

光與能量

文・圖／林清富

「光」具有廣泛的應用，例如，讓網際網路變得極為方便和普遍的光纖通訊，讓電視和顯示器變成很薄的顯示技術，讓人類的夜晚不再黑暗的照明技術，讓人可以隨時拍照留念的數位相機和手機相機，風靡全球的立體電影阿凡達，以及未來可以取代石油的太陽能發電等等。而臺灣的光電技術和產業在世界上也是相當先進，並占有極重要的地位。在2009年，臺灣的光電超過2兆新台幣，占全世界光電產值的17-18%，與臺灣人口只占全世界的0.35%相比，臺灣的光電界在全球可說令人刮目相看。

然而光是什麼？我們知道生命的三大基本要素是光、空氣、和水。光，如此重要，卻是一個叫科學家探索很久都還摸不清底細的「東西」。這裡我們用引號的「東西」來稱呼光，是有特別用意的，因為光是不是一個「東西」，很難說，即使是科學家也是說不準。在很早以前，就有人探討光的本質，那時對光的探索還在「哲學」的層次，一直到了17世紀以後，對光的探討才開始有較「科學性」的研究。

光是什麼？較為「科學性」的觀點有三種，分別是光線、光粒子和光波。光線的觀點可以從陽光經由樹林中的縫隙穿透下來來理解（圖1），在還不知道光的本質之前，光線的觀點可以幫助我們瞭解和預測光的行進方向。光線的觀點讓科學家們發現了折射定律（圖2），單單光線的觀點就可以讓我們設計一些光學儀器，如顯微鏡、照相機、攝影鏡頭等，甚至於最近開始流行的立體影像，如阿凡達電影，也需要使用光線的觀點來設計。

在光線的觀點之外，最讓科學家們爭論不休的焦點為，光到底是光粒子或光波？早期的著名人物大多認為光是粒子，這些人物包括笛卡兒（René Descartes, 1596-1650）和牛頓（Sir Isaac Newton, 1643-1727）。光粒子的觀點可以用來解釋折射、反射和影子等現象，牛頓還用光粒子說來解釋彩虹的顏色，他認為白色光是分屬各種色彩的不同微粒之混合體，因為有笛卡兒和牛頓這些偉大人物認定



圖1：陽光經由樹林中的縫隙穿透下來一形成光線。



圖2：司乃耳定律（Snell's Law）：筷子在水中變成彎折。

光是粒子，因此當時的主流意見就採用了光是粒子的觀點，在其後的100多年裡一直占著主導地位。從光粒子的觀點可以推論出，光在水中的速度比在空氣或真空中快，現在我們知道這是錯的，但在牛頓的年代，還沒有技術可以測量光速，因此當時無法判斷光粒子觀點的謬誤。另一方面，光速是多少？以及如何測量光速？這些自然而然也是科學家們極感興趣的問題。

相對於粒子觀點，光波的觀點可說是發展得很慢。發現彈簧遵守著某個定律的虎克（Robert Hooke, 1635-1703）認為光是一種振動，並初步建立了波面和波線的概念。惠更斯（Christian Huygens, 1629-1695）更進一步

提出光是一種波動的主張，他解釋光是一種介質的運動，該運動從介質的一部分以某種速度依次地向其他部分傳播，然而沒有實驗證據證實這些觀點。

要確認光是波動，必須要有類似水波或聲波的波動現象，最明顯的是干涉現象和繞射現象。但是這類波動現象的發生，還有一個非常重要的特性，即波必須有同調性或相干性（Coherence）。特別是干涉現象，必須要來自不同位置的波源具有相干性，也就是說，得要有兩列相干光才可能看到光的干涉，這在當時是很困難的技術，因為自然界的光源幾乎都不具有相干性。直到1801年，英國科學家托馬斯·楊（Thomas Young, 1773-1829）才用雙狹縫進行實驗，確實看到了干涉條紋，而證明了光的波動性。（圖3）為了解決相干性的問題，托馬斯·楊在雙狹縫之前還擺了一個單狹縫，以確保進入雙狹縫的兩道光具有好的相干性。托馬斯·楊的實驗可說是驚天動地，因為光波的觀點從此橫掃物理界和科學界，把光的粒子說掃進了垃圾堆。

接著，傅科（Jean Bernard Léon Foucault, 1819-1868）和斐索（Armand Hippolyte Louis Fizeau, 1819-1896）在1850年發明了斐索傅科儀測量光速，（圖4）發現光在水中的速度比在空氣或真空中慢，

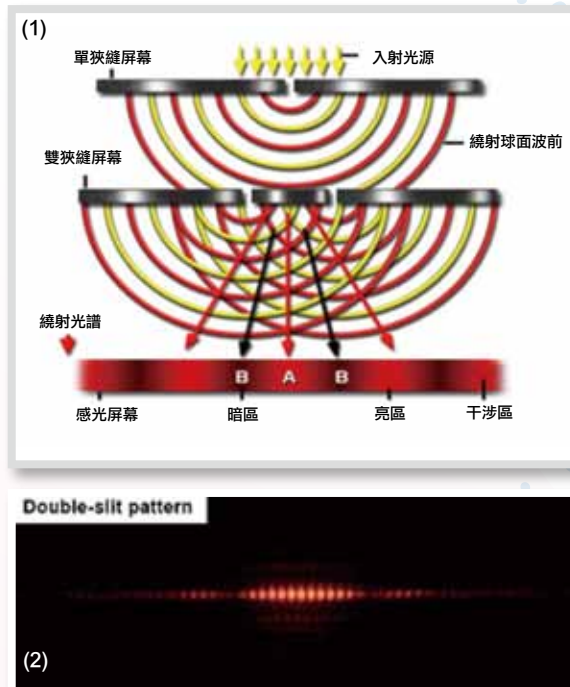


圖3：(1) 托馬斯·楊的雙狹縫干涉實驗架構圖；
(2) 光的雙狹縫干涉條紋（<http://en.wikipedia.org>）。

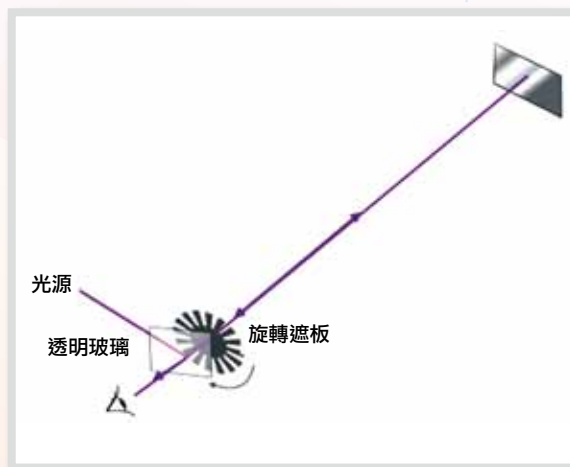


圖4：傅科和斐索在1850年發明了斐索－傅科儀測量光速（<http://en.wikipedia.org>）。

所以確定了光粒子的觀點是錯的，也因而被稱為是對牛頓的光粒子說釘入了棺材的最後一根釘子，從此光粒子說似乎就壽終正寢了。之後，馬克士威（James Clerk Maxwell, 1831-1879）由電磁學的四個定律，即馬克士威方程式（Maxwell's equations），推導出電磁波的波動方程式，進一步推論電磁波的速度就是光速，而赫（Heinrich Rudolf Hertz, 1857-1894）根據馬克士威的推論，藉由實驗產生了電磁波。因此在19世紀末，確定了光就是電磁波，其特性可由電磁波的波動方程式預測，而其傳播速度就是光速，現在我們確定光和電磁波其實就是同樣的「東西」。

光的粒子說和波動說之間的角力，好像武林高手在過招一樣，高潮迭起。就在光的波動說獲得壓倒性的勝利之後，20世紀初，卻又被一位二十幾歲的年輕人給推翻了。

推翻光波觀點的實驗是所謂的光電效應，其現象是赫茲於1887年所發現，但赫茲無法解釋這個現象。此現象的情形如下：當金屬表面被光照射時，金屬會吸收光而發射出電子。光的波長必須小於某一臨界值時，才有電子釋出，臨界值取決於金屬材料，而釋出電子的能量取決於光的波長而非光的強度，這一點無法用光的波動性解釋；此實驗的現象還有一點與光的波動性相矛盾，按照光是電磁波的理論，如果入射光較弱，那麼照射的時間要長一些，金屬中的電子才能積累足夠的能量而脫離金屬表面。然而事實是，只要光的波長小於某一臨界值時，無論光是強是弱，電子的產生幾乎都是瞬時的，不超過10的負九次方秒，比用電磁波理論所預測的時間快了好幾個數量級。

這些奇怪的現象困擾了19世紀末的物理學家們，卻被一位二十幾歲的年輕人解開了謎團。這個年輕人就是愛因斯坦（Albert Einstein, 1879-1955），他解釋光是由小的能量粒子組成的，稱為光子，並且光子可以像單個粒子那樣運動。「光子」理論開啟了新的觀點來看待微觀世界的基本特徵，亦即波動和粒子的雙重性。前面的這個現象，稱為光電效應（圖6），解釋這個現象讓愛因斯坦獲得了諾貝爾獎。而它的影響更是無遠弗屆，因為光粒子說解釋了黑體輻射，也促成了光電工程和量子理論的發展。黑體輻射的認識讓電燈泡發光獲得長足的進步，叫人類從20世紀初至今約100年間擁有安全可靠的照明，不用擔心煤油燈或蠟燭造成火災；而光電工程的進步，讓雷射和光纖被發明出來，產生了光纖通訊網路，並進一步演變出網際網路；而且光電工程還在繼續開發省電的發光二極體，讓照明不僅安



圖5：因著世足大賽一度爆紅的動物明星一章魚哥保羅。（<http://share.youthwant.com.tw/sh.php?id=65007796&do=D>）

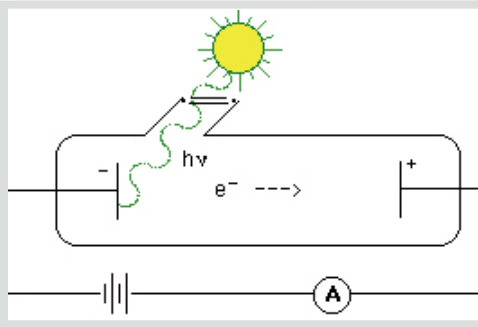


圖6：光電效應的實驗架構圖。
(http://www.fordham.edu/academics/programs_at_fordham_chemistry/courses/fall_2010/physical_chemistry_i/lectures/photoelectric_6309.asp)

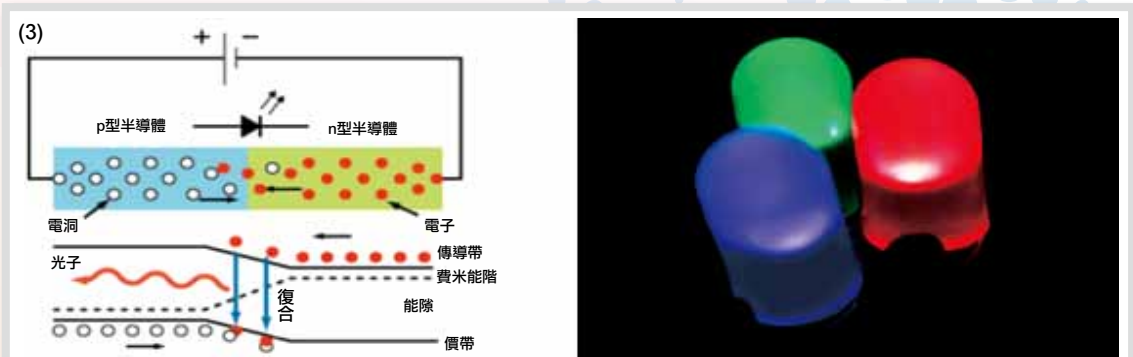
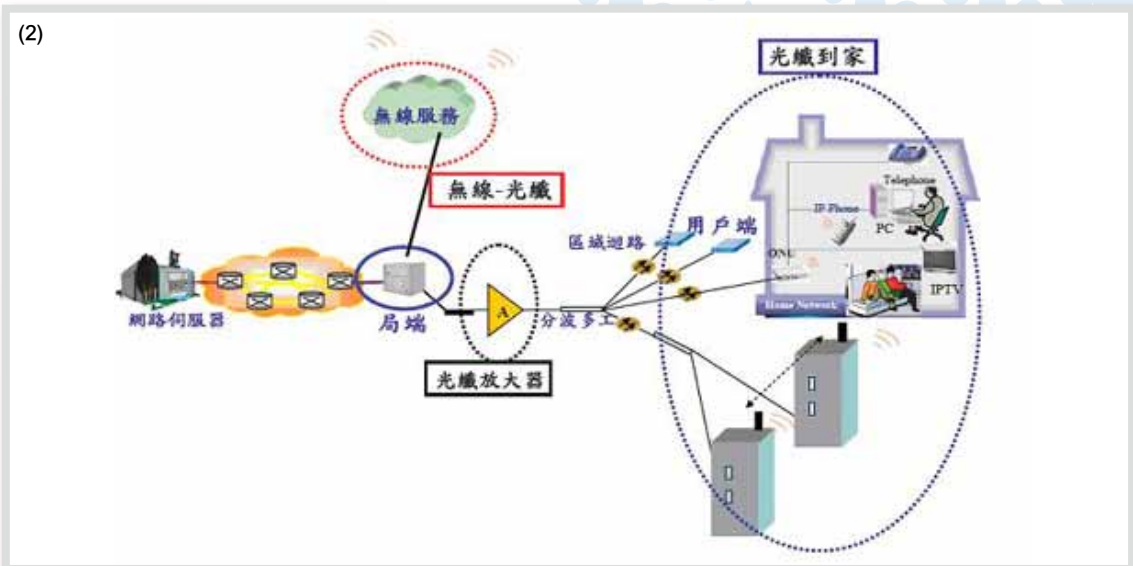


圖7：(1)煤油燈、蠟燭、電燈泡；
(2)光纖通訊網路示意圖 (http://web2.yzu.edu.tw/top_unv/epapers/No004/04.html)；
(3)發光二極體示意圖(左)和實體(右, <http://en.wikipedia.org>)。

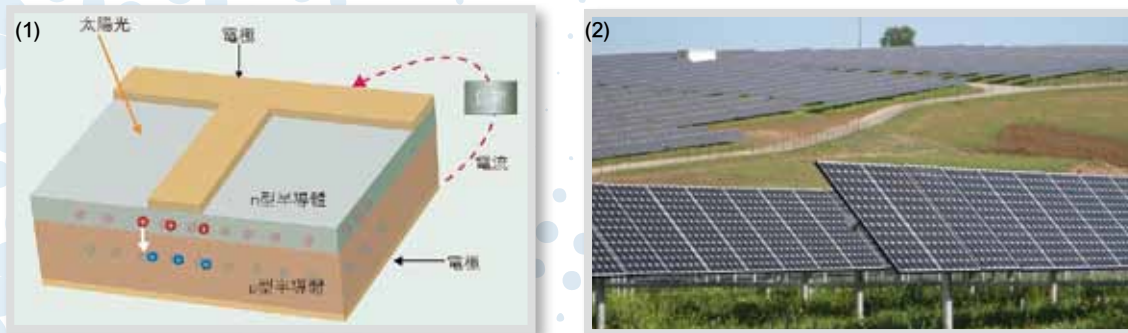


圖8：(1)太陽能光電所使用的伏打電池示意圖 (http://encyclopedia.solarbotics.net/articles/solar_cell.html)；
(2)太陽能發電廠 (<http://en.wikipedia.org/wiki/File:SolarPowerPlantSerpa.jpg>)。

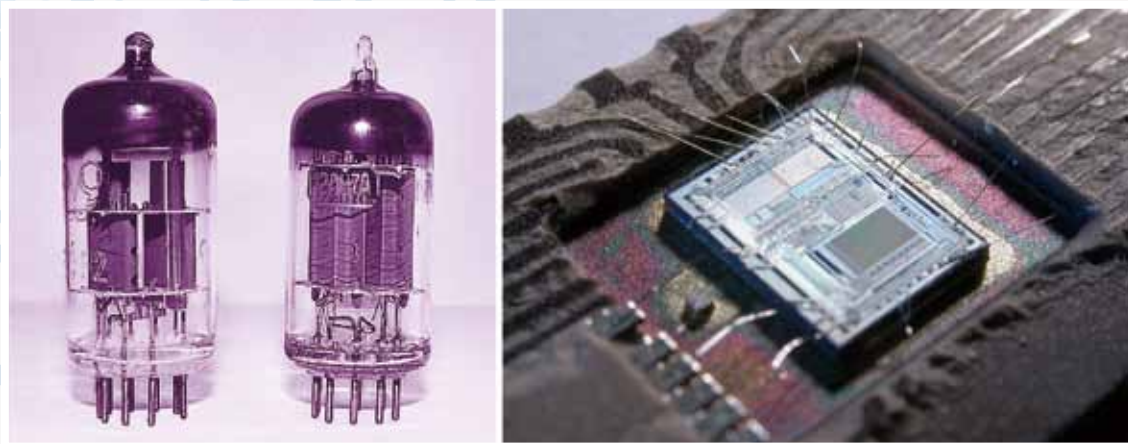


圖9：真空管（左，<http://www.milbert.com/tstxt.html>）和IC（右，<http://en.wikipedia.org>）。

全可靠，更是節省能源（圖7）；還有太陽能光電所使用的伏打電池（圖8），也是運用光電效應，簡單地講，就是照射光子以產生電子，許多人預期這是解決能源危機和氣候變遷的最好方式。此外，光電科技的進步導致了電影、電視成為日常生活的一部分（圖9），這使得許多人在漫漫長夜當中，不僅不會無聊，更有精彩影片陪伴，叫人們的生活變得豐富精彩，也促成媒體以及聞名全球之影歌星、模特兒、球星的出現，讓某些人在一夕間爆紅，家喻戶曉，如小胖林育群、周杰倫、張惠妹、林志玲、江蕙、劉德華、張學友、李小龍、王建民、郭弘志、麥可•傑克森、湯姆•克斯、妮可•基嫻、惠尼•休斯頓、布萊德•彼特、珍妮佛•安妮斯頓、貝克漢、馬拉度那、乃至章魚哥保羅（圖5）等。而光纖通訊網路及演變出的網際網路也讓Google，Youtube，i-phone，i-pad，臉書，推特等網路科技、產品及網路社群不斷推陳出新，日新月異（圖10&11）。

另一方面，「光速是多少？」這個問題使得邁克森（Albert Abraham Michelson, 1852-1931）設計了一個極精確的實驗方法，以測量光速（圖12），然後進一步發現光速不隨座標系統的相對運動而改變，這也促成了愛因斯坦假設光速是定值，進而推導出相對論以及質能互換公式。而由質能互換公式，粒子可以消失，化成光的能量型式；光也可以消失，變成電子等類的粒子。於是光可以從不是東西，變成是物質的東西，再由物質的東西變成不是東西



圖10：筆記型電腦（左, <http://www.acer.com.tw>）和手機（右, <http://www.apple.com>）改變人類生活至鉅。



圖11：(1) Google網頁；(2) Youtube網頁；(3) 臉書網頁；(4) 推特網頁

的能量。

可以說，從亙古以來，光是促成人類文明的一大要素。自從工業革命之後，人類在物理學的進步極大。另一方面，也消耗了地球上許多資源，特別是使用石化能源造成幾個嚴重的

後果，如全球暖化和極端氣候等，因此改用替代能源變成極為重要。一年前，許多專家認為要解決石化燃料造成的問題可以依靠核能，但是今（2011）年3月11日日本發生九級大地震，引發大海嘯，並進而損害福島核電廠，導致極嚴重的核污染外洩，影響區域甚至於超過方圓30公里的範圍。因為平日以嚴謹效率著稱的日本，仍然無法完全掌控核能外洩，使得核能安全的神話瞬間破滅。所以在日本核災後，世界各國深刻體會到，解決石化能源的問題不能依靠核能，於是剩下來的選項就只有再生能源了。再生能

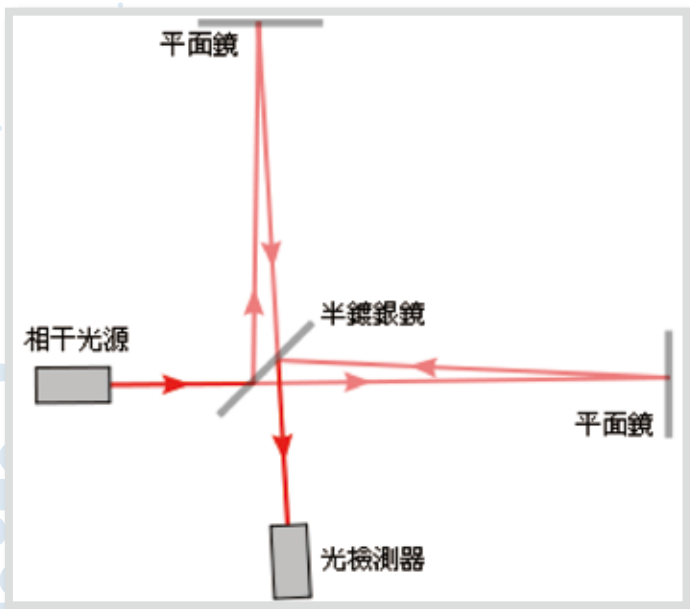


圖12：邁克森測量光速的實驗裝置（<http://en.wikipedia.org>）。

源包含有幾項，如水力、太陽能、風力、海洋能、生質能等。其中太陽能光電是目前各國發展之重心，根據2004-2009年間全球各種再生能源年平均成長率統計發現，這6年間太陽能光電年平均成長率最高，達102%。這表示在再生能源中，太陽光發電是未來各國長期能源發展競爭中的最重要發展目標。太陽光每天照射給地球的能量，以功率計為174,000 TW，而全球需求為15-16 TW，所以太陽光的供應超過人類需求的一萬倍以上。所以，就未來而言，光還是解決人類能源問題的重要方案，且可能是最重要的選項。■（本專題策劃／電機系林茂昭教授）



林清富小檔案

現任臺大電資學院光電所所長。1983年獲臺大電機學士，赴美就讀研究所，獲美國康乃爾大學電機碩士和博士。歷任臺大電機系和光電所合聘副教授，臺大電資學院光電所、電子所、電機系合聘教授。曾任國際電機電子工程師學會中華民國分會理事，中華民國光學工程學會理事，中華民國光電學會理事，以及IEEE LEOS Taipei Chapter主席；研究領域有太陽能電池、半導體發光元件、光通訊、奈米電子和奈米光電等，發表期刊論文140餘篇，會議論文300多篇，一本介紹光纖通訊元件之英文專書，以及2本中文小說。其傑出表現獲多方肯定，得過國科會傑出研究獎、甲種獎、中國電機工程學會傑出電機工程教授獎、科林論文獎、宏碁基金會龍騰論文獎等。目前為國際電機電子工程學會會士（IEEE Fellow），國際光學工程學會會士（SPIE Fellow），以及亞太材料科學院院士（Member, Asia-Pacific Academy of Materials）。