

# What's fun in EE

臺大電機系科普系列



## 是什麼照亮了我們的生命？ --- 光的故事

林清富／臺大光電所所長、臺大電機系教授

### 一、光是什麼？

「光」和「電磁波」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，在偏遠地區還可以定位的衛星通訊，讓大家可以隨時和遠方親友交談之手機，讓電腦具有和人類相近的人工智慧，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。而台灣的光電、電子、通訊等技術和產業在世界上也是相當先進，並佔有極重要的地位。單單運用光和電的交互作用所開創的光電產業，在 2009 年，台灣的產值就超過 2 兆新台幣，佔全世界光電產值的 16-18%，與台灣人口只佔全世界的 0.3% 相比，台灣的光電界在全球可說是令人刮目相看，電子和通訊等技術也不遑多讓。

然而光是什麼？我們知道生命的三大基本要素是陽光、空氣、和水。但是人類對陽光、空氣、和水的認識卻花了相當長的時間。陽光從太陽而來，應該是不說自明的道理，但太陽是什麼？這個問題一直到哥白尼之後才瞭解到，地球繞著太陽運行，而太陽是宇宙眾多星球中的一個。太陽對我們而言，最重要的意義是它會發光，一來它讓我們在白天可以看見各種事物，二來它供應地球上各種生命所需。

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，一直到了十七世紀以後，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，以下我們就來看看這些觀點所衍生出來的故事。



臺灣大學電機工程學系

10617 台北市 大安區 羅斯福路四段一號

Email: dept@cc.ee.ntu.edu.tw

http://www.ee.ntu.edu.tw/





## 二、從光線到阿凡達

光線的觀點可以從陽光經由樹林中的縫隙穿透下來理解，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，我們把折射定律也稱為司乃耳定律（Snell's Law），不過據說發現此定律的並不是威理博·司乃耳（Willebrord Snellius, 1580-1626），而是另有其人。



圖二 司乃耳定律（Snell's Law）：筷子在水中變成彎折。



圖一 陽光經由樹林中的縫隙穿透下來 --- 形成光線。

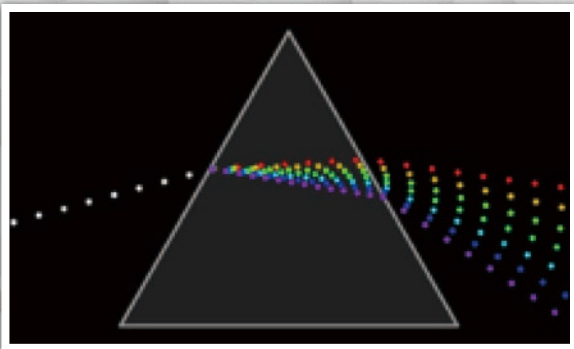
單單光線的觀點就可以讓我們設計一些光學儀器，如顯微鏡、照相機、攝影鏡頭等。甚至於最近開始流行的立體影像，如阿凡達電影，也需要使用光線的觀點來設計，因為光進入左眼和右眼的路線不同，藉由光線的線條可以推估從左眼和右眼分別看到之物體的視角差異，以及不同視角下物體的幾何圖案，於是在螢幕上呈現出左眼和右眼所看到的不同景物，並且讓左眼看到左眼視角的景象，右眼看到右眼視角的景象，然後大腦與生俱來的影像處理能力，自動地將兩眼看到的景象結合並轉化為視覺上的認知，而以為好像是看到了原來之立體實景。



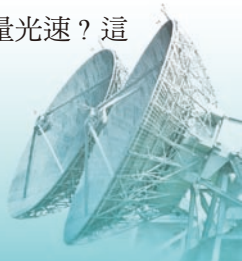
圖三 照相機的實體相片和光路示意圖。  
(<http://www.sony.com.tw>)

## 三、讓科學家們爭論不休的焦點：光粒子或光波？

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，這些人物包括有笛卡兒（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，而這些不同色彩之光微粒在經過不同介質的界面時，受到不同的作用力，因此折射後的路徑不同，舉例來說，三角稜鏡對不同色彩之光微粒的作用力不同，對紫色光微粒的作用力最大，對紅色光微粒的作用力最小，因此紫色光微粒的折射角最大，對紅色光微粒的折射角最小，於是白色光經過三角稜鏡後，就被分為紅橙黃綠藍紫等不同顏色的光。因為有笛卡兒和牛頓這些偉大人物認定光是粒子，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 多年裡一直佔著主導地位。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。



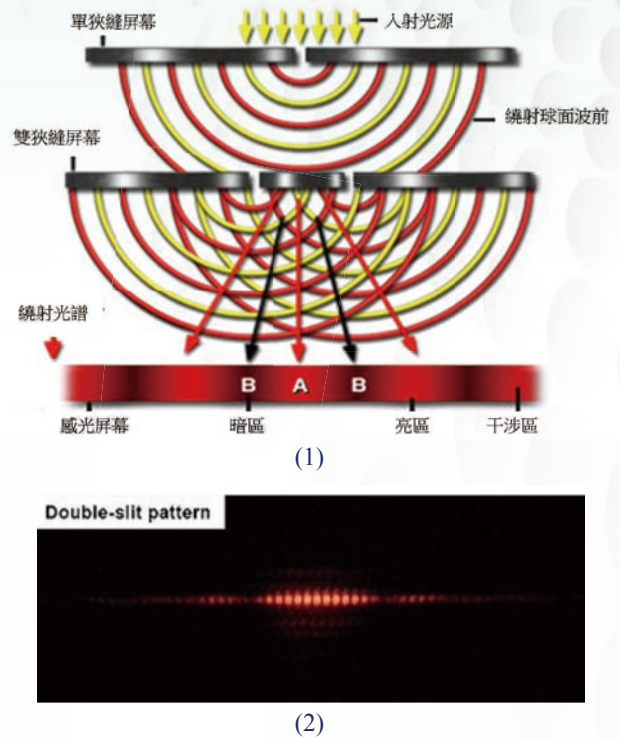
圖四 牛頓用光粒子觀點解釋彩虹的顏色（示意圖）。  
(<http://en.wikipedia.org>)





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）在 1685 年發表《顯微術》一書，他認為光是一種振動，並初步建立了波面和波線的概念。惠更斯（Christian Huygens, 1629-1695）在他的著作《論光》當中，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，還要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。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。

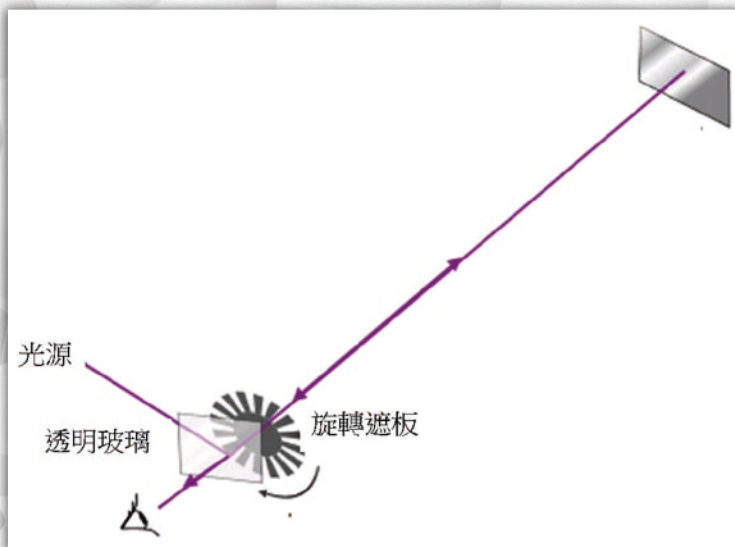


圖五 (1) 托馬斯·楊的雙狹縫干涉實驗架構圖；(2) 光的雙狹縫干涉條紋。  
(<http://en.wikipedia.org>)

另一方面，透過單狹縫的篩選，光變得非常弱，因此要紀錄干涉條紋，底片就得長時間曝光。在長時間裡，若是稍有振動，明暗相間的干涉條紋就會互相重疊而變得模糊，因此必須在長時間曝光當中，整個實驗架構都要維持在振動小於 100 nm 以內，即使是現在的技術都還很難辦到，何況是在托馬斯·楊的年代，就更不容易了！也可想見他當年進行雙狹縫干涉的實驗有多麼困難，以及需要多大的耐心和毅力。但是托馬斯·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，發現光在水中的速度比在空氣或真空中慢，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。



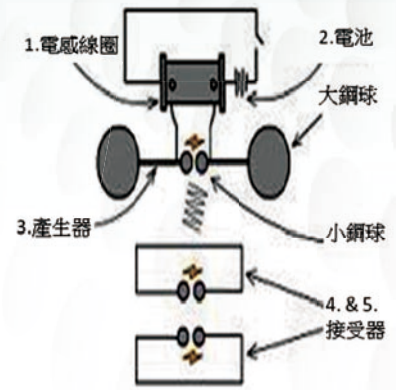
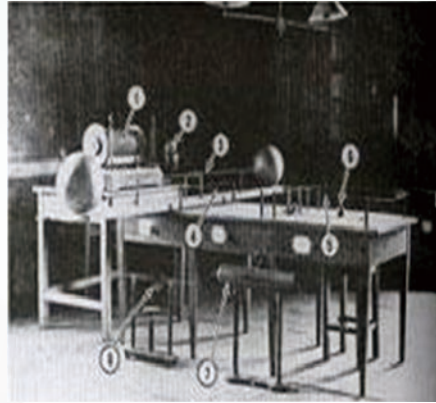
圖六 傅科和斐索在 1850 年發明了斐索 - 傅科儀測量光速。  
(<http://en.wikipedia.org>)





#### 四、波動說的勝利—光是電磁波和此觀點的巨大影響

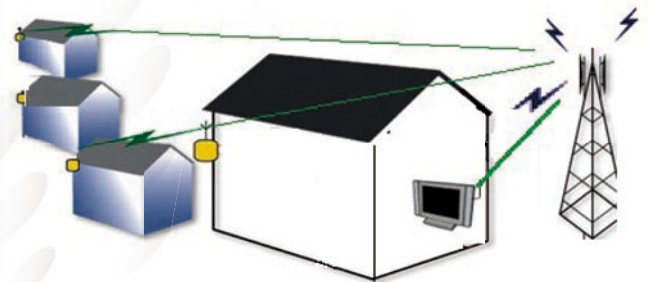
之後，馬克士威（James Clerk Maxwell, 1831-1879）由電磁學的四個定律，即馬克士威方程式（Maxwell's equations），推導出電磁波的波動方程式，進一步推論電磁波的速度就是光速，而赫茲（Heinrich Rudolf Hertz, 1857-1894）根據馬克士威的推論，藉由實驗產生了電磁波。因此在十九世紀末，確定了光就是電磁波，其特性可由電磁波的波動方程式預測，而其傳播速度就是光速，現在我們確定光和電磁波其實就是同樣的「東西」。對光的波動說有貢獻的科學家有傅科、斐索、庫侖、法拉第、安培、高斯、馬克士威、和赫茲等人，他們到現在都還是電磁領域極負盛名的偉大人物。



圖七 赫茲發明來產生電磁波的裝置

([http://www1.cpshts.hcc.edu.tw/leson/%E9%9B%BB%E5%AD%B8%E5%90%8D%E4%BA%BA/new\\_page\\_20.htm](http://www1.cpshts.hcc.edu.tw/leson/%E9%9B%BB%E5%AD%B8%E5%90%8D%E4%BA%BA/new_page_20.htm))

自赫茲發明產生電磁波的裝置以來，電磁波即被發展於通訊、廣播、遙測、資源探勘等諸多用途，其中尤以無線通信為最大宗，並成為今日最熱門、影響民生最深且廣的應用之一，包括讓大家可以隨時和遠方親友交談或傳遞簡訊的手機，以及在偏遠地區還可以定位的衛星通訊，還有讓開車更為輕鬆自在的衛星導航系統，更是目前大家習以為常的電視節目和收音機廣播等所賴以傳送的媒介，這使得許多人在漫漫長夜當中，不僅不會無聊，更有音樂和影片等精彩內容陪伴，叫人們的生活變得豐富精彩，也造成媒體事業的風行，以及聞名全球之歌星、影星、模特兒、球星的出現；如果沒有電磁波，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、郭泓志、麥可·傑克森、湯姆·克魯斯、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、章魚哥保羅等等就不可能成為家喻戶曉的「人」、「物」。



圖八 電磁波發射台和家庭收視之示意圖



圖九 章魚哥保羅的相片

(<http://share.youthwant.com.tw/sh.php?id=65007796&do=D>)

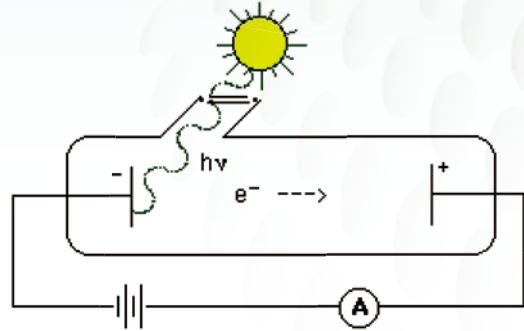




## 五、光的粒子說又起死回生—波動和粒子雙重性的新觀點

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，二十世紀初，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，不超過十的負九次方秒，比用電磁波理論所預測的時間快了好幾個數量級。



圖十 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](http://www.fordham.edu/academics/programs_at_fordham/_chemistry/courses/fall_2010/physical_chemistry_i/lectures/photoelectric_6309.asp))

這些奇怪的現象困擾了十九世紀末的物理學家們，但是卻被一位二十幾歲的年輕人解開了這個謎團。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。之後的二十世紀，陸續出現了好幾位知名的人物，如波耳、海森堡和薛丁格等人，有些和當年的愛因斯坦一樣年輕，他們把波動和粒子的雙重性應用到物質，認為所有的粒子都具有波動和粒子的雙重性，後來在電子、中子、質子等粒子也都看到了波動的特性，確認了物質也有波動和粒子的雙重性。可以說，「光是什麼？」這樣的問題帶動著整個科學界去產生新觀念，並孕育了近代物理的另一支 --- 量子力學。

## 六、光電效應的影響無遠弗屆

前面的這個現象，稱為光電效應，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，叫人類從二十世紀初至今約一百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。

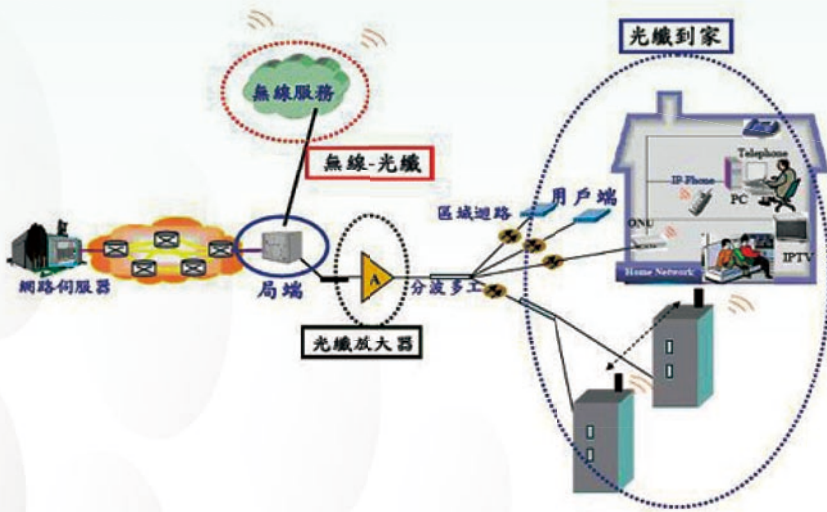


圖十一 蠟燭、煤油燈、電燈泡對照圖 (左到右)。



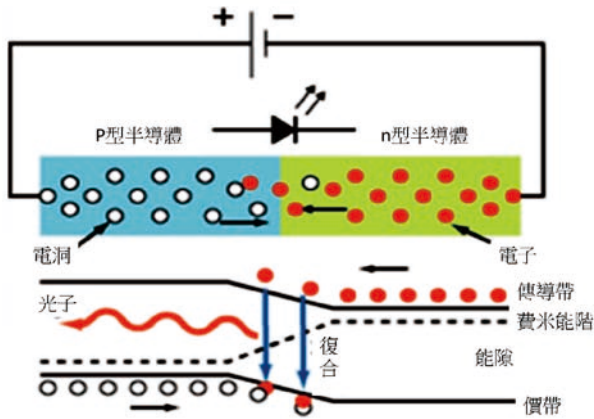


而光電工程的進步，讓雷射和光纖被發明出來，產生了光纖通訊網路，並進一步演變出網際網路；而且光電工程還在繼續開發省電的發光二極體，讓照明不僅安全可靠，更是節省能源；還有太陽能光電所使用的伏打電池，也是運用光電效應，簡單地講，就是照射光子以產生電子，因而產生電流和電力，許多人預期這是解決能源危機和氣候變遷的最好方式；此外，光電科技的進步導致了電影、電視成為日常生活的一部份，如前面提過的，讓許多人的漫漫長夜有精彩影片陪伴，也促成媒體以及聞名全球之影歌星、模特兒、球星的出現，讓某些人在一夕之間爆紅，家喻戶曉。

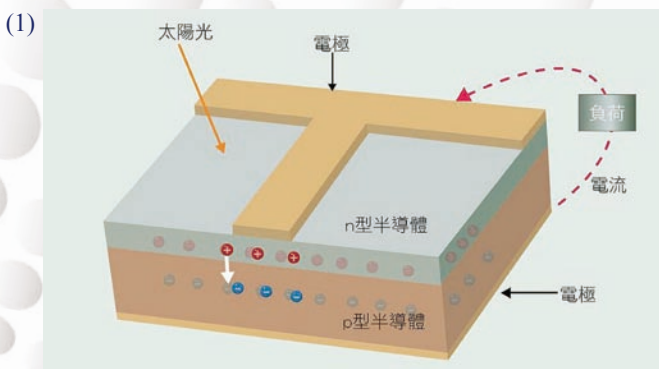


圖十二 光纖通訊網路示意圖

電池，也是運用光電效應，簡單地講，就是照射光子以產生電子，因而產生電流和電力，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份，如前面提過的，讓許多人的漫漫長夜有精彩影片陪伴，也促成媒體以及聞名全球之影歌星、模特兒、球星的出現，讓某些人在一夕之間爆紅，家喻戶曉。



圖十三 發光二極體示意圖（左）和實體相片（右）  
 (<http://en.wikipedia.org>)



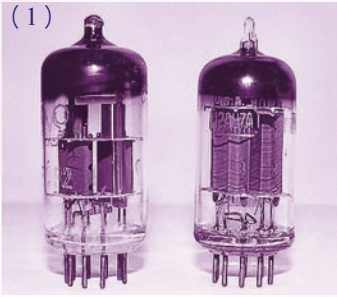
圖十四 (1) 太陽能光電所使用的伏打電池示意圖；  
 (2) 太陽能發電廠相片。



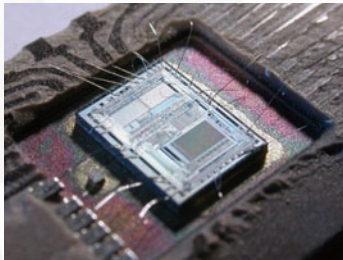


## 七、從量子理論到 IC，再進化到網路

波動和粒子的雙重性帶動了量子理論的發展，然後促成了半導體工程的進步，讓 IC 晶片取代了真空管電路，使得電子電路和電腦的體積大幅縮小，於是功能強大的筆記型電腦、手機等可以隨身攜帶，因此極為普及和方便，甚至於變成年輕人日常生活的必需品，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。



(1) (<http://www.milbert.com/tstxt.html>)



(<http://en.wikipedia.org>)



(2) (<http://www.acer.com.tw>)



(3) (<http://www.apple.com>)

圖十五 (1) 真空管和 IC 對照圖；(2) 筆記型電腦相片；(3) 手機相片。



圖十六 (1) Google 網頁；(2) Youtube 網頁；(3) 臉書網頁；(4) 推特網頁

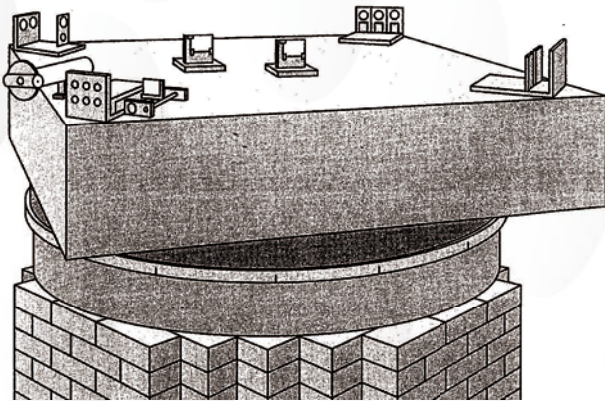




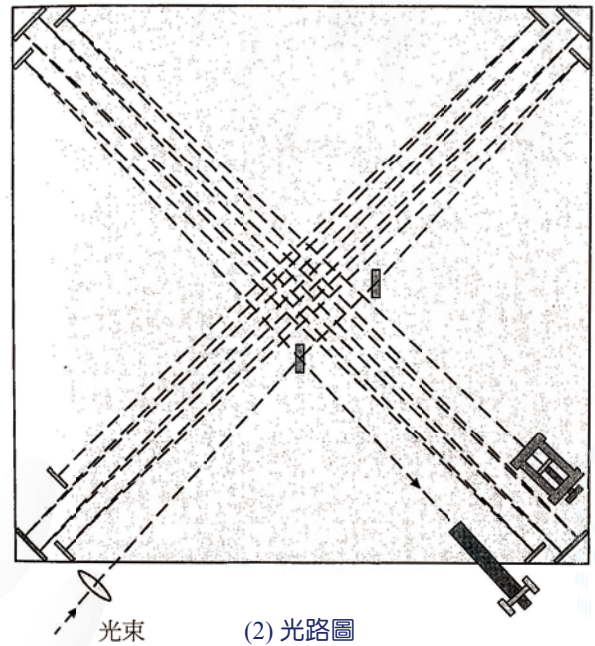
## 八、從「光速是多少？」到相對論

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，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的能量。

因此，對「光是什麼？」的探討，可說是近代物理的起源；認識大自然，從「光」開始是很好的途徑。是什麼照亮了我們的生命？就是光。光不僅照亮了人類的生命，也照亮了所有的生命，甚至於照亮了整個宇宙，沒有光，可能就沒有宇宙以及存在宇宙內的各種「東西」。



(1) 實際的實驗架構



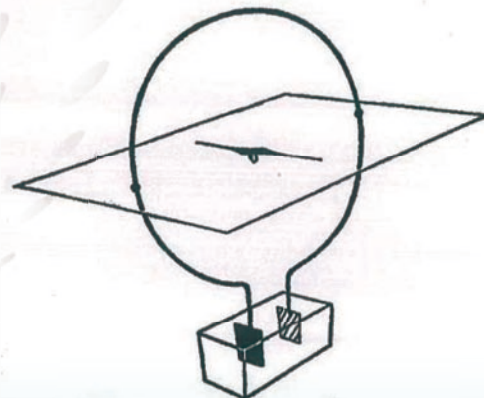
(2) 光路圖

圖十七 邁克森測量光速的實驗裝置。

(Modern Physics: from  $\alpha$  to  $Z_0$ , by James W. Rohlf, John Wiley \* Sons, Inc.)

## 九、從哲學進化到物理，再進化到電的世界

從人類文明的發展歷史來看，兩千多年以前，還沒有明確的科學，許多探索停留在哲學的層次，一直到十四、十五世紀文藝復興以後，才逐漸發展出科學性的學問，之後自然科學的領域逐漸分殊為生物、化學、物理、…等等。而物理又繼續發展，之後演變出清楚的力學觀點，代表人物是伽利略（Galileo Galilei, 1564 – 1642）和牛頓。為了解釋物體下墜的運動，牛頓提出超距力的概念。後來庫侖（Charles Augustine Coulomb, 1736-1806）也引用此概念，提出了庫侖定律，即帶電體的受力（引力和斥力）和萬有引力類似，與距離平方成反比。但是厄司特（Hans Christian Oersted, 1777-1851）、羅嵐（Henry Augustus Rowland, 1848-1901）和法拉第（Michael Faraday, 1791-1867）等人的實驗卻發現，力量不必然和距離平方成反比。這造成了十九世紀後半的物理學加入了新觀念，就是場的觀念，是由法拉第、馬克士威以及赫茲等人的研究成果所建構起來的。



圖十八 厄司特（Hans Christian Oersted, 1777-1851）的實驗裝置。  
(摘自「物理的演化」，愛因斯坦著)







之後，物理就分為兩派，力學觀點和場的觀點。力學派的代表性觀點就是牛頓三大運動定律和伽利略轉換式；場的觀點則建立在兩大支柱：(1) 由電荷運動而產生的電場變化必然會伴隨著另一個磁場；(2) 一個磁場的變化會伴隨著另一個電場；於是電生磁，磁生電，形成了電磁波。比較力學觀點和場的觀點，可以看出兩者之間有本質上的差異，力學觀點之力是由物質而來，而力也是作用在物質上面；在場的觀點裡，物質不是主要的角色，特別是在電生磁、磁生電的兩個定律中，沒有物質的角色。到底誰的觀點較好或較正確？我們之後會接著討論。

力學觀衍生出工業革命，造成了土木、建築、造船、火車、汽車等方面的成就，如著名的鐵達尼號，巴黎的艾菲爾鐵塔（法語：La Tour Eiffel；英語：Eiffel Tower）等等。而電生磁、磁生電的場觀則讓人類文明跨入了電的時代。在電的時代中，日常生活和電息息相關，因為電磁的作用衍生了現在普及的電相關科技，如發電機、發電廠、馬達、電車、收音機、電視機、IC、電腦、手機、衛星通訊、光纖通訊等等，這些訊號或動力全都是藉由電磁場，不需要發射帶電粒子，因此，場是真實的存在。愛因斯坦稱之為革命性的新觀念，這使得物理逐漸遠離力學觀，進入了電磁的世界，也就是電機領域目前在探索以及研發新應用的領域。到目前為止，已經很少日常生活和電無關。

(1)



(2)



圖十九 (1) 鐵達尼號相片；(2) 巴黎的艾菲爾鐵塔相片。

(1)



(2)



圖二十 (1) 發電機相片；(2) 火力發電廠相片。  
([http://en.wikipedia.org/wiki/Fossil\\_fuel\\_power\\_plant](http://en.wikipedia.org/wiki/Fossil_fuel_power_plant))



圖二十一 液晶電視機相片：左圖為液晶電視機之正面，右圖為液晶電視機之側面。



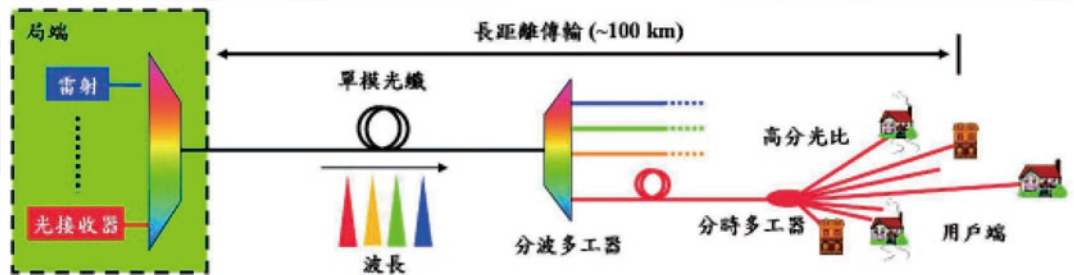


(1)



( <http://hanyu.iciba.com/wiki/430921.shtml> )

(2)



( <http://psroc.phys.ntu.edu.tw/bimonth> )

圖二十二 (1) 衛星通訊示意圖；(2) 光纖通訊示意圖。

## 十、未來之光

現在我們確定了光就是電磁波，都是電生磁、磁生電的現象，全都遵守同一個波動方程式，且傳播速度都是光速。但科學家們仍然繼續探究，這代表了什麼意義？

愛因斯坦發現了電磁場或光波的觀點和過去的力學觀點有了本質上的矛盾，因為對光波或電磁場而言，以下的兩個論述無法同時成立：

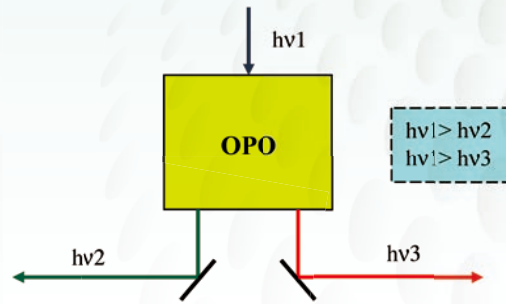
- (1) 位置與速度會依照古典的轉換律（伽利略轉換式），從一個慣性系統轉換到另一個慣性系統。
- (2) 在兩個做等速相對運動的座標系裡，大自然的所有定律是相同的，亦即數學型式是一樣的，因此我們無法分辨出誰在運動，誰不在運動，也就是說，只有相對運動，沒有一個絕對靜止的系統。

這個本質上的矛盾是，把伽利略轉換式套用在光波和電磁波的波動方程式上，發現其數學型式不再相同。後來，愛因斯坦捨棄了古典物理之轉換律，採用第二個論述，並加上這個假設：「光在真空中的速度是固定的，與光源及接收者的運動無關。」然後導出了相對論，被稱為是科學上的大革命。至此，我們看到了古典物理的力學觀被電生磁、磁生電的場觀所取代了，因為電磁場的觀點更真實地反映了宇宙和大自然的特性。而人類的新科技從此以後更是緊密地貼近「電磁電機」領域以及「光電」領域。另一方面，如前面所說，愛因斯坦還提出了「光子」理論。使用波動和粒子的雙重性來解釋光的行為，大自然的更多秘密也因此被揭露了。





但是，即使到現在，「光」、「光子」和「電磁波」仍然具有許多尚待科學家探索的問題，依然是基礎科學的重要根源，例如，透過非線性光學，一個高能量的光子（或是一道高頻電磁波）分解為兩個較低能量的光子（或是兩道較低頻電磁波），一個往東，一個往西，在走了二十光年的距離之後，這兩個光子是否還具有相干性？我們測出往東之光子的特性後，能否立刻知道往西之光子的特性？如果知道，那代表著宇宙具有什麼特徵，竟然可以讓遙遠的兩個光子保持著相互關聯的相干性？還有，在地球上看來都是往東的兩個光子，它們彼此的相對速度是否維持在光速？如果是，那它們彼此看對方會是往那個方向行進？那個往東？那個往西？

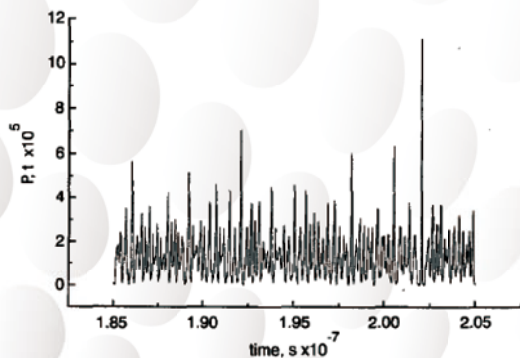


圖二十三 透過非線性光學，一個高能量的光子分解為兩個較低能量的光子，一個往東，一個往西。(示意圖)

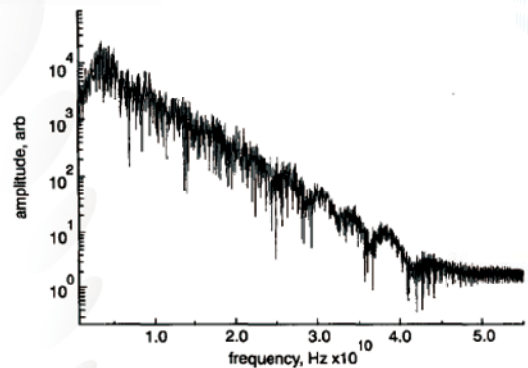
而另一個方興未艾的科學議題 --- 混沌現象，光也扮演著角色。當半導體雷射中的光和電子產生交互作用時，在某些情況下會發生混沌現象，為什麼？有多少類的混沌現象？混沌是一讓科學家著迷的現象，早期科學家認為混沌就是雜訊，但後來發現混沌和雜訊不同，因為雜訊好像是亂成一團，但混沌卻是亂中有序，序中有亂。大者如宇宙形成之初，有人猜測是經過了混沌的過程，甚至於現在的星團和銀河系也是混沌現象的一類；中型如颱風、地震或股票，小型如半導體雷射中的光電反應，都有混沌現象的特質；瞭解小型雷射中的混沌或許可以幫助人們認識大的混沌現象，如颱風、地震、股票、或宇宙星系之形成。因此，還有許多問題等待科學家和年輕人們去探索，甚至於挖掘新的問題，不一而足，但光卻往往仍然和這些新問題息息相關。

「光」、「電磁波」，不僅在日常生活中有廣泛的運用，而且還隱藏著宇宙本質的秘密，從亙古到現在，叫人們（包括科學家）無法完全摸清它的底細。

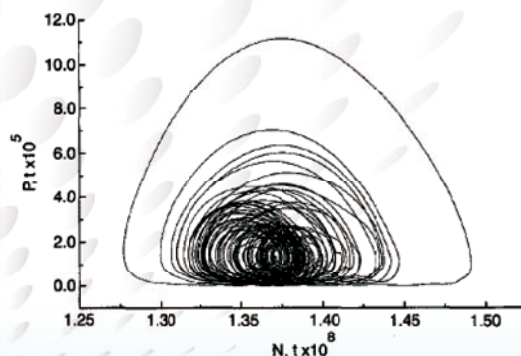
「光」和「電磁波」，無論如何，都叫人著迷！



(1) 半導體雷射發生混沌現象時對應之波形圖



(2) 半導體雷射發生混沌現象時對應之頻譜



(3) 半導體雷射發生混沌現象時光子數目與電子數目之對應關係

圖二十四 半導體雷射中的光和電子交互作用後發生的混沌現象圖。  
( IEE Proc.-Optoelechon., Vol. 147, No. 1, February 2000 )

