

p6 粒子與波的 雙重性

文·圖—林志隆

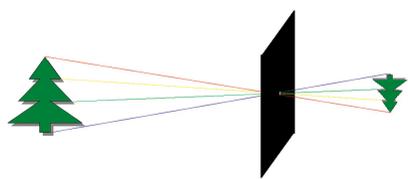


圖1 針孔成像，物體上方的光直直穿過針孔會跑到下方，一一對應後，不難理解為什麼影像跟物體會上下相反。

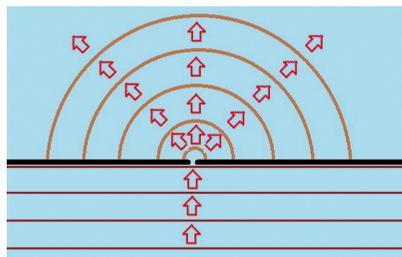


圖2 以水波為例，直線型的水波遇到只有一個小缺口的障礙物時，不是只有從缺口直直前進，還會向兩邊散成弧狀，這就是所謂的繞射現象，是「波」特有的性質。

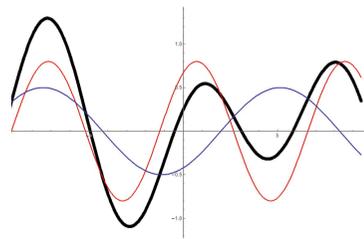


圖3 波的另一個特性是可以疊加(干涉)，兩個波(紅與藍)相遇的時候，其波動振幅(高度)就是在任一點把兩個波的高度相加，最後形成另一個不同的波形(粗黑線)，這是一種干涉現象。

在物理學發展上，19世紀末到20世紀初這一段從古典物理轉換到近代物理(以量子物理學和相對論的發展為兩大

主幹)的過程中，曾經出現過許多超乎想像的發展，它們改變了人們對於這個世界的認知。這樣的改變不只是在科學上，其影響更延伸到人類對宇宙的認知與思考。其中一項就是光和物質呈現粒子與波的雙重性。

在古典物理中，有形有體的物質(粒子)和無形無體只能附載在物質上面的波是截然不同的兩種概念。物質就是有形有體有重(質)量可以自己獨立存在的東西，至於波則是一種能量的傳遞過程，必須依附在某些載體或媒介物質(不管是固態、液態或是氣態)上，一旦拿掉這些物質，波就無法存在和傳遞。在這樣的概念下，波必須不斷移動，不能夠停下來，一旦靜止不動，波就消失了。

在以前的小學自然課或是許多博物館的展示裡面，曾經有一項實驗，先在玻璃罩裡面放置電鈴，再抽成真空。當玻璃罩裡面的空氣逐漸被抽掉的時候，聲波因為失去了傳遞的媒介物質而傳不出來，外頭的觀眾就會聽到鈴聲越來越小一直到消失。而一般常見的水波是以水做媒介、繩波以繩子做媒介、彈簧波則是以彈簧做為媒介，不管是縱波或是橫波，每種波都需要一種能承載它的媒介。

可是當時還是有一種科學家無法明確判斷它是粒子還是波的怪東西—光。光，有的時候看起來像是粒子，有時候卻又呈現波的特性，因而困擾了物理學家數百年的時間。認為光是粒子的人可以舉出許多現象證明它們有粒子的性質，可是認為光是波的科學家也可以舉出許多現象說它有波的特性。這些爭論就是促進新物理學—量子物理誕生的重要推手。

西元前5世紀的墨子一書裡曾記錄了：「景(影)倒，在午有端」，被許多人認為是描述通過針孔而出現與原來物體上下顛倒的影像的一種現象。後人進一步解釋為，如果把光走的路線像圖1這樣畫成直線，物體上方的光通過小孔後會跑到影像下方，而物體下方的光則會跑到影像的上方，而且一一各有對應的位置，因此針孔成像被認為是支持光粒子說的有力證據。在後來的西方科學家裡面，牛頓是支持粒子說的代表人物，可是粒子說卻無法解釋他在吹泡泡時發現的七彩圈圈(牛頓環)現象。雖然牛頓的光粒子說有很多地方難以自圓其說，但是在牛頓的權威下，粒子說還是成為16-17世紀時期的主流學說。

光的波動性主要呈現在繞射和干涉兩種現象。繞射現象最常見於水波遇到阻礙的時候，如果水波遇到的障礙是一個小缺口的整面障礙，這時的水波不是只有穿過缺口直直前進，而且會從缺口處向兩邊散開形成一圈圈新的水波。如果

障礙是單一個物體，這時水波可以繞過障礙物而席捲後方的物體。這兩種情況都是直進的粒子不該出現的現象。

而干涉現象指的是波的強度可以互相疊加的現象。簡單說，當兩個波跑到相同位置時，所看到的波強度是兩者疊合之後的結果。如果一個高一一個低的話，結果就是會互相抵消而使波變弱；如果兩個都是高或低的話，疊加的結果就是更高或更低。

和牛頓大約同年代的荷蘭科學家惠更斯(Christiaan Huygens)和英國的虎克(Robert Hooke)則是光波動說的領導人物。惠更斯假設光波是一種均勻散布在宇宙中的「乙太」上的波動現象(不過乙太這個假說在20世紀初被麥克遜-莫雷的干涉實驗推翻了)，並且他用光波在不同介質中會有不同波速(就好像水深不同會使水波速度變化一樣)的概念來解釋光的折射現象。他這種對於繞射和干涉現象的預測，隔了一百多年之後才在1802年被楊氏(Thomas Young)的雙狹縫實驗所證實。楊氏不只驗證了光的繞射和干涉預測，還成功測到光的偏振現象，並提出顏色是由光波的波長所決定以及許多視覺色彩的想法。之後菲涅爾(Augustin-Jean Fresnel)為楊氏的實驗結果提出完整的數學理論，至此光的波動說幾乎完全打敗了粒子說。加上19世紀中葉法拉第(Michael Faraday)發現電磁場會干擾介質中的光，因而認為光也是一種電磁波。最終，馬克士威(James Clerk Maxwell)以他著名的電磁學方程式統合了光和電磁作用的關係，古典物理學到此幾乎已經就是巔峰了。

雖然光波動說在19世紀幾乎獲得全面勝利，可是到了19世紀末卻又出現了一些波動說所解釋不了的新的現象，其中最大的爭議就是「光電效應」這個現象。所謂光電效應是指用光去照射一些金屬的時候，有時候會有電子跑出來。依照波動理論，只要用光一直照射，照久了或照多了總會疊加出一個能量夠高的狀態可以把電子從原子中頂出來。可是真實的實驗結果卻是：如果是用低於某個頻率的光，照射再久也不會有電子跑出來；但是如果光的頻率夠高，就算很弱的光也會有電子跑出來。這就不像波動說而比較像是粒子撞擊的效果了。

當原有的科學理論無法解釋新的現象時，通常就是新科學該登場的時候了。就像當初粒子說無法解釋繞射和干涉現象，引出了波動說的登場。光電效應顯然適合用粒子說來解釋，可是波動說在其他方面又那麼成功，之後，光波透過「乙太」傳遞的假說又在1887年被麥克遜-莫雷實驗否定了，那麼到底光是粒子還是波動呢？這

個問題終於在1905年被愛因斯坦用一個很「鄉愿」的假說解決掉了：「對對對，你也對，他也對，光既是粒子也是波」，也就是我們現在所知的波粒雙重性。

愛因斯坦把光形容成一顆顆稱為「光子」(photon)的粒子，但是每一顆光子本身都在振動，光子本身就是光波的載體，所以它們在真空中也可以傳播。而每顆光子所攜帶的能量取決於它的振動頻率，所以頻率高的光子能量也高，光子的能量有多高，被打到的電子就能跳多高。我們可以想像成有些光子能讓電子跳2米高，有些則可以跳3米高，如果有一口井的深度是2.5米，那些只能讓電子跳2米高的光再怎麼打，電子都還是跳不出那口井。而如果用能量高一點的光子去打，那電子不但可以從井裡跳出來，而且還會比井口高一些。所以，愛因斯坦在他的論文裡就提出了著名的光電效應方程式

$$h\nu = K_{\max} + W,$$

公式裡的 h 是一個叫做普朗克常數的量， ν 是光的頻率， K_{\max} 是跑出來的電子的最大動能， W 叫做逃逸功(也就是那個井的深度)。基本上這個公式的意思是說， h 乘上 ν 是光子的能量，如果比 W 還要小，當然就無法從井裡跳出來。而如果 $h\nu$ 比 W 還要大，那就不只可以跳出井來，而且會跳得比井口還高出 $h\nu - W$ 的高度。

愛因斯坦因為成功地解決了光電效應的問題，加上同年另一篇有關花粉微粒振動的布朗效應論文，所以獲得了1921年的諾貝爾物理獎。這一篇論文中提到的波粒雙重性不只解決了光電效應的問題，讓愛因斯坦獲得諾貝爾獎，後續還引出更多延伸發展，成為20世紀初蓬勃發展的新物理學—量子物理的源頭之一。

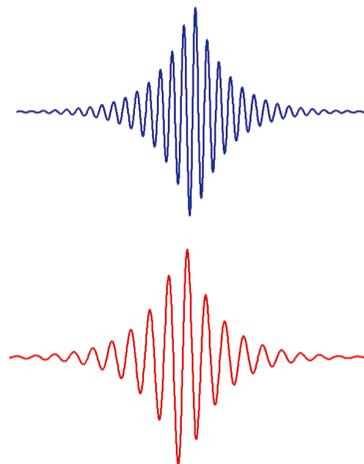


圖4 光是自身帶有波動的粒子。愛因斯坦建議光既有粒子也有波的特性，它是一個本身帶有振動的粒子。我們可以把它們想像成圖中的樣子，頻率高波長短的藍光波動比較緊密，所帶的能量也比較高，而比較鬆散的紅光光子能量比較低。

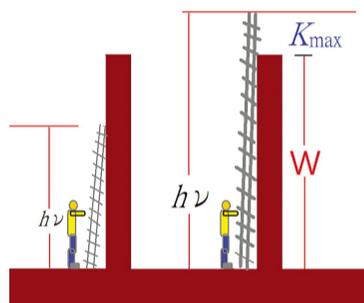


圖5 假想有人(電子)被困在一個深度W的洞裡，如果他只有一個高度不到W的梯子，那他怎麼爬也出不了那個洞(圖左)。如果梯子比W還要高，那他不只可以爬出洞，還可以爬到比洞口高出K_max的地方(圖右)。