

第一章 奇妙的電子

會隱形的電子

因安和樂利而一片熱鬧的高雄，有一天在各街頭出現了奇妙的佈告，其大意如下：住在高雄某區的「電子」（從這名字看起來可能是女人）在一再犯罪之後，可能逃往台北，必須立即逮捕法辦。

各地的治安機關動員了大批人馬，佈置了嚴密的搜查網。她到底會在那裏落網，這成為好奇的高雄市民關心的目標。

但是，搜查本部所獲得的情報很奇妙。既有人報告：「今天上午7時半，在台南縣的關卡前面發現了她，但被逃走。」，且有人在同一時刻報告：「她通過了台北橋。」，也有人報告：「剛才在南投山中的確發現了她。」

非常驚訝的捕吏，接到了更奇怪的報告：「這裏是台南縣的關卡，我們的確逮捕了他。根據逮捕前後的情況及本人的自白，一定是電子。但是，不管從那一個角度看，卻是滿臉皺紋的老頭兒。不過，我們相信他必定

是電子。」

接著又說到這樣情報：「糟糕了。我們把他關在關卡的牢獄裏，並嚴密的戒備。但是，不久之後他竟然逃出牢獄，站在關卡的那一邊，然後斜視著我們忽然消失了。據那裏的渡船夫說，是坐在蓮花座悠然地向西走。他到底是什麼東西？」……

讀者或許會覺得那有此種無聊的事。但是，電子確實具有此種與常識不相符的奇妙性質。電子會不知不覺地同時發現於不同的地方。它會從完全沒有出口的密室溜出去。它具有完全不同的兩種容貌，有時是粒子，有時卻是波動。如果這個電子會變成與人們一樣的大，會像人們一樣的交際，那麼我們實在對它無可奈何，只好讓它逍遙自在了。

正確的了解此奇妙的電子，近代物性論的故事就從這裏開始。因為，電子正是物性物理學之世界的主角。

物質是由微小的原子組成的。但是，把無數個原子結合，而構築我們看得見的常觀世界的，是充滿著活力的電子，環繞我們的物質多彩而神秘的變化，其主要原因也可以歸於電子變化多端的活動。

在真空的黑暗中跑

我們進入電子學時代已經很久了。我們周邊的情報

，都是電腦處理、儲存。現在幾乎人人都知道擔負這個過程的即是電子。但是，電子被確認以前的歷史，是錯綜複雜的。

在1873年英國的法拉第在實驗上，以及同樣在1873年英國的馬克士威在理論上首次統一的理解電磁現象時，事實上人類還不知道電子的存在。

雖然法拉第或馬克士威曾這樣想過：「不曉得搬運電的實體是什麼。但是，若有帶電的某種東西存在，即能統一的說明電磁的一切自然現象。」

當無法抓住實體時，暫且不問其本質而統一申論各種現象的立場叫做現象論，有了輝煌成果的法拉第一馬克士威的電磁學，就是典型的現象論。

我們現在把這理論稱為「古典電磁學」。只要有這個理論，即使沒有關於電子的知識，也能很正確的求出從電視發射台發射的電視的電波會如何在空間傳送。

同樣是英國的物理學家的克魯克斯及湯姆生卻說：「不過……，現象論的確很有效，但是如果不曉得電的實體，則在學問上還不算已經完成了吧！」

此點沒有爭論的餘地。而他們所注意的現象，即是法拉第所做的真空放電。

不過雖說是真空，事實上是在留下了極少氣體的玻璃管兩端放金屬片。若對它施加電壓，即引起放電產生

美麗的光。此時若把電流計放入電路，即會看見其針在振動。這等於電在透過真空流動。

關於電在金屬中流動的現象，不僅不曉得金屬的實體，且不曉得電的實體。既然如此，則檢查在什麼都沒有的真空中的電流，不是知道電之實體的捷徑嗎？克魯克斯這麼想，而使用真空放電多方檢查真空中的電流。他所得的討論為，電流即是具有負電荷而從陰極飛到陽極的小的帶電粒子。這是很重要的發現。但是，他從這裏進一步地被下面的想法困住：此帶電粒子是物質次於其三種通常的狀態——氣體、液體、固體——的第四態。

稍後開始研究真空放電的湯姆生，逐一以正確的證實追究這飛躍的觀念。他重新對從陰極跳出的帶電粒子施加電場或磁場，探討了所引起的粒子流動的變化。結果，確實逮住了後來由密立根正確測定的具有電荷 $-e$ ，質量 m 的粒子——電子——的存在。

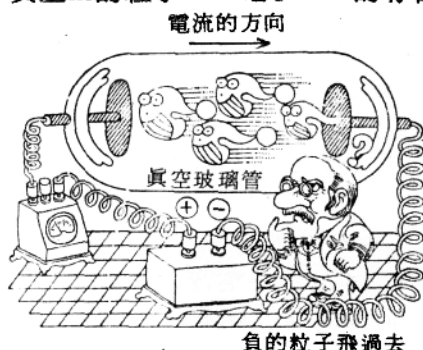


圖1 克魯克斯—湯姆生的實驗

不久之後，許多人發現，電子從照射紫外線的金屬面或被加熱的金屬面飛出來，且以從放射性物質產生的 β 射線的形式出現。此外，在真空放電中發現了與電子相稱的正的帶電粒子——現在的所謂電離子——的存在。在19世紀後半與20世紀之交，法拉第及馬克士威沒有查明的電的實體，終於被揭開了真面目。

有一位男子，在盛行風車的國家一聲不響地注意這個事實。他就是萊丹大學的亨特立克·安東·羅倫茲。他探索了一個從現象論走向本質論的路——如果在原子、分子以及一般物質之中皆有電子存在，則要如何根據這個事實引導法拉第 - 馬克士威的古典電磁學？

誰都不能否定的一個事實

古典電磁學處理了在我們所經驗的世界——常觀的世界——的電磁現象。另一方面，在我們的肉眼看不見而非常小的世界，才能認識電的基本單元。但是，若它就是電的根源，即可以從在微觀的世界的電子之存在開始申論而建立電磁學。只要這個電磁學能像古典電磁學一樣，充分說明常觀之規模的現象即可。羅倫茲是這麼想的。

此種想法可以進一步的這麼說：通常原子或分子因真空放電而排放電子，這無異是在原子裏面有以某種方

式被束縛的電子存在。1896年，羅倫茲藉首先用電子對於他的學生季曼所發現的「季曼效應」給與理論上的根據。即是，在磁場內的原子所發出的光因磁場的影響而變化的季曼效應，是起因於在原子內而推動的電子之存在。

又，電在金屬內流動，即表示在金屬內有可以自由活動的電子存在。羅倫茲的「自由電子」的觀念，如此的出現。極大的電流不妨當做極微之電子的流動。又，金屬會充分傳熱一事，即可以視為自由的電子很快地把熱運輸過去。

如此，以微觀的現象鞏固了常觀的現象的證據之後，逐一加以對應。羅倫茲的電子論，是如此建立的。但

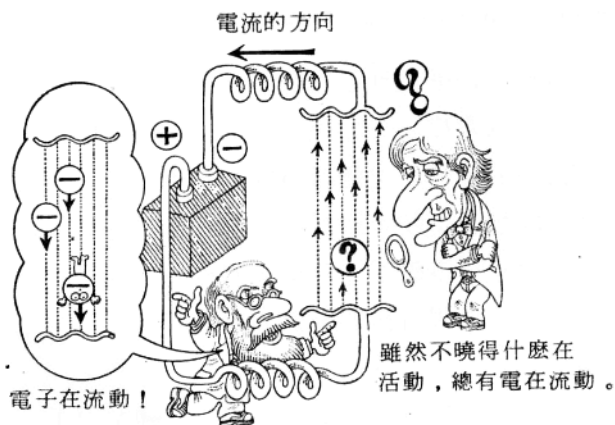


圖2 法拉第與羅倫茲的不同看法

是，仍有幾個秘密未解決，例如電阻是什麼等的問題。但是可以說，由於他的理論出現而改變了過去的物質觀。就我們的日常經驗來說，物質是平板而缺少變化的連續體。但是，羅倫茲說：「此種連續的物質例如金屬，是無數個叫做原子的粒子的集合體。況且，原子本身或為其集合體的所有物質包含更基本的粒子——電子，而這種粒子活潑得到處走動，這是任何人都不能否定的事實。」

電子也是波

羅倫茲偉大的成功，好像使物質中的電子像完全浮彫出來。但是，過了大約20年之後，解明了一個事實：電子不可能像羅倫茲的電子論，只是具有電荷 $-e$ ，質量 m 的粒子而已。最初發現的是美國貝爾電話研究所的特比生及舍瑪，接著是英國的湯姆生（在前文中出現的湯姆生的兒子）以及日本的菊池正士博士等。

他們解明了電子本身也是「波」的事實。這是很重要的發現，時間在1923～1928年。

若就歷史的演變來說，關於粒子性及波動性的爭論，在此發現之前已經就電磁波吵嚷了一陣子，而在量子力學出現之後，爭論已經開始有相當的解決。只是，不僅光且電子也是如此，等於發現了在物質一般有粒子及



圖 3-1 電子既為粒子且是波動

波動的「雙關論法」的事實。

總之，在此要來追蹤電子。在此出現的電子的波動性，是足以使羅倫茲輝煌的成功轉瞬間暗然無光的致命性打擊。因為，羅倫茲是明明認為電子是粒子而建立了他的理論。但是，現在卻有人主張電子是波。就當時來說，實在完全想不出應該如何去面對此種事態。

如本章開始時所述，電子的舉止奇妙。特比生等所獲得的結果若予模式化，即可以簡述如下。

假定在此有一個屏風，並在它上面穿二個洞。如果撲向它飛過去的電子為粒子，則必定會通過其中一個洞到反側。但是，事實上並不如此。一個電子同時穿過了二個洞，猶如在使用分身術潛逃。

是否一個電子變成二個而過？不！因為，若在一個

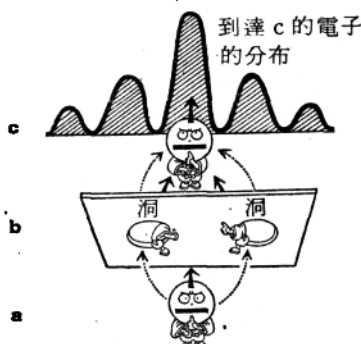


圖 3-2 電子的分身術。在 a 的電子同時從在 b 的二個洞鑽跑至 c，而在那裡的分布具有波動特有的性質。

洞找電子，即確實能逮住一個電子；但不可能在二個洞同時逮住電子。若想抓就能抓到，若抓不到，則只好認為一定是同時分別通過二個洞。表示同時通過二個洞的獨特的干涉現象。干涉現象正好證明電子是波。若抓到後驗身則確實是粒子，但若從干涉現象看起來則無疑是波，這也就難怪高雄的警察們對他無可奈何了。

何況電子會從密室逃走。這種現象通常叫做「隧道效應」，但決不是在牆有像隧道一樣的洞。但是，電子會從完全沒有洞的牆逃出，猶如從那裏的隧道出來。此現象也成為江崎博士所發現的「江崎二極管」的基礎，其具體說明因稍微麻煩而從略。總之，到了這個地步，若僅靠羅倫茲的粒子模式，則無法理解電子。

事實上，此種事不限於電子。在微觀的世界，不論是光或電子或質子，甚至它們複合而成的原子、分子等一切可認識的對象，依觀察的角度不同，看起來會像粒子，也會像波動。此種顯著的雙面性，沒有什麼例外。「到底是什麼東西？」即使不是古典的關卡管理員，誰也難免這麼說。

到底要如何統一在此出現的雙面性？換言之，會隱身的電子到底有什麼秘密？能回答此問題的，就是量子力學。物理學界的革命家普朗克，在1900年首先把微觀的世界開刀。我們現在所要申論的，是在那以後經過了20多年熱烈爭論後建立的新的物質觀。

何謂粒子

有幾個證據表示電子無疑的是粒子。密立根的實驗即是一例。首先做很細小的油滴，並讓它帶電（即是，附加或去除電子。）。結果，油滴的電荷，必然為某值 e 的整數倍。這不是只能認為電子的電量以 e 為單位嗎？

若想稍微直接的觀察，即可以利用威爾遜的霧箱。這是把利用下列性質的：若把電子放進填塞了過飽和水蒸氣的箱子內，則電子的軌跡會與形成飛機雲一樣的理由變成白線出現。

若對在此霧箱飛行中的電子施加磁場，即會依據定

律「磁場中的帶電粒子做圓運動」畫出美麗的弧。若知道當時電子的能量及電荷 e ，即在檢查磁場的強度後簡單的求出電子的質量 m 。電子的確是粒子。但若想真正理解「電子是粒子」，則在此應該稍微整理粒子本身的概念。

現在大家一起來考慮粒子或「粒」的概念。

在米粒或粟粒這種名詞裏面，我們暗中承認的到底是什麼？是指它「圓」的一事嗎？不！圓粒的確是最簡單的形狀，但不圓也無所謂。砂粒等未必是圓的。

那麼是否指「小」這一點？也不是。若問地球是否粒子，或許會有點不好回答，但恐怕不會反對它是粒子吧！地球可說是宇宙的沙粒。

那麼，可以定義粒子為具有有限體積的塊嗎？這次好像不會有問題。但是，只要是稍微知道力學初步的人，一定聽過「質點」這個概念。質點是在論物體的力學時理想化的一個存在，是指物質 M 的東西集中於空間的某一點時的假想物體，是所謂「理想的粒子」。例如在討論太陽周圍的地球運動時說，可以彼此調換為質點考慮。

那麼，在極端的時候，粒子可以不具有有限的體積。或許寧可說不應該拘束於體積。我們很隨便的用「粒子」這句話，但若仔細考慮則很難下明確的定義。

粒子的定義

事實上粒子即是「能計數的東西」。無論怎樣大或小，只要能計數即是粒子。米粒的確可以計數，故為粒子。電子雖然肉眼看不見且呈波動，但能用 e 的單位算電荷，故為粒子。或者可以說能用質量 m 的單位計數。原子或分子也顯然可以計數，因此也是粒子。

如果可以這樣定義粒子，則讀者必能發覺，粒子像本身會隨對於物的看法而變化多端。在空氣或水之類的物質名詞，沒有應該當做粒子的對象。但是，如果注意同樣構成空氣或水的原子或分子，則它們是粒子。

啤酒本身不是粒子。但是，裝在瓶內的啤酒是粒子。即是，若物質的區分方式有條不紊或能區分的整整齊齊，即誕生合於概念的粒子。若把啤酒瓶裝成紙箱，即成為一種新粒子。

一隻雞無疑的是粒子。但若壓碎變成雞肉，則不再是粒子。因為，雞已經變成物質名詞，可任意切成 100 公克或一盎司。

量子力學對我們提供了新概念的許多粒子。「量子」這句話，直截了當的表示了這件事。

把原來只能用「量」計測的東西，重新組織為像電子一樣可以逐一計數的「子」，這就是量子力學的出發

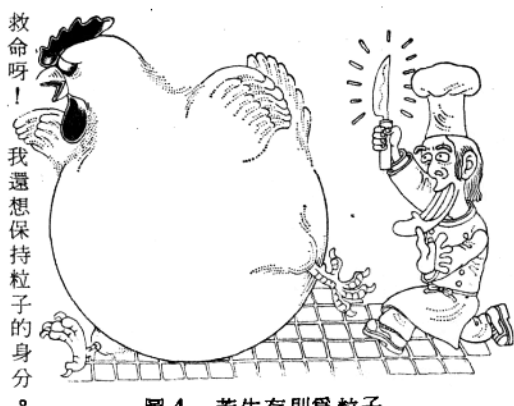


圖 4 若生存則為粒子

點。本來能量是物質(?)名詞的代表級，但是，普朗克卻帶來能量量子，組織它成為可以計數的。這是宛如主張「空氣是分子的集合體而非連續體」的革命性變更。

會改變面貌的粒子

在物質科學登場的粒子，多采多姿。最基本的粒子是原子或分子，是電子或原子核。但是，量子力學讓物質推出了無限多且不斷變貌的新粒子。普朗克所引進的是光的量子——光子。因而理解了熱輻射的問題，接著又明白了所有運動都必須量子化。

例如，熱運動過去被視為古典的連續體的活動。但是，它也需要接受量子化的規律。結果表示，自由粒子

的運動可以保持原有的觀念，但在組織成結晶格子的系統，其振動（包括熱振動在內）都應該量子化。這種量子叫做「聲子」。

讀者或許會想，電子可以永遠是電子這種粒子嗎？事實上，在物質中不許如此。有時電子聚集後產生完全不同的粒子。將在第8章出現的超導電的本質，可以用二個電子組成的叫做「庫拍對」的粒子之存在說明。或引進叫做「磁子」的新粒子說明在磁性體的粒子。它們看起來是很新穎的粒子，事實上是電子聚集後而成的新粒子。

我們可以比喻如下。誰都知道，米粒的確是清楚的粒子。但是，若煮成爲飯則怎樣？粒子彼此黏合在一起，彼此的界線模糊不清。這種現象不適合於米粒的粒子性。但是，若米粒容易黏合，即能形成別的粒子，例如飯團。

以米粒爲素材的這個不同種的新粒子，具有新的特性。例如，他可以在外面包海苔，也可以在裏面塞酸梅。讀者可以理解它具有米粒所缺的新性質吧！無論庫拍對或磁子，都被當做具有此種新性質的粒子處理。配合它所處的物理環境登場的粒子，也開始呈現各種面貌。

量子論所帶來的是，在物質這個舞台有無數的粒子出現，而爲了理解物質則必須解明對粒子的認識。關於

粒子的概念就此結束，現在來考慮粒子的另一個面貌——波。

看見的波及看不見的波

就盛行製造並使用電子顯微鏡來說，日本如今是世界有數的國家之一。電子顯微鏡具有卓越的解像力，甚至可以直接拍攝各種病毒。

這個裝置是把電子比擬為光，利用其波的性質。其中既像光學顯微鏡有透鏡（用磁場而非使用玻璃），也仍舊使用以透鏡的焦點距離為 f ，物體與透鏡及透鏡與映像的距離分別為 a 、 b ……的，似乎是聽過且令人難忘的光學公式。在我們的眼前，如此擺了「電子是波」這個很單純的事實。但是，這個事實似乎與完全所述的電子之粒子說完全矛盾。這一點應該怎樣想？

現在，對此問題提出正確的解答之前，先來整理我們關於「波」的概念。

事實上，波的種類很多，若想理解電子的波動性，必須使波本身的概念清楚。

從「波」這一句，我們可能首先想到在水面形成的波。大的起伏或微波，雖然其形態千差萬別，但一說到波，我們就會有水面彎彎曲曲的動且隨著時間傳過去的印象。

我們會立即在腦中想起的此種波，是產生於空氣與水之界面的所謂「表面波」，在直觀上最容易理解。

一般來說，若有界面即有表面波存在。無論在被朝陽照亮的小珠兒般的露水那種小表面，或像地震在地球的表面，或在暖流與寒流的那看不見的交界，或在微觀世界的原子核的表面都有波。

其次有不像表面波那麼有視覺性的，稍微抽象的波。音波或在地震波中從地中深處的震源一直過來的波就是這類波。

這些波無法用肉眼看清楚波的形狀。它不像表面波交界處動而呈波狀。如果要勉強地看，則看在波之媒體的末端的——若以音為例是音源揚聲器的推動板——細微的振動，或看大廈因地震而搖動等，而間接的「看」波的存在。但是，若仔細的考慮，要造成此種波的印象並不怎麼難。

音波的本質為所謂「疏密波」。若使空氣有濃淡之別，則由於濃的地方的壓力大，而促使空氣想向外移動。另一方面在空氣稀薄的地方，則相反的想從外面流入。如此在空氣中傳進疏密之反覆的即是音。

波的表現對象

音波以及在此沒有敘述的所謂彈性波，都能憑我們的日常經驗理解。另一種抽象化的波是電磁波。它到底那一點抽象？首先是它沒有傳遞波的媒體。表面波有二個可以區別的認識對象空氣與水，且有它們的交界。對於疏密波或彈性波來說交界並不重要，「預先」存在身為媒體的空氣或液體、固體，在其中產生了波。

但是，電磁波不需要媒體。若稍微正確地說，「什麼都沒有」的真空即是媒體。日常世界的波由於媒體動才會看起來是波，但是若媒體是真空則沒有可以看見的東西。這實在太可靠了。但是，乍見之下不可靠的抽象化的波之觀念，卻是近代物理學的最重要關鍵之一。

物理學家長期間認為以太是光的媒體，而過分被此種想法拘束。他們認為波動以有媒體為前提。他們認為，媒體是「靜止的某種東西」，而推動它的就是波。附帶的說，愛因斯坦的相對論，是從打破對於媒體之既有概念的範圍開始的。

由於沒有媒體，電磁波被抽象化。當然，眼睛不會直接看見波形。但是，若想看波形還是有辦法。準備適當的眼睛即可。在此說的眼睛是所謂「示波器 (oscilloscope)」，可以電的波變化為正或負的情況描成為波