

馬克士威怎麼看出 光是一種電磁波動？

邱韻如

150年前，馬克士威（James Clerk Maxwell, 1831~1879）提出了一個劃時代的推論，他說光是一種電磁波動！在此之前，科學家們對於光究竟是什麼樣的粒子還是什麼樣的波，已經紛紛擾擾爭辯了許久，但幾乎沒有人聯想到光和電磁現象有關係〔註一〕。

承先啟後

馬克士威在物理上的地位足堪與牛頓、愛因斯坦兩位巨擘齊名。他的電磁理論是十九世紀物理學中最偉大的成就，是繼牛頓力學之後物理史上又一次劃時代的偉大貢獻。

馬克士威和牛頓（Newton, 1642~1727）一樣，都是劍橋大學畢業生，且受聘回到母校任教，他和牛頓都對顏色理論有突破的見解。1666年，牛頓以三稜鏡分解太陽光，發現是由七種色光所組成，為了解釋白光理論，牛頓設計了一個色盤，上面有各種顏色，旋轉後就變成白色。同樣的，馬克士威在陀螺上塗顏色，旋轉陀螺，證明自然界裡的大多數顏色都可以用綠紅藍三原色按照不同的比例調配而成。1861年，馬克士威利用三原色光的混合法，製作出全世界第一張彩色照片。

愛因斯坦（Einstein, 1879~1955）出生於馬克士威英年早逝的那一年（1879年），他的特殊相對論正是奠基於馬克士威理論之上。愛因斯坦在提出特殊相對論的那一篇論文〈論運動物體的電動力學〉的前言一開頭就寫道：大家

知道，馬克士威電動力學運用到運動的物體上時，會引起一些不對稱……。愛因斯坦由此寫出了劃時代的相對論，他說光可以在真空中傳播，不需要也沒有「以太」這種介質，更驚人的觀點是，不論光源的速度如何，所發出的光在真空中前進的速度都是一個定值。

1931年，在紀念馬克士威100週年的文集中，愛因斯坦給予馬克士威極高的評價，他寫道：自從牛頓奠立理論物理學的基礎以來，物理學理論的最偉大變革，是由法拉第和馬克士威在電磁現象方面的工作所引起的。

繼往開來

馬克士威出生的那一年（1831年），正好是法拉第（Faraday, 1791~1867）發現電磁感應的那一年。馬克士威在劍橋大學研讀法拉第《電學實驗研究》一書後，就非常欣賞法拉第的力線概念，覺得法拉第的電磁理論有獨到的見解。法拉第是一位實驗大師，但未受過學院訓練，無法用精確的數學語言來表述他的物理思想。馬克士威的數學很強，於是著手將法拉第的力線思想「翻譯」成數學，用數學來分析表述。1860年，年僅三十的馬克士威到倫敦拜訪景仰已久的法拉第，與當時已經七十高齡的法拉第暢談力線、場、電磁現象和定律。法拉第非常讚揚馬克士威這個年輕人，鼓勵他不要只停留在「翻譯」的層次上，而要突破現有的一些觀點，創立有系統的電磁理論。

大膽指出光是一種電磁波動

馬克士威以法拉第等人的工作為基礎，提出一套有系統的電磁場理論，並預測電磁波的存在。他在這方面的工作，主要是下列三篇論文及一本書。

第一篇論文〈論法拉第力線〉發表於1855年。馬克士威以數學形式說明了法拉第的力線思想，並由此推導出庫侖定律和高斯定律。

第二篇論文〈論物理力線〉，共有四部份，分別載於1861年和1862年的《哲學雜誌》上，他進一步承襲並發展法拉第的思想，提出分子渦旋及位移電流的概念，以此模型來推算電與磁在介質中振盪的傳遞速度，馬克士威看到此速度與1855年科爾勞施（Kohlrausch, 1809~1858）和韋伯（Weber, 1804~1891）的電磁理論計算符合，又正巧等於菲佐（Fizeau, 1819~1896）在1849年實驗所測得的光速，馬克士威在此看到光和電磁波動的關係〔註二〕，做了一個大膽的推斷，他指出光是一種橫波，傳遞光波的介質和傳遞電磁現象的介質是一樣的。許多人把這個的推論簡單說成：光是電磁波！

第三篇論文〈電磁場的動力學理論〉發表於1865年。在此，他運用場論的觀點，建立了一套有系統的電磁理論，著名的「馬克士威方程組」就是在這篇文章中提出的〔註三〕。這時他已放棄分子渦旋的假設，但立論的觀點仍是假設電磁作用是由物體周圍的介質所引起的。

1873年，馬克士威出版《電磁學通論》一書，這是一本集電磁學大成的劃時代著作，全面總結了十九世紀以來電磁學研究者們的心血與成就，建立了一套完整的電磁理論體系，是一部足以和牛頓的《自然哲學的數學原理》相媲美的里程碑式的著作。

此波非彼波？

馬克士威基於法拉第效應（見註一）認為光

是橫波，這和以雙狹縫實驗提出光的波動性的楊氏（Young, 1773~1829）所謂的光波，是有許多本質上的不同。馬克士威認為電磁波動是需要介質來傳遞的，他提出假設仔細推算介質在傳遞電磁現象時的作用。在1905年愛因斯坦大膽提出根本沒有以太之前，科學家們一直根深蒂固地認為光、熱、電磁等都需要以太這種介質才能傳遞，並努力的找出以太的特性。馬克士威提出光是電磁波之後，科學家繼續探究光的性質，後續的故事還很長呢！

電磁波真的存在，且無所不在！

馬克士威逝世後8年（1887年），德國物理學家赫茲（Hertz, 1857~1894）用實驗證實了電磁波的存在，不過，赫茲實驗所產生的電磁波是無線電波，而非光波。「赫茲波」不僅讓馬克士威的理論得到實證、震驚了全世界，也改變了世界。1895年，馬可尼（Marconi, 1874~1937）利用無線電來通訊，1901年更成功的橫越大西洋傳送無線電報。

我們的生活離不開電磁波，除了太陽及各種光源發出的可見光之外，舉凡傳送各種訊息的廣播、電視、無線網路、手機都得藉助電磁波，還有紅外線、微波、紫外線、X光、 γ 射線等，也都是電磁波。在電磁波無所不在也不能不在的生活裡，回首150年前，馬克士威對光波的洞見讓我們佩服。🌀

註一：1845年，法拉第發現當光經過加了磁場的透明介質時，會產生偏振現象，稱之為法拉第效應，這個最早揭示光和電磁現象之間關係的實驗給了馬克士威重要的啟發。

註二：電磁學的書通常將光速和電磁之間的連結關係以 $C = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ 表示。

註三：馬克士威在這篇論文中所寫下的方程式共20個，而非教科書裡所寫的4個。

任教長庚大學
通識中心物理科