

粒子與波的雙重性—物質波篇

文·圖／林志隆

摘要

光電效應說光既是粒子也是波，光具有波粒二象性（或雙重性）。可是一般的粒子也會這樣嗎？它們也會有波動的性質（繞射跟干涉）嗎？如果有的話它們會是什麼樣子？要怎樣設計實驗才能看到這樣的現象？本文就從德布洛伊的物質波奇想開始，看看這一連串的奇思幻想是如何形成並被驗證。

關鍵詞：德布洛伊、物質波、電子繞射、量子物理、質能轉換

在本館館訊第 395 期中曾經提到過，「粒子與波的雙重性」(或者直接來說稱為「光電效應」)研究讓愛因斯坦得到了 1921 年的諾貝爾物理獎。但是這個雙重性的研究不只讓愛因斯坦拿到諾貝爾獎，從另一個方向研究的結果，也讓路易·德布洛伊(Louis de Broglie)在 1929 年拿到另一個諾貝爾物理獎，而設計實驗證實德布洛伊的物質波假想的戴維森(Davisson)和湯姆森(Thomson)則拿到 1937 年的諾貝爾物理獎。

在光電效應研究中，愛因斯坦把光形容成一種自帶波動性的粒子—光子，這種為粒子與波的雙重性。而你會看到它的波動性或是粒子性，則決定於你用什麼方法去測量它，例如你讓它們通過一扇比它們的大小寬很多的門，就看到它們是一顆一顆的像個粒子；可是如果這個門很窄，窄到比它們的大小還要窄很多，這時在門後看到的光子不會完全消失，只是變得很少很少而已，這時那種見縫就鑽、無孔不入的波動性就表露無疑了。

在古典物理（一般以年代分，大約是到 19 世紀末為止）中能量和物質是兩種截然不同的東西，物質是有形、有體能獨立存在的實體，能量則是無形、無體只能依附在物質上的抽象概念，例如動能、位能合稱為力學能（很久很久以前的教科書誤譯為機械能），甚或延伸推廣至熱能（在微觀研究中發現，熱或溫度只是物體的組成粒子的動能的外在、巨觀表現），而動能或位能這種東西不會自己獨立存在。

從 20 世紀初開始的近代物理，主要包含量子力學和相對論兩大主題。而愛因斯坦在 1905 年發表的狹義相對論中，就提出了經常會在電視、電影裡的黑板上看到的一個公式

$$E = m C^2$$

這個公式裡的 E 代表能量，m 代表質量，C 則是一個常數—光速。

這個公式的意思就是把能量跟質量畫上了等號，也就是質量和能量可以換來搬去的。在古典物理裡頂多是質量不減跟能量不減（這裡的能量包含動能、位能、熱能、化學能等等各種形式的能量），它們各自不減。但是愛因斯坦這個公式把兩邊的隔欄打開了一個洞，質量可以消失轉換成能量，能量也可以消失變成質量。而質量旁邊的光速 C 是一個很大的數字，平方之後又更不得了，意思是只要一點點質量就可以轉換成非常巨大的能量，於是導致了後來核子研究的武器化，讓美國生產了兩顆原子彈丟在日本的廣島跟長崎。

在講光電效應的前一篇文章中提到過普朗克發現光子的能量 E 和振動頻率 ν （或是波長的倒數）成正比，所以提出了普朗克關係式 $E=h\nu$ ，h 叫做普朗克常數，所以頻率越高的光子能量越大。那麼，如果把它跟上面的質能轉換公式連結起來，會不會有質量的粒子也有一個振動頻率呢？或是說有質量的物質會不會也

有波動的性質呢？這就是德布洛伊得到 1929 年諾貝爾獎的「物質波」研究。

德布洛伊是位法國科學家，他在大學原本是念歷史跟法律，後來因為受到學物理的哥哥影響而改學物理，一不小心就拿了一個諾貝爾物理獎。他在 1924 年完成的博士論文中把普朗克公式和質能轉換公式的概念連結起來，並且推論如果反過來粒子也有波動性的話，那麼，當時所知最輕的電子應該也會具有一個波長

$$\lambda = h/p$$

這個 p 是粒子的動量，或是可以代換成質量乘以速度 $p=mv$ 。

由這個公式來看，質量越小波長越大，而波長太小的話繞射和干涉的效應會很不明顯、很難做實驗，所以他選了當時所知質量最小的粒子－電子來做計算。3 年後，蘇格蘭的湯姆森(Thomson)用電子束射擊薄金屬片，而美國的戴維森(Davisson)和革莫(Germer)則是把電子打入鎳晶體，兩者的共同點就是讓電子通過規則排列的障礙物，如果電子帶有波動性的話，那麼電子就會繞射過障礙物產生干涉紋路。由這兩個實驗觀測到原先預測的干涉現象及條紋，證實了德布洛伊的物質波假說，所以湯姆森跟戴維森也因此獲得了 1937 年的諾貝爾物理獎。現今許多精密實驗常用的電子顯微鏡，就是從電子繞射實驗發展出來的技術。

普朗克和愛因斯坦的研究顯示光同時具有粒子和波的性質，德布洛伊的物質波假說則更進一步說明物質也可以有波動性，實驗者看到的是粒子性或波動性，則依實驗條件而變。一般來說，當實驗的尺度比較大、比較巨觀的時候，粒子性會比較明顯，但是當實驗尺度很小、很微細的時候，波動性的穿透力（繞射）與干涉就會變得很顯著。

光與物質的雙重性都是 20 世紀以前的古典物理所無法解釋的現象，因此在 20 世紀初促成了近代物理（尤其是量子物理這門學問）的快速發展。所以，每到了科學家為一些不可思議無法解釋的現象所困擾痛苦的時候，其實就代表新科學和新突破即將到來。或者我們可以這麼說：「沒有問題，問題就不會解決」。

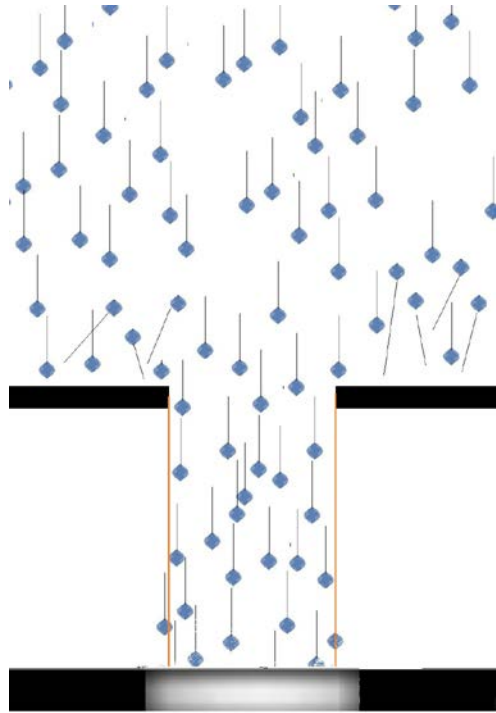


圖 1. 當一堆波動的粒子衝向一個敞開寬廣的大門時，有許多粒子會從開口處直接穿過，如果在門後放一個偵測器的話，會看到粒子幾乎集中在門的正後方，只要稍微偏離門邊一點點就看不到了。

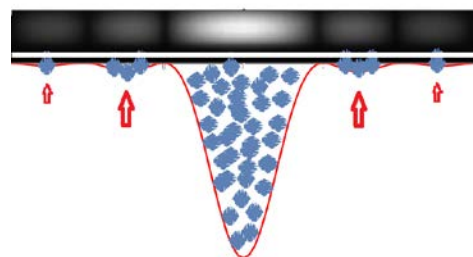
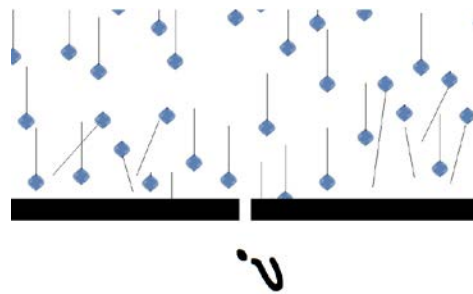


圖 2. 當門的寬度跟粒子大小差不多的時候，直接穿過的粒子變少了，這時我們才會注意到兩側被牆擋住的地方，竟然也測得到極為少量的粒子。圖下方是實驗拍攝的繞射紋路，下方起伏的線條是用波動理論推算的粒子分布圖，我們可以把它想像成攔住粒子的網籃，中央攔到較多的粒子多，而垂得比較厲害，但是兩邊會有些地方沒有攔到東西，而距離中央更遠處(兩側箭頭處)卻反而有攔到東西。

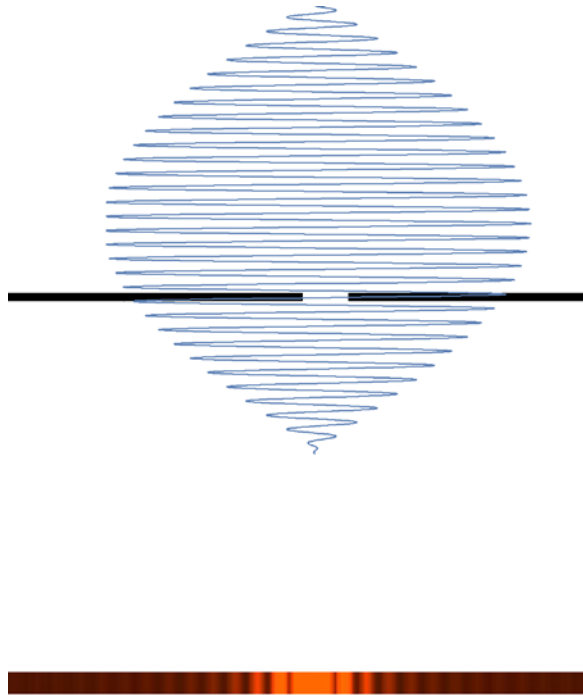


圖 3. 當門比粒子還要小很多的時候，照理說粒子應該一個都穿不過去，可是在門後方還是可以測得到粒子出現，雖然數量非常非常的少，而它們的數量(強度)和出現位置的關係，卻都符合波動說的繞射與干涉的計算結果。



圖 4. 提出物質波假說的路易·德布洛伊(肖像照片取自維基百科，版權已公開)



圖 6. 湯姆森用電子束射擊金屬箔，看到電子繞射過金屬原子而產生紋路，證實電子也具有波動性(肖像照片取自維基百科，版權已公開)



圖 5. 戴維森(左)跟革莫(右)則由射擊鎳的晶體看到電子的繞射現象(肖像照片取自維基百科，版權已公開)

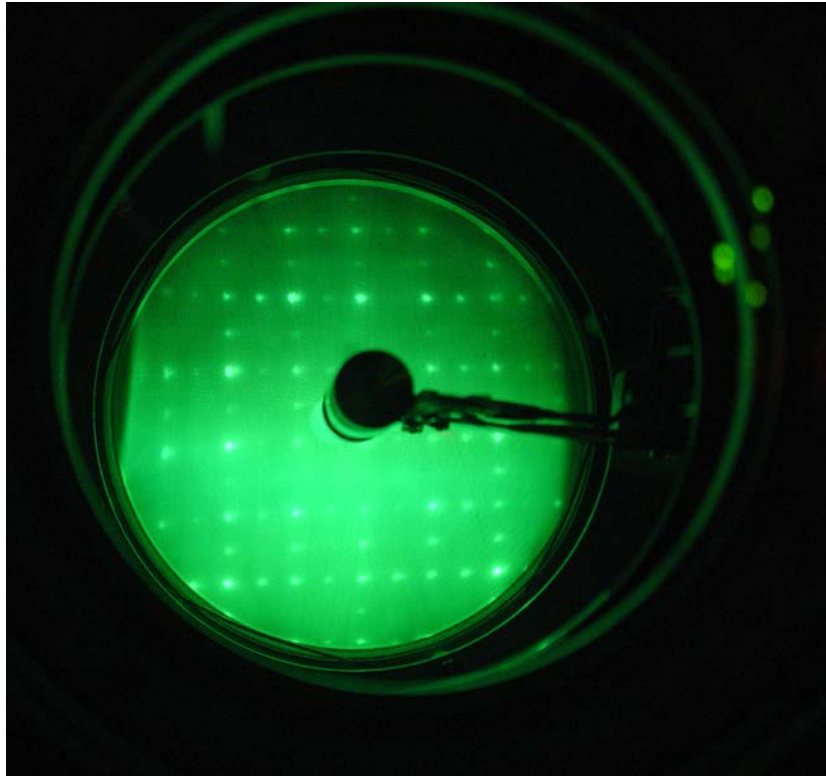


圖 7. 維基百科上由作者 Killkoll(可能是暱稱)提供的矽原子繞射條紋圖片