institute*）做了一次演講，他提出證據，證明陰極射線是一種比氫原子輕1000倍以上的質點，而且是構成物質的一種基本成份，有趣的是湯姆遜的一些實驗與考夫曼所得的結果相同，但從這些結果所做的推論上，湯姆遜的結論恰恰和考夫曼的相反。

這篇演講被印在1897年5月21日的電學家（*Electrician*）上，他在這篇演講內，使已往的質點理論碰到一個不可回答的場合，至少，在當時是不可回答的。

藉著證明射線受偏折後，電荷還是負在其上，湯姆遜改進了培林的實驗，這使我們知道偏折並不是一種次級的現象。他進一步證明，在相同的電壓下，陰極射線的偏折並不因管中所用的氣體為何而改變，這修飾了勒納的實驗。他測量受磁場所起的偏折情形，以及射線所負的每單位電荷結于熱雙極（*Thermocouple*）的熱量，由此計算出  $m/e$ ，換言之， $mv/e$  及  $\frac{1}{2} mv^2/e$  使他得知  $m/e$  之數量級為  $\frac{1}{1000} \frac{m}{e}$  而最重要的，乃是對赫芝電場偏折所得反面的結果，他能給予一個解釋，他利用歌德

斯坦（*Eugen Goldstein*）的一個古老實驗，即放射管中如有二個陰極，當一個陰極連接另一個時，這個陰極所放出的射線必受偏折，湯姆遜認為第二個陰極所形成的電場影響了第一個陰極所放出的射線之路徑，而造成偏折。為了闡明這種觀念，他用一個單獨陰極，在射線路徑的兩旁，放一組平行金屬板，輪流地接地線，則通過平行板的射線皆受偏折。

這一個方法在皇家研究院表演，而被所有的教科書採用為測量  $e/m$  的實驗。陰極射線振盪器之發明亦是根源於此。因為這是最關緊要的一點，所以赫芝1883年的實驗值得我們去看看什麼地方弄錯了。在那個實驗裏，赫芝首先把他的放射管做成扁平的形狀，用一個黃銅架把四方形玻璃片隔開一、二公分而造成，這種形狀的目的，是要由玻璃片附近的磁場之測量以斟查放電中電流分布狀況。肉眼能見的陰極射線與所斟得的電流線並無任何關連。後來他又做了一個較方便的圓筒形管，在管之一端放一陰極，周圍繞以網狀陽極。射線由網中穿出。這些射線射入一個連有靜電計的容器上，以測量電荷，但他測不到任何結果。

那時他深信陰極射線僅是一種次級的現象（他把這種射線視如放電中的可見光，這種可見光是一種次級的現象），於是他嘗試那個具有決定性的受電場偏折實驗。在射線所經過的路徑兩旁放置二片金屬板，以電池的兩極連之，於是造成一個電場。在管的末端的熐光板上，並沒有偏折現象發生。首先，金屬板是放在玻璃管外，但他猜測（對的猜測）電場可能使玻璃帶電，而把玻璃管內部的電場抵消掉，所以他把金屬板放在玻璃管內，但還是沒有效應發生，很奇怪，他並沒有察覺到，由他的放電所形成的離子，有極化他的電極的可能。湯姆遜却注意到了。赫芝是在做空間電荷效應，亦即我們現在所說的離子效應。

## 基本的成份

雖然湯姆遜的實驗證明陰極射線是帶負電的質點，但聲明它們是構成宇宙物質的基本成分却是由於別的證據。射線被吸收與密度有關係這件事實影響湯姆遜極鉅，這種關係和化學上光線——可見光或紫外線之吸收成強烈對比。X光之吸收是由於原子之散射或原子振動而起，但亦沒有如勒納所發現的和密度成簡單比例值。湯姆遜最後的論文是送往哲學雜誌（*Philosophical magazine*），裏面他不但聲稱陰極射線的質點是物質的一個基本成分，其數目約略與密度有關，故與它們的碰撞說明陰極射線的被吸收，而且指示出一條它們如何排列之途徑。他利用一位美國物理學家，梅耶（*Alfred Mayer*）的實驗，把一個磁力較大的磁鐵垂直拿住在一堆浮於水面的磁鐵上，則這些漂浮的磁鐵以同心

環的方式排列起來。

由X光所生的離子，其平均電荷在1898年由湯姆遜測量，他是利用威爾遜（C. T. R. Wilson）發現離子正如一種凝結中心的觀念。湯姆遜所得的結果，在一個很廣的極限內，和溶液中的單價離子的電荷相等，這個電荷值大小最後終被量出。

這二值相等的一個較精確的證明（雖然沒有得到此值的大小），是由約翰湯獻德（John Townsend）所做，他的研究包括比較在各種電場的影響下，此二種離子的移動，以及經過它們自己的分壓下的氣體，它們擴散的情形。

但是陰極射線的電荷等於「電子」的證明却尚未得到，在那時湯姆遜又證明其他二種現象，即熾熱的金屬及光電效應，所放出的質點具有和陰極射線質點相同的  $m/e$ ，這篇論文在1899年刊出，其中亦包含光電離子「 $e$ 」的測量，所用的方法和測X光離子者相似，只不過做了些微的修改而已。而所得的結果亦相同。於是史敦奈對「電子」的定義與新觀念之間建立了關聯，正如在皇家研究院的演說，在這篇論文內，湯姆遜用「粒子」（Corpuscle）來稱呼這些基本質點，而且繼續用了數年。「電子」這個名詞尚未普遍使用，譬如說，勞倫茲（H. Lorentz）就稱它為「離子」、（ions）。毫無疑問地，電子是比較簡潔而有特色的名字，但如把它用成「粒子」，雖不至於和後來發現的正子引起混亂，却也使史敦奈的，純粹是電量的單位電荷沒有一個獨一的稱呼。

湯姆遜闡述，粒子上的電荷即為單價離子的電荷，電離即是把一個粒子由原子中分開出來。

塞曼（Pieter Zeeman）所發現的塞曼效應（Zeeman effect）以及他用勞倫茲理論所做的解釋於1896年10月，在阿姆斯特丹（Amsterdam）會議中被提出，在荷蘭，它是在次年的5月刊登，但在英國，却是在3月份的哲學雜誌上發表，日期為1月而附錄上的日期為2月。此篇論文中的一個奇怪的錯誤是流動質點的電荷的符號竟然為正。

湯姆遜在皇家研究院的演講中曾參考此論文，

特別是  $m/e$  的值的相符，亦即  $10^{-7}$ 。

在1899年時，湯姆遜的觀點尚未被立刻接受，在1899年論文之後，除了一個重要的地方外，所有的證據都是恰當的。從法拉第定律所假定出來的單位電荷之測量，全部都是用統計方法，所給予的  $e$  都是平均值，但對  $m/e$ ，却不是這種情形了，湯姆遜利用電場偏折的測量最初雖是不佳，但立刻被改善，大部份的人假定電荷同樣也是自然界的一個真實常數，而不是一個平均值。但它需要證明。可以想像地， $m/e$  可能比  $m$  或  $e$  更具基本性。例如，在一種氣體內，比方含有同位素的氫者，在一週

期內， $\frac{1}{2}mv^2$  的平均值對每一個原子皆相同

，但  $m$  却會變化。後來我們都知道，這件

事在1909年由密利根（R.A. Millikam）很漂亮地予以澄清了。

## 最上等頭腦的盲目

在回顧以往中，一個人感受印象深刻的是，一種保持很久的理論能使一個最上等頭腦的人對新的觀念盲目到何種程度。假如明瞭這個新觀念，你將驚奇地發現，藉著一種適當的理論，幾乎所有的事情都能够得到解釋，同時亦可發現技術是何等重要，因為把放電中的氣體減少一點點，將改變整個問題的全貌。甚至對於地位崇高，有才能的研究者的實驗，我們在接受它時，也應該非常當心！

由這樣所建立起的電子理論，在30年內，幾乎沒有些微的更改地做為原子物理的基礎，在 $\beta$ 射綫之研究中，考夫曼，布薛勒（Bucherer）以及其他的人利用電子來測定質量和速度的關係，以建立相對論所給予公式的正確性。許多物理學家，包括湯姆遜，利用電子以形成金屬導電性的理論，但沒多大成功，主要是有了困難：被視為麥克斯威質點的自由電子的數目，在遵照能量均分（equipartition of energy）之原理下，將使金屬的比熱遠超過觀察所得的值。

把電子從全然遵照麥克斯威電子動力學定律下解放出來，以波爾（Niels Bohr）為第一人，他假設電子可以永久環繞一個原子核而不輻射能量，只要它的角動量是  $h/2\pi$  的整數倍。這個觀念，使能够解釋光譜學的許多問題的原子構造理論變成可能。但在其他方面，波爾對一個小球狀質點的觀念乃保持不變。在二十年代到三十年代中，不管它的許多成功，波爾—索末菲（Bohr—Sommerfeld）理論一定有某些錯誤是非常顯明的事。我還很清晰地記得曾聽到康普頓（Arthur H. Compton）給卡文狄需實驗室學術會議的一篇「環電子」論文上，說明它如何能解開一些疑難，但是這個觀念沒有被接受，而在1926年，由烏連貝克（George Uhlenbeck）及高德斯密特（Samuel Goudsmit）的自轉電子觀念所取代，這個觀念亦不甚令人滿意。質點般的電子是失敗了，因為它沒有足夠的自由度（Degree of freedom）以說明光譜綫的變化，譬如說為什麼鈉綫為兩條組成。而自轉電子却太多自由度。

## 波或質點

當然，在1920年代的物理學真正難題是輻射問題，到底是波還是質點？幾乎同時地，海森堡（Heisenberg）及德·布洛意（Louis de Broglie）給予解答，前者並沒有立刻改變人們對電子本性的觀念。但德·布洛意却劈頭提出電子與光子同樣有波衍及其上之觀念。他第一篇英文論文上，就用到電子

的波長來解釋波爾永久電子軌道之條件，我亦曾經受布拉各（Lawrence Bragg）對我說的一句話，即他想電子並不如人們所想的那麼單純，之影響而或多或少地以爲如此。總之，我曾寫一篇簡短的文章刊在1925年7月份的哲學雜誌上，想擴充德·布洛意的觀念。

同時，大衛森（Clinton Davisson）及昆斯曼（C.H. Kunsman）用大約200伏特的電子撞擊金屬而產生次級的電子（Secondary electron），1921年他們已發表第一篇論文，他們所研究的方面絕不是一個處女地，而大衛森的研究正是一個出色的例子，它顯示出一些可能被認爲沒有前途的研究，有時靠極優異的技術可以得到輝煌的成果。

大衛森較早的論文是用多晶體物質做爲靶，而顯示出「頂點」，亦即偏愛的散射方向，此種偏愛散射方向隨入射的電子速度而改變。在1925年7月份的自然科學（Naturwissenschaften）上，理論物理學家葉爾扎赦（Walter Elsasser）的一封信提示說，這種效應和光柵的繞射（Diffraction）相似，並說在德·布洛意理論內，通常的力學所產生的偏差，在可得到的速度範圍內，是可以預期的。

大衛森讀了葉氏的文章，但聲稱不受它的影響，而且他不相信葉氏理論的正確性，首先，他傾向於以原子的電子殼層來解釋，後來用「透明方向」（transparent direction）。但是幸好有一件意外（1925年4月），他所用的鎳靶受了過久的加熱而變成一些大的晶體，這次所得的圖樣完全不同於以往，大衛森於是決定要以單純的晶體來研究。

在1926年，他出席英國協會（British Association）在牛津的會議，在那裏，他拿了一些有關單純晶體的曲線給波恩（Max Bohn），哈粹（D.R. Hartree）看，可能也給布拉凱特（P.M. Blackett）及佛蘭克（James Franck），在回去後，他花費他的時間，正如他所說的「在嘗試了鮮薛勒定諤（Schrodinger）的一些論文上，因爲我有一個靈感（大概在牛津獲得），這個謎的解釋可能藏在這些論文裏面」。他全力尋求光束，在一些失敗後，他在1927年1月6日發現由表層原子的線柵所造成的強烈光束。我亦參加那個會議，在那兒我聽到德·布洛意的理論被非正式的討論著，我記不得葉氏之名是否被提過，但討論這個理論的人中有一些曾讀過他的研究，我想我沒碰到大衛森，並且確信不會與他討論他的實驗。他與革末（Germer）的實驗，最初是在1927年4月的自然界（Nature）上簡短地發表，後來又在當年12月的Physical Review上發表，比較詳盡，這個實驗完完全全地說明電子是由鎳晶體的表層（111）面的原子所繞射的，正如用波長爲 $\lambda = \frac{h}{mv}$ 的波—德·布洛意公式，完全一

樣，而次一層的原子修改這個效應，其原因是由於電子進入金屬中得了能量之故。大衛森所用的電子能量約在50—400伏特之間。

在同時，發生在我身上的是，我應該可以得到一個類似楊氏光學「繞射測微器」（eriometer）的

電子，此測微器之中，穀粒或纖維以隨意取向放置在一個玻璃板上而得到光圈，其直徑與纖維的大小有關。賽璐珞是由長分子組成而且可製成很狹長的薄片。在阿伯丹（Aberdeen）我有一個學生萊德（A Reid）（在次年的一次摩托車事件中喪生），他恰巧有一件儀器可以用做這個實驗，我請他試著去做。

他把約30K V的陰極射綫穿過賽璐珞的薄片，然後射到感光板上，板上就會顯出模糊的同心環。同時我們在感光板上有一些光學的幻影，這使

我們感到麻煩。雖然在 $\lambda = \frac{h}{mv}$ 之假設下，我們得到正確大小的同心環，而且這對賽璐珞分子有效厚度是一個合理的猜測，但在信任這些不清楚的環上，我們還是非常小心，這使我們耽擱了一點點，最後，在沒有疑問之後，我們把它發表在1927年6月份的自然界上。

然而，對於形狀已經明瞭的晶體，其圖樣之得到亦是極緊要的，幸好有佛拉赦（C. G. Fraser）靈巧的操作使我能够用金片，鋁片，鉑片而得到精確的圖樣，這些圖樣各方面都符合德·布洛意理論所應有的結果。在1927年12月的自然界上以及1928年2月的Proc. Roy. Soc.上我們把它發表了。

在回覆一個評論時，我藉著磁場偏折，證明圖樣實際上是由電子的感光作用所引起，決非由靶形成的某種次級X光所造成。後來有一篇論文，對於金片不同的晶體面所造成之布拉各反射環之相對強度，我證明它與莫特（Neuil Mott）的波動力學理論所預測者相符。

在比較這些實驗時，我必須強調大衛森及革末實驗的艱難性，他們的實驗是物理界最偉大的成功之一，甚至現在乃很難重覆他們的實驗。而我們的，只要知道如何做薄金屬片就可以了，它是最容易的實驗之一。主要的差別全在於所用射綫質點的能量。除此以外，雖然用快速電子做反射實驗並非困難，但自然是比透射過者複雜。我的出發點是測驗一個理論，而大衛森却是爲了解釋一個實驗。

德·布洛意理論的原來簡單形式，是和質點電子的波動力學類似，此質點電子有三個自由度。狄喇克（P.A.M. Dirac）在1928年提出一個更複雜的理論。它補足了這個缺陷，又適合相對論的要求。它同時啓發他去預測電子負值態的存在，無限多的這種負值態假設被充滿，在這態「海」內的一個空位，其行爲正似一個具有正常質量而帶正電的電子。接着，1932年安德遜（Care Anderson）正子的發現，以及1933年尼德梅耶（Seth Neddermeyer）發現的 $\gamma$ 射綫之物質化（materialization），偶的產生（Creation of pairs），使電子的歷史在這一階段告一個結束。

毫無疑問地，以後還有許許多多的事來到。在 $\mu$ 介子衰變發現20年後， $\mu$ 介子與電子的關係乃是一個謎，或許電子將失去其唯一的位置，而僅成爲輕子（lepton）商行裏面的一個年老伙伴，但是到底過了70年的美好生活。