

光

電效應指的是當金屬表面以光照耀時，會有電子射出來。而且電子的能量與光的強度無關但與頻率有關。它的發現要追溯至19世紀末，物理學大躍進的年代。

光照負極為何會放電？

在19世紀末，電子尚未被發現，人們對物體的導電仍然不甚了解。1887年赫茲(H. Hertz)進行氣體導電實驗時，發現用紫外光射到電極會造成放電現象。當電極間距離加大，使放電現象消失時，光照到負極仍會造成放

電。赫茲是當時最受人尊敬的實驗物理學家，他在電磁學上做了許多重要的實驗，包括發現電磁波；這對於當時正被研究的電磁波動性有重要的貢獻。

另一位當時的偉大物理學家勒納(Philipp Lenard)對光電效應也作了許多重要的實驗，但是對陰極射出物為何種物質一直不明瞭。1897年時，湯姆生(J. J. Thomason)測定了電子的存在，次年湯姆生與勒那共同提出陰極射線即是電子，至此光電效應的粒子身分得到了確認。

五年後，勒那做了一個重要的實驗。他理解到電子的速度或

動能在這裡扮演重要的角色，所以在兩電極間加反向電壓，以阻止陰極電子射出。但是他發現即使加上反向電壓，在某些光照耀時仍有電子射出，而抵達陽極，證明電子帶有一定的動能。他的裝置如圖一所示，若將反向電壓一直加大，直到光電流截止(此即截止電壓)，這電壓就是電子的最大動能。勒納發現影響電子速度最大的是光的頻率而非強度。至此光電效應的現象已十分清楚，就是缺少合理的解釋。

用粒子觀點 解釋光電效應

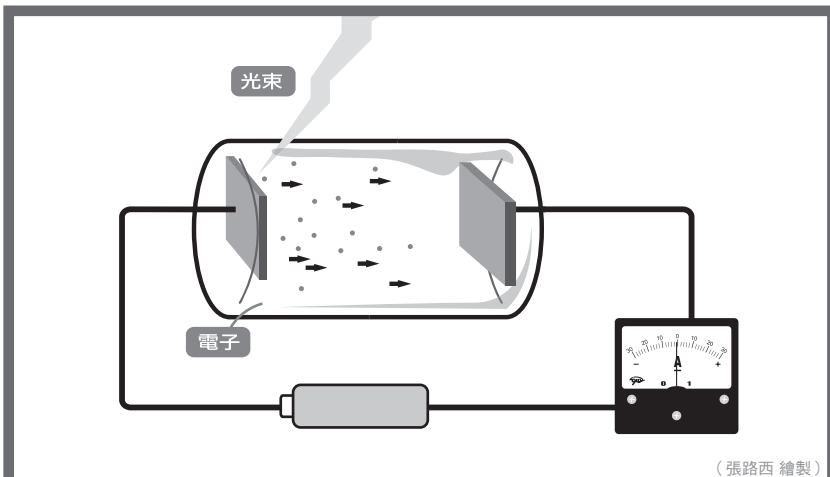
開啓量子物理先端 ——光電效應

愛因斯坦在1905年提出對光電效應的理論解釋。他突破當時光為波動的想法，根據普朗克量子論將光看成粒子，認為光是以粒子的形式與金屬表面作用，而非波動。

倪簡白

World Year of
PHYSICS
2005

世界物理年



圖一：光電效應實驗。光射到陽極後將電子激發出來，陰極的反向電壓可阻止電子的射出。若增加電壓直到量不出電流值時的電壓為截止電壓，這時阻止電子射出的能量即是電子的動能。

由於當時光為波動的想法盛行一時，在此理論下光的能量應正比於光強度而非頻率，所以波動理論無法解釋勒納的光電效應實驗。1901年時普朗克提出輻射的量子理論，解決了當時的另一難題，即黑體輻射問題。因此量子理論成為當時物理界的新學說，只是並不被完全接受。

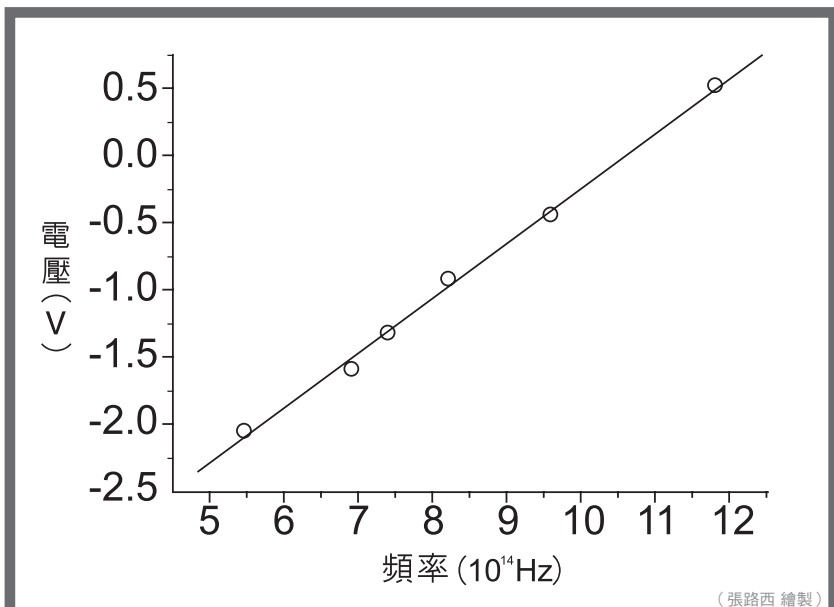
愛因斯坦在1905年提出對光電效應的理論解釋。他認為光是以粒子的形式與金屬表面作用，而非波動。而光子的能量就正比於其頻率 ($E=h\nu$)。愛因斯坦的這篇論文完成於1905年3月17日，發表在德國的物理學雜誌 (*Annalen der Physik*, vol 17, 132~148)，題目是〈關於光的產生和轉化的一個啟發性觀點〉。這篇論文是他在1905年所寫的五篇重要論文之一。

就像他的許多物理理論，愛

因斯坦突破當時光波動的想法，根據普朗克量子論將光看成粒子。我們現在可以從愛因斯坦論文中的一段話來了解他的想法：運用連續空間函數來計算的光波動理論，在描述純粹的光學現象時已被證明是十分卓越的，

而且似乎很難用任何的理論來代替。可是不應當忘記的是，光學觀測都與時間平均值有關而不是時間的瞬時值。而且儘管繞射、反射、折射與色散等理論完全為實驗所證實，但仍可設想當人們把空間連續函數的光學理論應用到光的產生和轉變現象時，這個理論會導致與實驗矛盾。確實在我看來關於黑體輻射、光致發光 (photoluminescence)、紫外光產生陰極極射線，以及其他一些關於光的產生和轉化現象的觀察，如果用光能量在空間中不是連續分布的這種假說來解釋，似乎就更好理解。

愛因斯坦的光電效應理論認為光是粒子，光子能量大小，只



圖二：1916年密立根設計了一個實驗來證明光電效應的正確性。他利用各種波長的光將電子激發出來，並將截止電壓值 (V) 與對應的頻率 (ν) 做圖，結果證明愛因斯坦方程式完全正確而且導出了普朗克常數。圖中直線的斜率為普朗克常數 ($h = 6.56 \times 10^{34}$)。

與光的頻率 (ν) 有關, $h = 6.56 \times 10^{34}$ (焦耳·秒) 為普朗克常數。當光入射一金屬表面, 被打出的光電子具有能量。 Φ 為金屬內的電子束縛能, 此能量稱工作函數 (work function), 工作函數隨金屬的不同而異。愛因斯坦理論圓滿地解釋了光電效應, 但也使人們造成更大的困惑——光究竟是波還是粒子?

究竟是波還是粒子?

其實光的粒子性是首先由牛頓於三百多年前提出的。牛頓在他的名著 *Treatise on Opticks* 中講到, 光是由發亮物體所射出的微小物體。當時另一位科學家惠更斯 (Christian Huygens) 提出光的波動說, 但不為當時所接受。直到 1801 年楊格 (Thomas Young) 提出光具有干涉性質的實驗證據, 使光的波動性深植人心, 有

很長的一段時間人們相信光是波動。到 19 世紀中, 馬克士威的電磁波理論更加顯示光與波間一定的關係。後來到普朗克的量子理論與愛因斯坦的光電效應使光又要回到牛頓的說法, 波與粒子的問題更加複雜, 但是也促使人們必須重新認識這些問題。

不久後, 1923 年康普頓 (A. H. Compton) 設計一實驗, 利用 X 光將原子內電子打出來, 從而發現 X 光的能量變化必須用量子假設, 確立光量子的地位。因此光有粒子的性質已無庸置疑。

愛因斯坦的光電方程式顯示: 光電子的動能正比於光的頻率, 而且比例常數就是普朗克常數。在 1916 年, 密立根根據這個觀念設計了實驗來證明光電效應的正確性。他利用各種波長的光將電子激發出來, 並將截止電壓值與對應的頻率做圖, 結果證明愛因斯坦方程式完全正確而且導

出了普朗克常數, 如圖二所示。

諾貝爾物理獎及後續

愛因斯坦雖然以相對論成名, 但是在當時還未獲得廣泛的支持。反而是因為對光電效應所提出的正確解釋, 使他在 1921 年獲諾貝爾獎; 其實 1905 年諾貝爾物理獎也是頒給在光電效應實驗上有顯著貢獻的勒那。諾貝爾物理獎頒發的理由是表揚勒那對陰極射線的研究。

雖然愛因斯坦首先提出光的量子理論, 但他並不接受隨後由波爾、海森堡、薛丁格與狄拉克等人所提出的量子物理。在量子物理中使用波函數來描述電子原子等物質, 與當年愛因斯坦是將光波化為量子, 兩者似乎反其道而行, 但實際上是一體的。

我們可以說原子行進時都呈現波動性質, 而與其他物質作用時就呈現粒子特性。物質波與或然率的觀念已被無數的實驗所驗證, 但是愛因斯坦並不滿意。他終其一生都相信上帝並不會玩骰子。但他的一些想法, 如與波多斯基 (Podolsky)、羅森 (Rosen) 三人提出的 EPR 想像實驗, 至今還在物理界蕩漾不已。☯

倪簡白: 任教中央大學物理系

光電效應的應用

光電效應如今是許多實用儀器的基礎, 例如利用酒精檢測器裡的光電池來感應化學反應後的顏色變化, 利用自然光源來自動調節街燈的開關, 利用不同的曝光量來調節影印機碳粉的濃度, 以及利用太陽光轉換成電能供人們日常使用等。另外, 高樓大廈自動門上的電子眼, 內部的光電池能感應光線強度的變化, 造成偵測器內電流改變以控制門的開關; 天文偵測器及電視攝影機裡皆會使用到的光電倍增管, 也是利用光電效應將光轉為電子脈衝來產生訊號。