



波與粒子

● 傅俊結*

人類的科學歷史上，爭議持續最久，最激烈的一場爭辯，應該就是光的本質這個問題。光是我們每天時時刻刻，都可以感受得到，看得到的一種東西或者現象，雖然光有不同的顏色。自古以來，尤其是幾百年以前的以前，科學還沒昌盛的那個年代，偉大人物的出生，偉大朝代的出現，種種的偉大的現象，好像都會跟光扯上關係。對我們這些科學的門外漢來講，問說光是什麼的這種問題，好像是一個很無聊的問題，但是，對科學家來說，光的本質是什麼，卻是一個大問題，如果要說得誇張一點，科學家藉由這個大問題的探討，才有我們現在的手機，電腦等等的 3C 產品，事實上這樣講，對真正了解科學歷史的人來說，是一點也不誇張的。簡單地說：光是什麼？或者，換另一個問法，光不是什麼？就是這樣。

光是什麼？幾百幾千年前，民智未開的年代，答案就是金、木、水、火、土。這些老祖先的答案，以現在的術語來講，就是智障。那以現代的人類來講，答案就只有兩種，不是波就是粒子，沒有第三者，如果要勉強擠出第三種答案，那就是，光既是波也是粒子，靠，蠻好笑的答案。不過，說不定這第三種答案才是正確的答案。就從牛頓開始講起吧，反正談到近代的科學觀點，科學理論，八九不離十從牛頓開始談起應該錯不了。牛頓之前，關於光的特性，唯一可以流傳後世的，就是費馬的最短路徑原理。這個費馬，就是幾年之前，媒體有普遍性報導，普林斯頓的一位數學家證明了費馬最後定理的那個費馬。費馬說，兩點之間的光線，總是走最短的路徑，這個聽起

* 傅俊結，南台科技大學電子工程系副教授。

來好像是廢話，但是費馬是可以證明的。

牛頓一開始對光是粒子還是波動並沒有一定的二選一，事實上，他搖擺不定。後來的牛頓選擇站在粒子論這一邊，除了科學原因之外，歷史學家相信，多多少少也參雜了私人的恩怨，就是牛頓與胡克的私人恩怨。話說牛頓發表了他的第一篇正式科學論文，關於光與色的新理論，牛頓在這邊論文中，引進了光是粒子組成的觀點，這篇論文被送到胡克的手中之後，悲劇就發生了，胡克對牛頓的這篇論文，下這樣的評論：有關色彩的復合，是剽竊他的成果，而有關光是由粒子組成的說法，則是不值得一提。因為胡克支持光是一種波動。牛頓知道胡克的評語之後，非常的不爽，自己把論文撤回，而且把他那還沒出版的劃時代著作，自然哲學的數學原理，中有關引用胡克的工作結果，都從書中刪除。牛頓之所以會這麼不爽，還有另外一個主要原因，就是胡克一直到處宣傳，牛頓的萬有引力定律中的力與距離平方成反比定律，事實上是自己在給牛頓的信函中提出來的，只是胡克自己不會微積分這個數學工具。而牛頓也從不提胡克在他的萬有引力理論方面的貢獻，就這樣兩個人之間的恩恩怨怨可以說是愈結愈深。

胡克在那時的英國也算是牛頓的前輩，也是有他自己的科學成就，所以牛頓也不好意思全面迎擊光的波動理論，那時支持光的波動說的，除了胡克之外，另外一個大咖級的，就是荷蘭的物理學家惠更斯。尤其在 1690 年，惠更斯出版了他的專業著作，光論，之後，整個波動說可以說是達到了頂峰。

1703 年胡克死了，牛頓開始對光是一種波動的觀點，全面反擊。他在隔一年，1704 年，出版了他的著作，光學，這是除了自然哲學的數學原理之外，牛頓的另外一本重要著作。牛頓在光學這本書中，詳細的用粒子理論來解釋光的色彩的結合與分散，並提出強烈的質疑，如果光是一種類似聲音的波動的話，那為什麼光線無法像聲音一樣穿越牆壁，牛頓也提出了一些波動理論無法解決的問題。就這樣，牛頓憑藉著那個時代，他在科學界的唯我獨尊的地位，而波動說的支持者也沒什麼大人物可以與牛頓爭辯，惠更斯那時候也不在了，他甚至比胡克還早幾年就去好命了。光是由粒子組成的學說成為物理學界的主流整整至少一百年。

在牛頓那個年代，光是由粒子組成的，這個想法雖然深植人心。但是光的波動理



論並沒有因此被消滅，被證明是錯的。它仍然在等待機會，機會終於來了，首先是湯瑪斯楊的出場，這個楊基本上也是個天才，14歲時就會用拉丁文寫文章，16歲時就已經會說十四種的國外語言。楊對光學的興趣，開始於當學生時，對人體眼睛構造的研究。楊在1807年出版了他的自然哲學講義，在這本書裡面，他詳細描述了那知名的雙夾縫干涉實驗。這個實驗在科學的歷史上也是一個里程碑，確定了光的波動理論對粒子理論的反攻。在一張紙的中間挖一個小孔，在這張紙的前面點燃一根蠟燭，然後在第一張紙的後面，放上第二張紙，畫兩個平行的夾縫，蠟燭的光透過第一紙的小孔，當作光源，當光經過第二張紙的兩道夾縫，投影在螢幕上，可以在螢幕看到一系列的一明一暗的條紋，這就是所謂的干涉條紋，解釋這干涉條紋的最好理論，就是把光看成是一種波動的理論。我們知道一個波有波峰和波谷，當兩道光波波峰和波谷彼此互相重疊時，我們就說這兩道光是同向，反向的意思就是一道光的波峰和另一道光的波谷互相重疊。那些明暗交替的干涉條紋，明的條紋就是兩道光在同向的狀態，而暗的條紋就是兩道光在反向的狀態。就是這麼簡單的解釋方法，就很容易理解楊的雙夾縫干涉實驗。光的波動說的另一個重要勝利，是1818年法國科學院的一個徵文比賽。這個比賽的本來目的是，一些支持光是粒子的科學家，例如：Laplace，Poisson，希望藉由這個比賽，來打擊波動理論。結果事與願違，一個在當時還沒有什麼名氣的工程師，菲涅爾，提出了一篇論文，名稱是：關於偏振光線的相互作用。在這篇論文中，菲涅爾提出光是一種波，但是是一種橫波，也就是像水波那種，而不是自胡克以來所認為的縱波，就類似彈簧波哪一種。菲涅爾從光是橫波的觀點出發，他可以用嚴格的數學，來解釋光的繞射，也可以解決困擾波動說的偏振問題。光是一種波動的最後勝利，也是對粒子說的致命一擊，就是後來馬克斯威爾的電磁理論再，加上赫茲的實驗，證實電磁波的存在，而光就是一種電磁波。

這時候，支持光是粒子組成的這一派，可以說是徹底的失敗，毫無還手之力。但是波動說這一邊，成也赫茲，敗也赫茲。事實上，赫茲在做實驗證實電磁波的存在時，也觀察到一個現象，這個現象就是後來被稱為光電效應的現象。要解釋光電效應的現象，是無法用光是一種波動來解釋的，直到1905年愛因斯坦對光電效應做了成功的解釋，愛因斯坦的解釋方法，是把光是由粒子組成的，這一看起來早就被波動理論打



敗的學說，又拿出來用。愛因斯坦認為，光是有一些稱為光量子的粒子組成的，每一個光量子有他自己的頻率，只有光量子的頻率大於某個數值，才會產生光電效應。愛因斯坦也因為這個成功地解釋，而得到 1921 年的諾貝爾物理學獎。粒子觀點成功的解釋光電效應，而馬克斯威爾和赫茲的電磁波，也有理論和實驗的佐證。看起來，粒子和波動的觀點，沒有誰輸誰贏，就看你是在處理什麼現象，什麼問題，那你就選用什麼工具。波和粒子這種二重性的問題，給那時正在讀博士的德布羅意一個強烈的提示，也許所有的粒子，事實上都會有波的性質，德布羅意把這種波稱為物質波，而且他可以推導出，一個運動粒子的物質波的波長公式。例如：假設有一個投手，以每秒 40 公尺，投出一個 150 公克的棒球，則此棒球對應的物質波的波長為 1.1×10^{-34} 公尺。這個長度比原子核的直徑 10^{-15} 公尺還要小很多，當然無法用肉眼，甚至任何儀器觀察出來棒球的波動性。到這裡，基本上我們可以得到一個結論，就像文章開頭時，我們所說的，光是波也是粒子才是光的本質。

