

近代物理的先驅一

馬克士威

自從馬克士威以後，物理現實一直被認為是一連續場、不能用任何機械來解釋的。這種現實概念的改變是物理學從牛頓時代以來所經歷的最深刻和最有成就的改變。

- 愛因斯坦 (Albert Einstein)



賴昭正 / 前清大化學系教授、系主任、所長；合創科學月刊。



圖一：馬克士威。
(Wikipedia)

在《科學月刊》539期〈規範對稱與基本粒子〉一文裡，筆者已介紹規範對稱及基本粒子的發展史，因此在撰寫《泛科學》〈基本粒子的標準模型〉一文時，本想只做個敘述性的總結，但卻情不自禁地一直想到馬克士威 (James Maxwell) 這一位對近代科學發展擁有重大影響的物理巨擘。眾所周知，近代物理學的兩大發展是相對論及量子力學。相對論鼻祖愛因斯坦曾毫不諱言地說：「特殊相對論源自於馬克士威的電磁場方程式。」

敲響量子力學之鐘的普朗克 (Max Planck) 則表示：「他 (馬克士威) 的偉大無人能比！」事實上，《物理世界》(Physics World) 在 20 世紀結束前，對 100 位當時被認為最傑出的物理學家的問卷調查中，馬克士威被評選為有史以來第三大物理學家，僅次於愛因斯坦和牛頓。可是除了物理和化學領域的科學家外，又有多少人知道他呢？更遑論家喻戶曉了！因此決定寫一篇專文介紹他。

風光的職業生涯

馬克士威於 1831 年出生於蘇格蘭愛丁堡的富裕家庭，父親是一位律師，母親在他 8 歲時就過世了。他從小便喜好幾何及具好奇的個性〔註一〕，因此由父親及孀母家教到 10 歲才進入一名校小學，在 13 歲獲得數學、英

文、及詩詞獎前，成績平平不起眼；14 歲時就發表了一篇以機械法用麻線畫數學曲線的數學論文，及闡釋橢圓、笛卡爾橢圓和具有 2 個以上焦點的相關曲線之性質的科學論文。同年，他也可以背誦聖經，後來成為福音派新教徒；像牛頓一樣，他認為宗教是私人事務，也認為科學與宗教之間沒有衝突。17 歲時進入愛丁堡大學 (University of Edinburgh)，在那裡他開始接觸到化學、電、磁等儀器，對偏振光 (polarization) 特別感興趣。18 歲時就在愛丁堡皇家學會會刊上發表 2 篇論文。1850 年進入英國劍橋大學，4 年後以第 2 名成績 (Second Wrangler) 取得數學學士學位。1855 年就被選上劍橋大學三一學院 (Trinity College) 的院士；隔年 25 歲時就被授予愛丁堡最



圖二：倫敦國王學院紀念馬克士威方程式的牌匾。(Wikipedia)

高數學獎，成為蘇格蘭馬歇爾學院（Marischal College）的教授兼系主任；除了授課外，還免費到附近各社區學院演講。

1860年當馬歇爾學院與其它學院合併成亞伯丁大學（University of Aberdeen）時，馬克士威因教職「過剩」而被迫離職，最後進入倫敦國王學院（King's College）。馬克士威在倫敦一直待到1865年，完成許多最著名的工作。後續回到蘇格蘭的家中6年，致力於實驗、計算和寫作。他在1866年寫道：「我現在有許多時間做我任公職時無法做的事情：實驗和胡思亂想物理。」《電磁通論》（*A Treatise on Electricity and Magnetism*）一書大部分的內容就是在這期間完成的。1871年回到劍橋大學擔任第一任的卡文迪西實驗室

（Cavendish Laboratory）物理教授，負責興建實驗室，為近代科學史上的第一個「專業」科學實驗室，為後來電子、中子及DNA等的發現地，培養出數十位諾貝爾獎得主。1879年因為腸癌在48歲英年早逝。

一統電磁的馬克士威方程式

馬克士威在國王學院裡結識在皇家學院工作的年邁法拉第（Michael Faraday），開始其創世紀的電磁場研究。1861~1862年間所發表的4篇論文可說是將法拉第的力線（lines of force）實體化。法拉第從來沒有受過正式科學教育訓練，因此使用力線幫助想像，馬克士威則用抽象數學表示這些力線，謂時空的每一點都有一個構成「場（field）」的向量數值：「場」已經是了解基本粒子及相對論所必要的工具。

除了上述數學化法拉第的力線外，馬克士威也將當時已知的4個電磁實驗結果：

- （一）描述電荷與其靜電場之間關係的高斯定律（Gauss' law）。
- （二）磁極（荷）不可能單獨存在的高斯磁定律（Gauss' magnetism law）。
- （三）描述時變磁場如何產生（誘導）電場的法拉第定律（Faraday's law）。
- （四）描述電流如何產生（誘導）磁場的安培定律（Ampère's law）。

簡潔地以20個數學方程式表示。從那些簡潔的方程式中，他看出原來的安培定律只適用於穩定的電流情況，因此人為地加進稱為位移電流（displacement current）的項目！位移電流不但解決時變電場如何產生（誘導）磁場的問題（安培—馬克士威定律），也讓馬克士威看出電磁本是一家人的對稱關係，使他成為第一位統合自然界2種不同作用力的科學家。也就是這一項令他在1865年導出電磁波的存在，並證明光事實上就是一種電磁波！但也正是由這一理論所推導出來的結果與實驗不合，因而推動近代量子物理的發展〔註二〕。

這套簡潔的20個數學方程式首次在1873年出版的《電磁通論》一書中出現。如果使用向量，能夠更簡潔地只用4個方程式表示——即著名的馬克士威

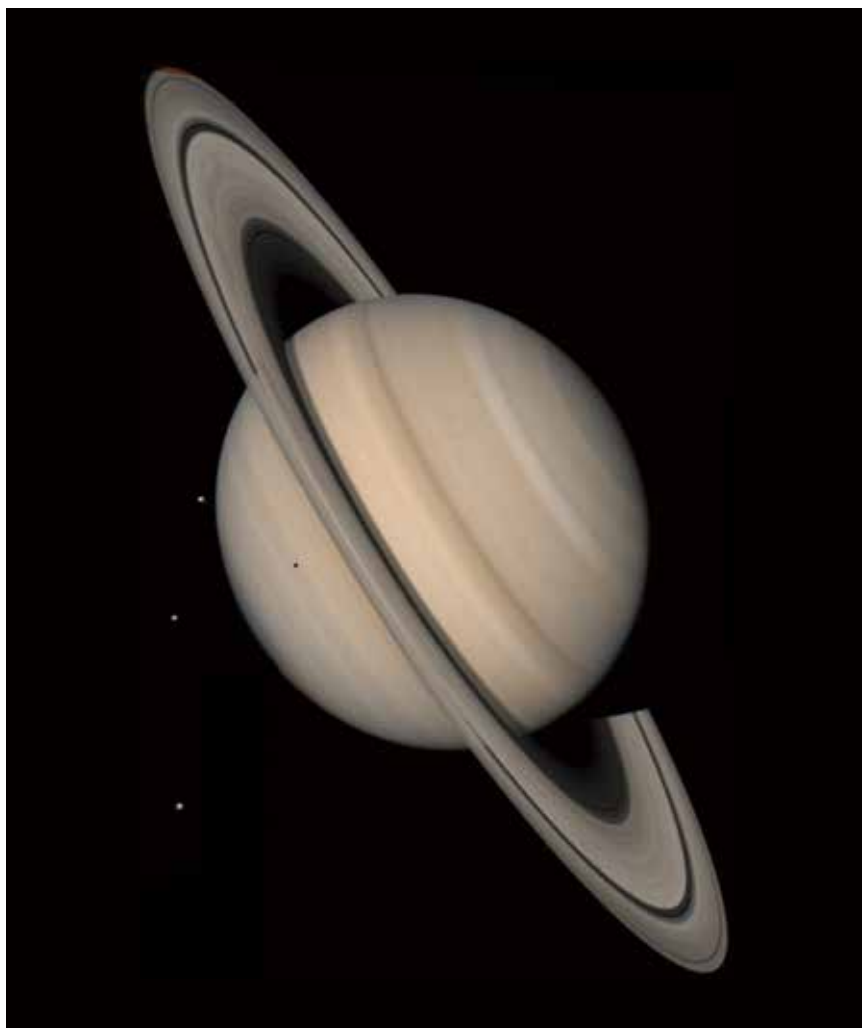
方程式 (Maxwell's Equation)。在沒有電荷和電流的真空中，馬克士威電磁方程式簡化如下 (不懂其意也無妨，筆者只想顯示其簡潔及內在美)：

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{E} &= 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{B} &= \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}\end{aligned}$$

式中的 \mathbf{E} 為電場， \mathbf{B} 為磁場。最後一項 ($\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$) 即位移電流！讀者也許不懂這些符號所代表的意義，但應該不難看出如果缺少了它，這組方程式便不夠對稱、不夠美吧？有了它不但又美又對稱，更暗示了電與磁可能只是一體的兩面。事實上正因為相信自然界應該存在此一對稱，而使得馬克士威人為地加入該項——馬克士威可以說是第一位用「對稱」來決定物理方程式形式的科學家，奠定了以後「對稱」在基本粒子發展的方向！

其它的主要科學貢獻

在馬歇爾學院任教時，馬克士威將注意力集中在一個 200 年來一直困擾科學家的問題：土星環的本質。科學家難以了解為何這些土星環能保持穩定而不會分散、漂流或撞上土星。因為劍橋聖約翰學院 (St John's College) 選擇它作為 1857 年亞當斯獎 (Adams Prize) 的主題，故這個問題在當時引起許多科學家的注意。馬克士威花了 2 年的時間研究這個問題，證明一個普通的固體環並不穩



圖三：航海家二號於 1981 年 8 月 4 日攝得的土星照片。(Wikipedia)

定，而一個流體環則將被波浪作用強制分解成小塊；因為從沒有觀察到上述這 2 個現象，馬克士威認為環必須由許多小顆粒組成：每一顆粒都獨立地繞土星旋轉。英國皇家天文學者艾里 (George Biddell Airy) 爵士讚歎說：「這是我見過的數學應用在物理學最成功的例子之一。」馬克士威這篇「關於土星環的運動穩定性」於 1859 年獲得 130 英鎊的亞當斯獎。

1980 年，航海家二號 (Voyager 2) 發回的圖像證實他在 120 年前的預測！誰說數學沒實用？

馬克士威雖然不是近代氣體動力學 (kinetic theory of gases) [註三] 的創始者，但他是第一位應用概率和統計方法描述氣體分子整體性質的科學家：1859 年，馬克士威證明氣體中分子的速率不是相等的定

值，而是必須遵循馬克士威—玻茲曼分佈定律 (Maxwell-Boltzmann distribution) 的統計分佈。在後來的論文中，他又闡釋氣體的輸運性質：溫度和壓力的變化對粘度、熱導率、和擴散的影響。與熱力學中之馬克士威相等式 (Maxwell relations，不同偏導函數之間的關係) 一樣，這些都已經是大學物理及化學教科書裡的標準題材！

馬克士威在 1867 年寫了一封信給他大學好友泰特 (Peter G. Tait)，表示熱力學第二定律有一個「漏洞 (hole)」。

馬克士威想像一個容器分為彼此相鄰之 A 和 B 兩部分，在相同溫度下填充相同的氣體，然後在中間的分隔牆壁開一個小門。一個想像中的魔鬼守衛著這一道小門，觀察兩側的分子。當一個速率快於平均值的 A 格分子飛向小門時，魔鬼就打開它，讓該分子將從 A 飛到 B；同樣，當一個比平均值更慢的 B 格分子飛向小門時，魔鬼就讓它從 B 傳遞到 A。由於平均分子速率決定氣體的溫度，因此如果這樣繼續做下去，顯然不需要做任何功，只要使用了一個觀察力超群和手指靈活的智慧魔鬼，就可以使 B 格溫度越來越高，A 格溫度越來越低——這顯然違反「在不影響第三者的情況下，熱不能主動地由低溫傳到高溫」的熱力學第二定律 (參見《科學月刊》147 期《熱力學與能源利用》)！馬克士威在信末寫道：「但我們不夠聰明，因此不可能。」馬克

士威雖然認為他的魔鬼主要目的是說明「熱力學第二定律只有統計的正確性」，但這一個現在被稱為馬克士威魔鬼 (Maxwell demon) 的魔鬼卻陰魂不散地纏住後來的物理學家，時至今日還時常可看到許多想驅除此魔鬼的論文，提出各種理論闡釋馬克士威魔鬼不可能破壞熱力學第二定律 [註四]。

另外，在愛丁堡大學當學生時，馬克士威就證明紅、綠、藍 3 色可組成白光。他對色彩理論的研究使他得出結論：通過三原色濾鏡拍攝，然後將它們重新組合成圖像，可以產生彩色照片。他在 1861 年向英國皇家學會的演講中展示這項假設：通過過濾器投射用這種方法拍攝的格子呢絲帶的彩色照片。馬克士威的色彩理論正是現代彩色照相與彩色電視的基本原理。

結論

從以上介紹裡，不但可以看出馬克士威對近代物理的不凡貢獻與影響，他的發現也深深影響現代文明社會的發展，從手機、彩色電視、到太空探險，我們實在很難想像沒有馬克士威 140 多年前的數學洞見及預測電磁波，今日的世界會是什麼樣子？除了在科學的貢獻，馬克士威的個人生活也以勤奮、友善、和慷慨聞名。

牛頓曾說：「如果我比其他人看得更遠，那是因為站在巨人的肩膀上。」當評選為有史以來最傑出物理學家的

愛因斯坦被問到他是否站在牛頓之肩膀上時，他回答說：「不，我是站在馬克士威的肩膀上！」

[註一] 負責家教的孀母凱 (Jane Cay) 曾言：「被一個孩子問到許多無法回答的問題實在很令人感到羞辱。」

[註二] 1887 年，年輕聰明的德國物理學家赫茲 (Heinrich Hertz) 首次在實驗室中偵測到馬克士威方程式中的無線電信號；《量子的故事》一書就是以赫茲此一實驗與發現展開。

[註三] 1738 年伯努利 (Daniel Bernoulli) 發表流體動力學 (Hydrodynamica)，奠定氣體動力學的理论基礎：氣體由許多粒子在各方向移動組成，它們與容器表面的碰撞導致我們感受到的氣體壓力，而平時感受到的熱則只是它們運動的動能。

[註四] 馬克士威魔鬼需要知道分子運動的資訊 (information)，因此解救熱力學第二定律的一個方法是資訊理論 (information theory)：認為資訊也是一種熱力學變數「熵」(entropy，見《我愛科學》第 223 頁)。

延伸閱讀

1. 賴昭正·《我愛科學》·華騰文化·2017。(該書收集筆者自 1970 年元月至 2017 年 8 月在科學月刊及少數其它雜誌所發表之文章編輯而成。本文章所涉及之〈規範對稱與基本粒子〉、〈熱力學與能源利用〉、〈熵與基礎熱力學〉均收錄於本書)。
2. 賴昭正·《量子的故事》·凡異出版社·第二版·2005 年。
3. 泛科學·〈基本粒子的標準模型〉·<https://reurl.cc/E4eyR>·2018 年 10 月。