

萬 有 文 庫

第 二 集 七 百 種

王 雲 五 主 編

馬 克 士 威

湯 姆 孫 等 著

周 夢 塵 譯

商 務 印 書 館 發 行



馬 克 士 威

湯姆孫等著

周夢慶譯

自然科學小學叢書

編主五雲王

庫文有萬

種百七集二第

威士克馬

James Clark Maxwell

究必印翻有所權版

中華民國二十四年九月初版

原著者

J. J. Thomson and Others

譯述者

周夢麀

發行人

王雲五  
上海河南路

印刷所

商務印書館  
上海河南路

發行所

商務印書館  
上海及各埠

\*C五五六

朱



詹姆士·克斐克·馬克士威

# 目次

詹姆士克婁克馬克士威 (J. J. 湯姆孫) .....	一
馬克士威對於德國理論物理學的影響 (蒲郎克) .....	四四
馬克士威與物理的實在概念之發展 (愛因斯坦) .....	六四
馬克士威的科學環境 (拉默爾) .....	七二
馬克士威的方法 (詹斯) .....	八九
馬克士威的實驗室 (加奈特) .....	一〇七
對於馬克士威教授的一些回憶 (夫麗明) .....	一一五
馬克士威與無線電報 (洛治) .....	一二四
卡文迪虛實驗室的初年 (格奈慈不魯克) .....	一三〇
作為講師的古婁克馬克士威 (蘭布) .....	一四二

# 馬克士威

詹姆士克婁克馬克士威 (J. J. 湯姆孫)

我們開會來紀念的是一個人的百歲誕辰，他的功業在物理科學的進步以及它的許多概念上是有過深刻的影響；而且又盡過力，裝配了以太使能爲人服役，因而推進了文明并且增加了人類之安樂的。

馬克士威 (Maxwell) 誕生於中羅狄安州 (Midlothian) 潘尼索克 (Penycuik) 之克婁克族 (Clerks) 中；那一族有兩百年之久在蘇格蘭社會生活中是曾經負過盛名的；他家裏每一代都有些人以才能和功業彪炳於世；越爾·克婁克 (Will Clerk) 就是這些人中的一個，他是司各脫 (Sir Walter Scott) 的密友，『紅手套』 (Redgauntlet) 中的戴細·納剔沫爾 (Darsie Latimer)

就是他的化身。他們這一族又是以個性堅強著於世的，馬克士威本人亦復如此。

約翰·克婁克·馬克士威 (John Clerk Maxwell) 是馬克士威的父親；「馬克士威」這名字就是他在承受當非利斯州 (Dumfriesshire) 密得爾鄒 (Middlebie) 薄產的時候纔加到「克婁克」那個名字上去的。照肯拜耳 (Lewis Campbell) 說，他的主要特性是持久地切於實際地關心於一切有用的手法 (Processes)。他也和他同階級的好多人一樣，常到蘇格蘭酒排間 (Scottish Bar) 去，但似乎並沒有做多少事情。他的興趣倒是在機械的設計方面，而他最高的希望是能參與愛丁堡皇家學會 (Royal Society) 的集會。他有他自己的辦法去做大多數的事，即使在爲他本人和他兒子的衣服之設計上也是如此；那孩子在去學的時候還因此受過不幸的遭遇咧。馬克士威的母親，佛蘭司凱 (Frances Cay)，則是一個著名的腦生不銳 (Northumbrian) 家庭的一員。

馬克士威是一八三一年六月十三日生在愛丁堡的，但他的搖籃生活和早期的童年生活倒是在格倫奈耳 (Glenlair)，他父親在婚後不久就建築的那所房子裏過去的。這孩子對於鄉村生

活中的種種遭遇很感快樂，他那種種稚稚氣的發問就似乎特別多點。他的姑母布納克寶音夫人 (Blackburne) 就說過，他在整個的幼年時代中，他常有的疑問是「那是什麼事情？」「做什麼的？」而假使答覆得不能使他滿意，他就又要追問「究竟那「特殊的事情」是什麼呢？」了。除開好發問之外，他也很喜歡做點東西，比如籃子和刻滿了許多奇怪花紋的印章玩。

在他九歲的一年中，他母親去世了，得的病以及死時的年紀都是和四十年後他本人所遭遇的一樣。母親死後，他最大的快樂好像就是跟他父親走，以及在他操持家業的時候「幫」他點忙了。父子間的關係異常親密。當他在學校裏的時候，他寫給父親的信和給其他學友的信一樣是充滿了譏刺和乾諷的；而這二者呢，正是他生平的特色哩。

他十歲的時候進了愛丁堡中學 (Edinburgh Academy)，但起初一無成績。這有許多原因：他是在學期中途插人的，他很少和別的孩子混在一起玩，天生地怕羞又不活潑；他總不好好地預備學校的功課，而又有一副很強的加羅威 (Galloway) 口音，但最壞的還是，他穿着他父親依現今所謂衛生原理代他設計的衣服；他沒有硬領圍在頸上，有的是一個鑲邊的縐襪 (Till) 沒有上



衣，有的是一件束腰緊身衣 (tunic)，皮鞋是方頭的，花樣新奇，有一隻銅釦子。這一切自然而然地引起了強烈的反感，結果使他在回家的時候，他的束腰緊身衣的邊子不見了，他的綳襪也被人弄散破了。然而事情也竟慢慢地變好了，當時還在他下一班的太特教授 (Prof. P. G. Tait) 說：『在學校裏，他起初是被人當作怕羞者，而且毋寧是呆子看待的。他不事交際，逢到偶有的假日，也只是讀點古歌謠，畫點奇怪的圖和做點粗的機械模型來消遣。對於這種種玩意的專一從事，這就給他得來了一個不很中聽的混名 (Darty (意爲癡漢——譯者))，因爲他的同學們對這些全然是無知的，他們那時一總還不知道什麼數學哩。可是，約莫到了他的學校生活的中途，他可使他的同伴們驚異了，他突然成爲他們中間最有光彩的一個，得了許多的獎賞，有時且是學業成績，數學和英文詩的最高獎。』

在他還沒到十五歲之前，他就已經做過一篇論文，刊在愛丁堡皇家學會會報 (Proceedings of the Royal Society of Edinburgh) 上，討論某類曲線之一種機械的畫法了。在這個方法上，後來發現了，僅僅有一位享名不在笛卡兒之下的數學家比他早著了先鞭。太特說，在做這篇論文

的時候，他已受到的數學知識還沒出幾本歐幾里得和最基本的代數學範圍之外哩。

早在他的學校生活時代，他就開始了他終身從沒放鬆過的一種習練——做詩給他的朋友們大樂了。這些詩有許多首都收在肯拜耳的馬克士威生平 (Life of Maxwell) 一書中，其中有兩首並且是在特銳力荅學院 (Trinity College) 的校史上有名的一首『John Alexander Frere, John』和一首凱萊 (Cayley) 像讚。『一首怪僻的頌辭』呈海爾曼·施兔夫克拉夫特，則是他最後的一首詩，是一八七八年因他的二位知友，太特和史梯華特 (Balfour Stewart) 刊行了一本書怪僻的哲學 (Paradoxical Philosophy) 而做的。其中有幾行，涉及到物質和能量之命運的，還是現今極其通行的見解之一個顯著的先趨哩：

是神馬後毀滅的時候，

是地球和太陽都成冰塊的時候，

也是一切牠的能量都減縮了的時候，

物質乃至以太也將消滅了；

詹姆斯克斐克馬克士威

我們，也就是，我們已經做成的一切工作

都將和以太中的波似地永遠地奔馳着

在無限擴展的球體中穿過太陽外邊的天空了。

在他過學校生活的時期中，我們首先聽說有一種玩藝，那是他畢生玩着而且是他全體友人和他一起玩過的。牠的名字之一就是提螺 (diabolo)，不過通常都叫牠做『棒上魔鬼』 (devil on two sticks)。所謂『魔鬼』是由一個複錐體做成的，中間窄的部分擔在一條繩上，玩的人兩隻手裏各持一條短棒，把那繩子的兩頭分扣在兩棒的前端；再把兩棒之端相反地一上一下地一動，就能使『魔鬼』很快地轉動起來了；所以，事實上，這就是一具自製的廻轉器 (gyroscope)，因為牠正具有那種儀器之一切奇怪的性質。他把牠玩得技巧極精，無疑地，引他去製造他的動力的陀螺 (dynamical top)，用來顯著地說明了轉動體之種種性質的也就是牠。另外還有一種玩具，是他在孩童時代愛玩，而後來也賦予了牠一種科學之應用的，那就是活動畫筒 (zoetrope) 或生命輪 (wheel of life) 了。後來，長遠之後，他是用牠表示過兩圓渦輪怎樣相互跳田雞戲的。這我

想就是應用活動影片原理到科學目的上之第一次罷。

馬克士威在這中學裏費了六年，然後就進了愛丁堡大學 (University of Edinburgh)，并且得到了福布施 (Forbes) 教授的允許，拿講演用的儀器做他自己的實驗。他廣泛地，雖則無系統地，研讀了數學物理學，又做了兩篇論文刊佈在愛丁堡皇家學會學報 (Transactions) 上。在那裏他讀了三年，一八五〇年一離開後，就進了劍橋，先在彼得堂 (太特已先在那裏) 一學期後就轉入了特銳力苔，主要的原因是當時彼得堂裏很有些頗為能幹的數學家，而一個數學家在那裏要想當選一名公費研究員 (Fellow) 似乎沒有在特銳力苔容易。他帶到劍橋去的數學知識，雖則漫無系統，但其範圍之大，要照他那樣年青的人說，實在是異乎尋常的，這據太特說，還驚動過他的私人導師何潑金斯 (Hopkins) 哩。早在他進校第二年的初頭，他就當選為特銳力苔的一名獎學金承受生 (scholar) 了。正好那時候，以及好久以後，獎學金承受生都在一桌吃飯。這就給了馬克士威一個機會，使他能和學院中最富有智力的一羣人，其中有許多後來是成了名的，早夕接觸，而這些人也就不知道他的怕羞和一些離羣性，反而認識了他的特異的能力了。他於是成為「使徒社」

(Apostles) 的一員，這裏的社員是限制爲十二人，而照社裏的意見，他們要是大學中能力最特出的人纔行的。

布特婁 (Dr. Butler) 是後來做過特銳力苔主任的。他說：『在我初到特銳力苔的時候，馬克士威正開始他的第二年。他的地位在我們中間是獨一無二的。他在大學肄業生中是一個被認爲獨具天才的人。』馬克士威給一切他所遇到的人的印象是勢力非凡的；那多半倒常是由於他的人格，而不是由於他所說的話，因爲許多人都覺得跟他說話不大容易，他能很快地從一個題目轉到另一個題目，他的活潑的想像力能驚起了如許之多的野兔子，使他還沒有把一個弄停了之前，他又離開了另一個了。我聽布特婁博士說過，他記得有一次和馬克士威一起散步，馬克士威雖則沒住過嘴，但他對於他所說的話一點也不明白，而且，據布特婁博士說，『我並沒有漏聽過一個字』哩，他的談話的魔力，我們在他的一位偉大的友人，當時的一位數學學者的日記中，也可以得到證明，他說：『馬克士威在談話中常常顯示他自己熟習所談到的每一個題目。我從沒有遇見過一個人，像他那樣的。我相信沒有一個題目，他不能談，而且是談不好的，他總是呈現着最奇異而出乎尋

常的消息。』另一位友人說：『在他的朋友們之中，他是最有天才而能使同伴們歡樂的一個，是一個個奇怪的理論之提出者，又是許多條詩的戲言之作者。』

他在劍橋的第二年一開頭，他就起始正式預備他的數學名譽卒業試驗（Mathematical Tripos）了。他以前雖然已經比他的同輩讀了不少的書，但讀的方式非常雜亂，對於以速度為一個很重要因子的任何試驗似乎都沒有什麼好處。因此他就下了決心來醫治他本人的這種毛病。雖則預備試驗幾乎被有些敏銳地自覺他們自己優越的人認為是一件不大名譽的事，但馬克士威在他當時的信札上從沒表示過任何的激怒，他忠實地而且切緊地順着為最多的人設下的正道走去。何潑金斯這一位優異的大科學家，當時正是最成功的一個數學教師，在他的學生中已有過斯托克（Stokes）和威廉湯姆生（William Thomson）這樣的人了，馬克士威也就成了他的一個學生，並且仔細地去做他所指定的一切工作。對於他之離開團體而去，『老何潑的支持者』在這時期的信件中很有些關涉到這事的話。在名譽卒業試驗之前的一學期是費在校閱前此研究過的題目上的。許多人都覺得這是件討厭的事，但馬克士威說：『假使有人問我怎樣應付

數學的話，我說，我是忙着配置每一件東西，使牠能把一切都表示得清清楚楚，因而叫主試者現在可以滿意，學生們此後也受到教訓了的。那是件愉快的工作，是很有力而差不多還沒完成的。」

除開跟着何潑金斯研究之外，他又參加了斯托克的講座。他在一八五四年正月裏受了數學名譽卒業試驗，得到甲等數學優等生（Wrangler）第二名。第一是彼得堂的盧斯（Routh），他後來成爲一個最成功的數學教師，有二十七個第一名甲等數學優等生都受過他的教，歸功於他，并且他也是對於一種很高級的數學最初有過貢獻的人。在史密斯獎金試驗中，論文是限於較深的題目的，這兩位也都被包括在內了。

有趣的是斯托克在這次試驗中出的題目裏，第一次公佈了一個基本重要的定理，那就是所謂斯托克定理，把一個線積分連到一個面積分上去的；這定理在馬克士威的理論（Electric theory）之發展上極其重要，缺少不得，這已業經證明了。

何潑金斯據說曾經說過，馬克士威沒問題地是他畢生經驗中遇到的最特出的一個人；要他錯想了任何物理的題目，那似乎是不可能的事，不過在解析上他可是差得很遠的。馬克士威對於

幾何的方法之偏好 (preference) 較勝於解析的方法，這一點在他的同輩中也有許多人說過。他一般的思想方法是一步一步地前進，從一個固定的觀念過到另一個上，以至他達到了目的為止，而不是毫不描摹任何中間階段，就藉些符號和方程式達到那裏的，這就是一個例子。

馬克士威在得了他的學位以後，仍留在特銳力苔，從事他的色彩論 (Theory of Colour) 并研讀法拉第 (Faraday) 的實驗的研究 (Experimental Researches)。一八五五年，他當選了一名公費研究員，與院務發生了關係；這一年的年尾，他刊佈了他的論文『法拉第的力線』 (Faraday's Lines of Force)。這時他父親的健康損壞了，給他很多的焦慮，使他想儘可能的多費點時間在家裏；爲什麼他成爲阿拜丁 (Aberdeen) 的馬銳斯凱爾學院 (Marischal College) 自然哲學教席之一個候選者呢，這也就是理由之一了。然而，他父親在一八五六年他的任命還沒宣佈之前終於死了，肯拜耳先生說：「這在他個人的損失是無可補償的，他們在長期的朝夕相處之後，接着一天通一次信，又在一起度過好多假期，并且從無間斷地，不管見面不見面，交換着思想和社會見解，這有輕鬆的，也有嚴肅的。」



馬克士威在他父親死了不久之後，就當選了馬銳斯凱爾學院的講座了，不過直到十一月纔在那裏開始工作；這中間他回過劍橋，辦理院務和教導一班工人，直留到六月纔走。他也刊佈了一篇論文『論幾何光學』。在他研究史密斯（Smith）和柯太施（Cotes）關於這問題的著作時，他就已經受了打擊，使他覺知許多舊法之勝過當時在劍橋得勢的那些方法了。在這篇論文裏，他就把這種種的方法介紹了一些，另外也加了些別種方法進去。馬克士威許多討論『幾何光學』的文章都很有一種特殊的勁兒和雅緻，使人讀起他們來都非常愉快咧。

一八五六年十一月他開始在阿拜丁工作了。從他在這時發出的信札裏，知道他當時很費過不少的思想，和時間在他的教課和爲他的講演預備的許多驚人的實驗上。同時，他似乎對於他的口音也會極仔細地注意過，因爲在他到阿拜丁兩月後給肯拜耳的一封信上，他說了『有一件事，我是非常感謝的，雖則你或許不大相信吧；但直到如今我還沒受誘過來慌過任何人咧。』接着又說：『在這裏任的笑柄都沒聽說過，兩月來我還不會鬧過一次笑話，而且假使我覺得有一個要來了，我就咬過我的舌頭，噤不出聲了。』在阿拜丁最初兩年的期中，他的主要的科學著作是他得

亞丹施獎金(Adams Prize)的論文「土星之光環」(Saturn's Rings)。這獎金是專爲主持者們認爲具有極大科學意義的若干問題之最完善的解答而設的。在這一次，選的題目就是土星光環之運動，而提出的論點要不外乎這幾個假設：(一)光環是個體的，(二)牠們是流體或者一部分是均一的(uniform)，(三)牠們包含的是互不黏着的物質之羣集(masses of matter)，而平衡的狀態則是由相互間的吸引以及那個行星和光環的運動來維持的。

馬克士威得到的結論是：只有第三個假設是和光環之穩度(stability)相合的。那是一件非常吃重而困難的研究，整整勤勞地工作了兩年。這就更加大了他的聲望，顯示了有一顆新的一等星已經在數學物理學的天空中升起來了。艾銳(Airy)就說過，那是他從不曾見過的數學的最顯著的應用之一咧。

也就是在阿拜丁的時候，他纔轉而注意到氣體動力論(Kinetic Theory of Gases)。力芬(Niven)在他的優卓的加在馬克士威全集(Collected Works)之前的那一篇馬克士威行述中，提出來說，馬克士威之進行這一件工作是由他在他的土星光環論中遇到的許多問題引起的。

這也許是不錯的，在一篇宣讀於大英協會 (British Association) 阿拜丁大會之前的論文中，對於一種氣體的分子之速度的分配 (distribution of velocities) 這一個根本而重要的問題，他不就給過解答了嗎？這一個答案就是稱做馬克士威之分配 (Maxwellian distribution) 的那個定律，而雖則他給牠的證明已經受過批判，但他的結果之真實是沒人懷疑的——正像有些其他的具有偉大的物理的識力之人一樣，他的本能是優於他的理智的。

當一八六〇年中，皇家和馬銳斯凱這兩個各有一物理教授的學院合成了一個大學，只要一個教授了的時候，馬銳斯凱爾學院的教席就被裁去，而那年的夏天他就受命去充倫敦皇家學院 (King's College) 的自然哲學教授了。

在一八五八年二月中，他已經和加塞林·瑪麗·第華 (Katherine Mary Devar) 馬銳斯凱爾學院院長的女兒，結了婚，從那時起也就不再為特銳力苔的公費研究員了。

他當選倫敦講座之前，也曾為愛丁堡自然哲學教席的一個候選者。當時太特和盧斯，他在名譽卒業試驗中的舊敵，也在候選者之列。雖然當選的是太特，但馬克士威在那時已達到的地位，在

愛丁堡雜誌 (Edinburgh Courant) 的一篇評論中，還是找得到證據的：在競選的時候，那論評說，「馬克士威教授已經被認為是知名於科學界裏的最著名的人們之一人了，」不過牠接着說：「在一個像我們這樣的大學中，對於一個教授所要求的，還有另一種特長，那就是對於知識不完全，甚至於全然無知的學生們之一種講解的能力了。我們很有點懷疑，許就是這一種能力的不足，使主事者 (curator) 寧取太特先生，而不用馬克士威教授吧。」這一種說馬克士威不是一個好教師的見解，對於那些僅僅從他的寫作中認知他的人們，一定似乎是奇怪的。他的許多公開演辭，如在大英協會上講的一篇「分子構成物體之動力學的證明」(The Dynamical Evidence for the Molecular Constitution of Bodies)，以及他在大英百科全書內的許多文字，不都是清晰而輝煌的表辭之典範嗎？不過這些公開的演辭，雖然也是宣讀出來的，但他是被草稿所限，要遵守一定路線的呀。而在班上對於無知學生的演講呢，原可較為隨便，那麼要說他覺得難於使那艱苦地徒步旅行，遵着一條為這樣的教學所必需的路走，而也許已經高昇到他們的知識範圍以外比較高深的區域中，那也完全可能吧。

馬克士威開始他在倫敦皇家學院的工作是一八六〇年的秋天，此後他任教凡五年。這五年也許就是他生平最多產的一個時期。在那時期中，他產生了一篇『色彩論』和兩篇關於『物理的力線』(Physical Lines of Force) 的論文——那是和他的另一論文『電磁場之動力學』(The Dynamics of the Electromagnetic Field) 一起兒含有他的磁論和電論的——又產生了他的拜克銳講演(Bakerian Lecture)『空氣在各種不同的溫度和壓力下之黏性』(The Viscosity of Air at Different Temperatures and Pressures) 以及其他兩篇關於『氣體動力論』的論文。至於他的一切比較重要的實驗工作，除去色箱(colour box) 試驗外，也都是在這時期中做成的。各種氣體的黏性實驗是在他的倫敦寓所房頂上，一間長的頂樓(atic)裏做的，他的夫人充當火夫(stoker)，調整溫度。在以絕對量度(absolute measures) 測定歐姆的實驗中，他也是一個主要的份子；那些實驗是在皇家學院實驗室中做的，主持者則是由馬克士威、史梯華和曾金(Fleeming Jenkin) 三人組成的一個委員會。一八六五年，他就辭去了教席。

在他辭職後，重回劍橋之前的那幾年中，大半的歲月都是在格倫奈耳消磨掉的。這時期，他寫

電磁學通論 (Treatise on Electricity and Magnetism) 的大部分，又寫了一本簡短的熱論 (Treatise on Heat)，我們這一輩的許多學生就是從這本書中學得了他們的熱力學之大部分的。一八七〇年他當了大英協會 A 組的主席，他就任主席時的演說，議論的就是數學和物理學之間的關係。他在劍橋主試了一八六六、一八六七、一八六九以及一八七〇這幾年的數學名譽卒業試驗。由於他在試驗中所出的題目的種類，也由於他親自在劍橋的影響，這使他在一種運動中成爲一個重要份子，運動把電學和熱學的題目引進數學名譽卒業試驗中，而最後復歸結於建設卡文迪虛實驗室 (Cavendish Laboratory) 和莫立實驗物理學講座的基礎。

雖然牛頓在特銳力苦他的房間中，斯托克在派姆不魯克 (Pembroke) 他的房間中，都做過許多極其根本而重要的物理實驗，但不到一八七四年，這個大學裏是沒有一間實驗室，在其中能做成物理實驗，或者能從事實驗物理之說明的。

一八六九年中，那個由大學任派的一個委員會 (Syndicate) 就查覆了大學，說贊成設立一個熱學和電磁學的教席和示範席 (Demonstratorship)，也贊同籌備一所物理實驗室了，那

據他們的估計是要值到六三〇〇鎊的。這一筆款子，起初大學裏真不知道如何纔能籌到，不過到一八七〇年秋季（Michaelmas Term）一開始就有辦法了，大學總長（chancellor）第逢州（Devonshire）第七代公爵，那一位曾經獲得史密斯獎金的第一名和甲等數學優等生第二名的人，中言只要大學方面一把實驗物理學的教程準備妥當，他願意供給一筆款子為建築與儀器之用。

這一來就使事情變得很為順利，到一八七一年二月，大學就決定預備一個實驗物理學教席，而到三月裏，馬克士威就當選去充任這個教席了。

在這裏要好好承認的，那就是這個大學對第逢州公爵所受的「恩債」（debts）了；假若不是因為他的慷慨解囊，那要宣請馬克士威做牠的教授之一，為牠增光，該是不可能的，而且雖然無疑地大學裏遲早總會有一個物理實驗室，但卡文迪虛實驗室由牠的第一個主任（director）留下來的精神和傳授方式可就難有了。

馬克士威在他當選之後，第一件工作就是預備這所新實驗室的種種計劃。他用了很大的精

力與熱誠使他自己來從事這件工作，又花了很多的時間和思想，來計劃安排教學和研究這種種計劃的實行，要費的錢，雖然比原本的估計超出了很多，但那位公爵也一起擔承了，於是建築的工程就在一八七二年夏季開始，而到一八七四年復活節(Easter)時就完成了。那年的六月裏，總長就正式地把他的贈與呈奉於大學，同時也表示了他的願望——用一切必需的儀器把這所實驗室充實完備。而到一八七七年馬克士威報告大學的時候就已經說，這實驗室已包容了在當時科學狀態下所必需的一切儀器了；這證明了，正和可以預期的一樣，牠非常之有希望，馬克士威自己還又花了很大的一筆錢來增加儀器的收藏咧；他從來是除開最好的以外，對於一切都不會滿足的。在他的就職辭中，他把他想到的這所實驗室在大學的研究中所應負的任務這一問題的意見發表了。我引一點很短的擇要在下面：

許多最荒謬的主張，只要牠們用以表示的語言聲音和某些著名的科學術語相似，那就能變成流行的了，類此種種，實就是人們給予科學的尊意吧。假使社會此後準備接受一切種類的科學主張了，那我們所要提供的就不僅是要普及和培養種種真實的科學原理，而且也要普及和培養一種健全的批評精神了。



那個用自做的，常易引起錯誤的儀器的學生，比那用仔細調整過，因而他易於相信牠而他不敢弄壞牠的儀器的學生，學得的常要多點。

在實驗室建築期中，他每學期都有演講，把他的新奇的東西東放一下，西放一下，照他說，正和一隻布穀鳥相似，一學期放在化學實驗室裏，第二學期放在植物室裏，以後又到了比較動物學的博物館裏了。

這實驗室終於在一八七四年開放了，示範員(demonstrator)就是加奈特先生(Mr. Garrett)；起初學生很少，而其中的大部分都是新近參加過數學名譽卒業試驗以及對於物理學有興趣的人。那時也沒有系統的示範；學生們起初是被派去用少數的儀器做些量度的工作，等這一種短學程過了之後，就開始研究一個特殊的問題了。希克斯(W. M. Hicks)是第一個學生，接着在他後面的是高爾敦(J. E. H. Gordon)，克銳斯陶爾(George Chrystal)，桑代爾斯(Saunders)，麥克愛力斯透(Donald MacAlister)，夫麗明(Fleming)，格奈慈不魯克(Glaze-

brock) 肖斯透 (Schuster) 力芬那一位編輯馬克士威論文集 (Collected Papers) 和首先在劍橋講解馬克士威論著的人，以及坡印亭 (J. H. Poynting) 他後來在馬克士威理論上是有過極重要的增加，而其中坡印亭向量 (Poynting vector) 現今并且已是一個主腦的部分了。很僥倖的是這之中有好幾個人在今天這個紀念裏都到了會，我們很希望他們能把他們的經驗告訴我們。不過有一件事也許他們是不會告訴我們的，在這些學生中有七個已是學院的公費研究員而且已有六個已是皇家學會的公費研究員了哩。後來終於發展成爲這實驗室的工作之一個很重要的部分，那就是在這時由克銳斯陶爾和桑代爾斯開始的一件工作——比較大英協會所有的各種不同的電阻單位了。接着做這事的是夫麗明和格奈慈不魯克，而這也就是在雷萊勳爵 (Lord Rayleigh) 時代終結時，用絕對量度來測定一切基本電學單位的那種種研究的起點哩。

馬克士威在計劃一個學生的研究上極其勞苦；在這事做好了的時候，我相信他是遵從一個可靠的原則行的，那就是，最好是讓學生用他自己的力量去努力克服他的種種困難，而在教師方面呢，與其把這些困難給他移開，倒不如鼓勵他和牠們奮鬥的好。他喜歡學生們自行去思想一個

題目。他告訴過肖斯透爵士說，「我從來不勸阻人去從事一個實驗；即使他找不到他正在期待着的東西，他也可以找到些其他的東西呀。」

在這個時期中，馬克士威自己的工作，大部分是編輯卡文迪虛的論文；卡文迪虛，他雖然僅僅刊佈了兩篇論文，但他留下的關於數學的和實驗的電學草稿倒有二十札。這些馬克士威都親手抄出了；他以卡文迪虛時代的科學文獻浸潤了他的心靈，他重試了他的許多實驗，尤其引他注意的是他的發明，用他本人做電流計（galvanometer），憑藉電流通過他的身體時牠們產生的種種生理效應（physiological effects）來測量（卡文迪虛測量過他接近過的每一件東西）電流。凡是在這時期中參觀過這實驗室的人們都曾經忍受過電流通過他們身體，來看他們是一個好的還是一個壞的電流計這一種試驗。一八七九年刊佈的卡文迪虛電學研究（The Electrical Researches of the Honourable Henry Cavendish），要作為電學歷史中的一章，那實在是無可匹敵的。牠證明了卡文迪虛曾經是後代許多發現的先驅，他曾經形成過電容（Electric Capacity）乃至於介質常數（Specific Inductive Capacity）的概念，也曾經先行發現過歐姆定律。

那一本小而有趣的包含着他對於動力學原理許多見解的書物質與運動 (Matter and Motion)，也就是在這時期刊佈了的。

每學期他都主講一個學程，而那是總歸吸引不到牠所應得的衆多的聽衆的。

馬克士威生平的最後數年是很慘淡的，他的注意都被他夫人的綿長而沈重的病勢佔有了；他儘可能地奉獻了他很多的時間來看護她，正和他以往在他父親最後失去健康時對他做過的一樣。在他夫人的病中，有一個時期，他整有三星期沒睡過一張牀，不過在實驗室中作他的演講，做他的工作，仍然是照常的。

在一八七九年一開始，他的朋友們就注意到他的健康之變得極壞了，而到復活節期 (Easter Term) 中，他雖然仍按日到實驗室裏來，不過時間就都很短很短了。六月中，在他回到格倫奈耳之後，他迅速地變得更加衰弱，再到十月裏就有人告訴他說他僅有不足一個月的功夫可以活着了。他於是就回到劍橋來，讓他信任的醫師派季特博士 (Dr. Paget) 看護他。雖然他以非常堅忍的精神忍受了極大的痛苦，他的心還是絕對清晰的，他唯一的思慮就是他夫人的幸福和安樂，

因為她在她的生活中每一件瑣事上都已經習慣於依靠他的幫助了。她現在是病臥牀上的，而到最後呢，馬克士威就留下了為她的安樂所必需的種種遺囑。於是，最後的一刹那終於來了，那是在十一月五日，當他是四十九歲的時候。在特銳力苔學院——他是那裏的一個名譽公費研究員（Honorary Fellow）——的小教堂（Chapel）裏舉行了一次殯儀式之後，屍體就被送往了格倫奈耳，安葬在那裏的巴頓教會墳場（Parton Churchyard）中。

在預備我這一部分演辭的時候，我很感謝肯拜耳的馬克士威生平一書，那本書我多讀一點，我長久以前在談話中從那些有光榮（我是沒有的）認識馬克士威的人們那裏得到的印象也就變得更強和更深一點了。那個印象呢，就是深佩他性格的敏慧和堅強，以及他的不自私和溫和。他顯示了他是人們最可愛敬的一個，是一個孝子，是一個賢夫，是一個良友，也是一個愛好文學、哲學和神學的人。

他是一個深有宗教心的人，在說到宗教的時候，除非對那些和他極其親近的人，他都是很沈默的；寫給他夫人的許多極可注意的信，印在『生平』裏的，就證明了他這種情感的如何深沈，而

他對於表示那個情感的觀點則見於他因為受召請參加科學家們一個宗教問題討論會而發出的覆信中。他說：『我想每一個人在他企圖調和他的科學和他的基督教的那種嘗試中所達到的種種結果，除了對於那人自己，而且也只是是一時對於他以外，是不應該具有任何意義的。』

雖然他擔任教席僅只八年功夫，但他在那個時期中卻做了一件偉大的工作；他計劃了房屋的建築，用儀器充實了牠，並且使牠利於物理學的研究。而尤其重要不過的，是他定下了這個實驗室的政策，是他把研究的精神注入到牠的裏邊去。是他決定了牠除開教授老學問之外，同時應該產生新學問出來。他又用他自己的工作以及他許多學生的工作懸下了一個高卓的理想給那些在這個實驗室中工作的人們，又給我們留下了值得驕傲的遺產——一個偉大的名字。

那一筆遺產的如何巨大，這是直到他死後好久好久纔被認知的。在他死的時候，他對於物理學的超凡的貢獻——電場論 (The Theory of the Electric Field) 的真確性還是一個未決的問題哩。那時還沒有好多實驗的證據贊助牠，雖然也沒有一個是反對牠的。對於牠能夠加的斷言，大半也只是蘇格蘭人的斷詞『沒證明』而已。牠除了一小羣劍橋的青年人以外是很少得到

支持的。牠不爲老人們採用的原因也並不是頑固的保守心或者一味要證據的偏見。他們已經用舊理論工作了許多年，他們已經因牠之引導而有了許多偉大的發現，他們知道牠對於任何已知的電的現象未嘗不一致那麼，要他們爲一個新理論——引進了一個還未得直接證明的新原理的理論——而放棄了這一個舊理論，那問題就和要幾個纔開始研究電學而又沒有一個理論可放棄的青年們之採用新理論兩樣了。我希望假使我能奉獻一個短時間給馬克士威的這一工作，我是能夠得到寬恕的。

他開始研究電學是一八五四年，當時這門科學還在一種極非常的狀態之中。在一方面，有許多數學家，他們完全從超距作用 (action at a distance) 的觀點看這問題。他們假設了一個電荷或者一個磁極之外的空間是正和牠們不會出現時一式一樣的，在牠們之外，了無所有，唯有距離而已。他們從這個觀點解決了許多的問題，比如那些關於電在各種不同形的物體中之分佈 (distribution) 的問題就是，不過那些問題呢，從所用的方法之優良與精巧上說，那是有興味的，但要從物理的觀點看，那就全非很基本的了。在另一方面，有法拉第，他在一種全然的先見之

鼓動和指引之下，花了二十年以上的功夫，一次一次地得到了許多的發現，開發了全新的知識領域。在法拉第看，電荷或磁極只是許多向每個方向發散出去的力線的起點；因而繞在牠們周圍的空間因為牠充滿了這些力線的緣故就不和其他的空間相同了。照法拉第的看法說，也就是這些力線是對於電和磁的種種作用負有責任的——牠們纔是真有重大關係的東西。在他看，牠們不僅是些幾何的線，牠們也具有許多物理的性質，牠們是在一種緊張狀態（a state of tension）之中而這就產生了異號電荷間的吸引作用；還有，場中的能量都是聚集在牠們周圍的。雖然法拉第從他把握了的他的力線的概念上證明了，他是一位天生的形學家（geometer），他全不是一個解析家（analyst），他從未企圖過把他的觀點裝入了一個數學的形式之中；在他的實驗的研究一書中就沒有一個代數的符號咧。因此數學家們就不能了解他，而且是很很地看不起他了。當時的天文學家盧艾歐（Royal）就說過：『要是有一個人，他是知道以超距作用爲根基的觀測和計算之間的一致（agreement）的，而會在這一個簡單而精確的作用和像力線那樣模糊而變動不居的任何東西這兩方面之間，有一刹那的遲疑，我敢說，我對於這種人就難能想像了。』這種所提到



的「一致」是和許多的問題，像那些我們剛剛業經提到過的問題有關的。馬克士威在他寫的第一篇電學論文，一八五五年做的那篇「法拉第的力線」上就證明過，對於這樣的種種問題，法拉第的觀念引出的結果是確實和超距作用的理論所引出的結果一樣的。

然而當這些問題在那個理論範圍中竟是獨一無二的問題的時候，牠們在法拉第方法的範圍中只是問題的一部分，而且不是其中最重要的部分。這就常常提示着新現象的可能，又繼續不斷地舉出了新的問題。舉一個例子說，受力線通過了的空間具有和空無所有的空間相同的性質嗎？法拉第的電磁誘導作用 (Electromagnetic Induction) 這一個偉大的發現就證明了那是沒有的，因為假使在磁力線正在穿過着的空間中有一線路 (Wire Circuit)，那麼把這線路旋轉一下，其中就有電流通過了，而在正常的空間中是不會如此的。法拉第從而達到了這樣的概念——經磁力線通過的空間是在一種特殊的狀態之中的，他把這狀態稱爲電張狀態 (Electro-tonic state)，在電張狀態下的空間顯示了許多的性質，是正常的空間所無的。照我的意思說，在法拉第給科學的許多偉大的貢獻之中，最偉大的一個就是力線概念了，我想電場和電磁場

(Electric and Electromagnetic Fields) 的許多性質藉牠就可以把牠們最簡單地而且頂富有暗示地表示出來了。

在電磁場中的力線和一種受限制住的流體中的渦流線 (Vortex Filaments) 這二者之間是有一種很顯著的類比的。流體的運動和牠的能量都完全依這些渦流線之強度和位置而定；牠們可以說是流體運動藉以決定的坐標，正和力線是決定電磁場行動的坐標一樣。還有，渦流線不能歸結於這流體的本身，牠們必定要走到一個境界爲止，或者形成許多閉合的曲線纔行。力線呢，牠們也不能終止於自由的空間 (Free space) 中，牠們的終點必得在電荷之上，或者牠們就必得形成許多閉合的曲線。而且更有一點，渦流線也和力線一樣，牠們是既不能生發也不能毀滅的；假使在任何地方，渦流線的數目有變了，那一定是因爲有些渦流線加進了那個地方，或者有些離開了那地方的緣故。斷定一種流體，其中有極多的渦流線像一種氣體中的分子樣子在一切方向運動着的那種流體，之運動的方程式是和馬克士威的關於電磁場的許多方程式相同的，因此，這樣的一種流體就可用作電磁場的一種模型了。

馬克士威在電學理論上刊佈的第二篇論文是『論物理的力線』(Physical Lines of Force)。這一篇論文是非常之大有興味的，因為我們能從其中探出是他對電學理論之最偉大的貢獻的那種種觀念之發展的路線來呀。他的第一篇論文，大半只是用數學的語言(Mathematical Language)做的法拉第的見解之翻譯，而不是一種新原理的介紹。但在『論物理的力線』這一篇中，我們就看到新原理正在漸漸地築成，帶着一切爲建築用的架子在牠的周圍了。再到他的『通論』中，那些架子就已經拆去了；牠們已經盡了牠們的任務，不過正像他本人說過的一樣，『科學當牠還在發生的時期是最易於充分了解的，』我想有些人一定會覺得要懂得他的意思倒是從論文中去探求比從通論中去探求來得容易吧。在這論文中，他的方法是計劃一個磁場的模型，用來說明法拉第的電磁誘導定律。不依賴符號，而來研究一個具體的場合，像一個模型的情形，這一來就集中了思想，又提示了許多新觀念，而對於由此所獲的種種利益的感謝是沒有一個人會比馬克士威來得更大的。他說：『因爲人的心靈之各有其不同的典型，科學的真理也就應該以種種不同的形式來表現了，不問牠以粗豪的形式和一種物理的說明之生動的顏色出現也好，或者是

以素樸而無味的一種符號的表示出現也好牠總應當被當作是同樣地科學的。『波爾茲曼 (Boltzmann) 說：『完善的精雅的表辭屬於法蘭西人，最偉大的意外動人的氣勢屬於英格蘭人，而馬克士威兼而有之。』

在馬克士威的模型中，代表磁力線的是以這些力線作軸而繞着牠們轉動的許多圓筒 (cylinders)，圓筒轉動的速度就代表力強 (magnitude of force) 而轉動軸 (axis of rotation) 的方向就代表牠的方向。

在一個有規則的磁場中，這許多圓筒都是應該以相同的方向旋轉的。而問題就是牠們怎樣聯連到一起好來做這件事了。假使相鄰的兩個輪子是互相接觸的，牠們轉動的方向就該相反了；因此爲着要使牠們能以同方向轉動起見，他就在牠們的中間加進了許多像軸承珠 (ball-bearings) 般的小球體，使牠們的作用好和理想的輪子一樣；這些小球子轉動的方向和牠們所接觸的每一個圓筒轉的方向相反，因而這些圓筒就以同方向轉動了。馬克士威假設了這些球子是代表電的質點 (particles of electricity)，而牠們的運動代表電流的。當輪子都以相同的速度轉

動着的時候，夾在牠們中間的軸承珠總是保持着原來的位置不變，而僅僅繞着牠們的軸轉動的；因為牠們沒有移動 (motion of translation)，也就沒有電流了。不過假如這些圓筒中間有一個速度變了；這是相當於磁力之變的，那麼這一個圓筒立即就不會再以和牠的近鄰相同的速度轉動，而夾在牠們中間的小球的中心也就要移動了。因為小球的運動指示了一種電流的緣故，這個模型也就把電流之因磁式 (magnetic form) 的變化而產生，也就是法拉第的發明用實物表明了。

現在假設那些圓筒都靜止不動，而施力到那些小球上去；那麼，在小球移動的時候，和牠們接觸着的圓筒也就轉動，而同一小球接觸的兩個圓筒的轉動，其方向也就相反了。圓筒的轉動是指示一個磁力的。所以這模型提示了，假使你把電移動了，你就可以得到磁力了。在一個電導體中，電在受着一個電力作用的時候總是繼續運動着的，所以輪子也總是轉動着而磁力總是沒有變動的。而在一個絕緣體中，電荷在受力的時候就開始移動了，不過這運動是要遭到阻撓而最後歸於停止的；可是無論如何，只要在牠動着的時候，圓筒的轉動和磁力總是有的。電力一有變化，那些

小球子的平衡位置也就要變了，而在那些小球子從一處移向另一處的時候，圓筒都轉動了，磁力也就產生了。

這是利用模型的好處之一個非常顯著的例證。馬克士威計劃的一個模型本意是用來說明法拉第的發現——磁力的變化產生了電力的；但當他用了這模型之後，他覺得了，牠也把電力的變化能產生磁力這一點暗示了。這一個觀念的引入和發展也就是馬克士威對於物理學之最大的貢獻。馬克士威走的這一步，其重要是有事實作指證的，在他的時代之前主宰着這個領域的電磁理論中，電波 (electrical waves) 是不能存在的，而在他的理論中呢，一切的電力的和磁力的變化就都發送向空間散佈開去的波來了。

他重回到這理論上來是在較後的一篇論文「電磁場之動力學」的末後幾部分中。在「論物理的力線」那篇論文中用的模型，在這裏不用了；牠已盡了牠的任務，他已經提示了這些新電流的存在，也暗示了牠們在連結電力和磁力的許多方程式上所引起的變動了。因此，在後一篇論文中，他就逕直假定了這些電流的存在，而發展牠們的種種推論了；他獲得了許多的方程式，就是

那些著名的馬克士威方程式。這些方程式，事實上，在『論物理的力線』那一篇對於一個理論的誕生之頂迷人的報告中早就已經得到了，不過在形式上可是比較矯飾的。那一篇報告，我還記得，當我還是一個十八歲孩子的時候，一讀到牠，我就被牠引得興奮極了，我竟用普通的文字 (in long-hand) 把牠全部抄下來研讀，而牠正是一篇非常之長的文章哩。

馬克士威最後提起他的理論是在一八七三年刊佈的電磁學通論中。這本書大部分是在格倫奈耳，在他離開皇家學院之後，未回劍橋之前那個時期中寫成的。牠是一種電磁學的通論，自然是不僅限於討論這一理論的。這理論起初只有少數信從的人其原因之一，那是必須承認的，就是他是把他的理論用些極其模糊曖昧的形式呈現出來的這一點了。在物理學的文獻中，最爲難的篇章之一就是在這書第一卷開頭，他在那裏把爲這理論所獨有的種種特徵描寫了的地方。在這些特徵中，最重要就是需要任何地方一有了電力，那裏也就有了他所謂的電之「位移」(displacement)這一點了；他在這一種位移和一種彈性固體 (elastic solid) 在應力 (stress) 下的位移之間引出了一個類比。這使許多人都假定他已把電當作一種彈性固體，把電的位移當作這

種固體的位移了他說電的移動 (movement) 是和一種不可壓縮的流體的那種種移動相同，而在一個閉結的表面 (a closed surface) 中其總量總是維持着不變的；這說明了，牠意中的電是和一種電荷的總集 (a collection of electric charges) 有點不同的。在他於其中從事構造他的理論的那一篇論文，『論物理的力線』中，他認為電是由許多小質點構成，而電的位移就是這些質點在一個分子中的運動，然而在通論中他就從沒提到這一點，而在他被迫着去解釋電解現象 (electrolytic phenomena) 爲便於描寫起見說了一個電的分子 (a molecule of electricity) 的時候，他就說這辭語和通論的其餘部分不相調和了。事實上，他在假設關於電的什麼事的時候是很謹慎的，他對於牠很少假定什麼是出乎牠的名字之外的。這還不够使我們能以摹想牠在電的現象所盡的任務哩。這一種對於馬克士威的意旨摹想之難，也就是使這理論很慢很慢地纔得到承認的理由之一了；當赫芝 (Hertz) 說馬克士威的理論就是馬克士威方程式的時候，呈在他心中的就是這一點；當林爾姆霍斯 (Helmholtz) 說，要叫他解釋電荷在馬克士威理論上除開是一個符號的容器 (recipient) 之外是什麼，他一定會受到困惑的時候，呈在他心中的也就



是這一點。

僥倖的是我們假使正確地回到法拉第和他的電力線上去，我們還有些資料供我們給馬克士威的理論作物理的解釋。假使我們認爲馬克士威所謂的電確確就是力線，而他所說的電的位移就是這些力線的密度 (density)，這麼一個觀點對於馬克士威所作的關於電的確實的陳說：(一)有電力 (electric force) 的地方就有電的位移；(二)電的作爲和一種不可壓縮的流體一樣，這兩則就可以滿足了。馬克士威在他的第一篇論文中是曾經證明過力線是和這樣的一種流體中的流線 (lines of flow) 相合的。

再則，力線是不能另行生出的，所以當通過單位面積的數目 (用馬克士威的術語說就是「電的位移」) 一有變動的時候，那麼就必定有一些力線移入或者離開這一面積，而通過一個閉電路的力線數的變率 (rate of change)，就必得和在單位時間中通過其境界的力線數相等了。當電力線移動的時候，牠們就產生了磁力，這已經有「一個運動着的電荷是有一個磁場圍繞着牠的」這一事實來證明了。假使因電力線之運動而生的磁力是和這些力線，也和牠們正在運動着

的方向成直角，而和垂直於牠們之長的牠們的速度成正比例的話，那麼，在使一個單位磁極在一電路的境界上繞走的時候所做的功 (work)，就要和在單位時間中通過這境界的力線數，因而和通過這電路的電力線數之變率成正比了。這一結果就是馬克士威理論的主要特徵。電力線之引入，在法拉第，是用來表現靜電現象中正在進行着的種種歷程 (processes) 的。在這種現象中電力並不隨時間而變化，而力線是靜止不動的。但在極大部分的電的現象中，電力線是在運動中而不是在靜止中的。力線的運動就給了牠們許多新的性質，而這些要表現電動力學之會完全失敗，那是很有可能的，雖然牠們在靜止時的許多性質儘够對付靜電學。力線概念的基本特性之堅強的證據，就是，牠們在運動中獲得的許多性質確確是那些使牠們能以表現電動力學所需要的性質這一點了。

法拉第的電磁感應定律是：通過一電路的磁感應線數 (number of lines of magnetic induction) 的變率等於使一個單位電荷環繞電路時所作之功。

馬克士威的定律是：通過一電路的電力線數的變率等於使一個單位磁極環繞牠時所作之

功。把這兩個定律用數學式子表示出來，那就是以馬克士威方程式著稱的那一系方程式了。你們會注意到這兩個定律的互相對稱了吧：假如在法拉第的定律中，我們把「電的」和「磁的」這兩字的位置互換了，我們不是就得到了馬克士威的定律了嗎。

馬克士威理論之最顯著的推論是：電擾 (electric disturbances) 是像電力的和磁力的橫波似的傳播開去的這一點。這些波的傳播速度 (velocity of propagation) 是以那些能以純粹的電的測量決定的種種量而定的，而這樣算出來的速度，在實驗誤差的極限內，正和光速相等。這自然而然地就暗示了，光波也是電力的和磁力的波，而這就是馬克士威的光之電磁論 (Electro-magnetic Theory of Light) 了。假使馬克士威的理論是真確的，那麼光波無論如何總不過是那些雖則我們見不到而一定存在我們周遭空間中的電波之一部分而已。因此，探發這些電波在這個理論的建立上就非常之重要了。不過，馬克士威本人可沒做過任何實驗來證實他的理論。在他的一生中，他就沒有許多的機會來從事精細的實驗。當他在阿拜丁的時候，他的時間為亞丹施獎金的工作佔有了，那是一件長而艱難的工作，要在一定的期間中完成的。在皇家學院的時候，他

纔利用了他的機會，做了數量很可觀的實驗工作；這電磁理論無論如何總是在一八六五年他離開皇家學院的時候纔開始了的。從一八六五到一八七一這幾年，他是在格倫奈耳而沒有機會做實驗的，而當時呢，他就全力從事於卡文迪虛論文的編輯，來盡一個卡文迪虛教授（Cavendish Professor）之一件虔誠的義務了。而他的精力呢，也就與其說是用在實驗物理方面，寧可說是用在理論物理學方面的了。

在通論刊佈後，等過了一個長時間，那些在實驗室中製造電波和研究電波的方法纔被發現。當時我們是要拿出現在光學中的既成方法來使我們自己滿足的。所以馬克士威理論那時唯一能受證驗的部分就是他的光論了。牠是很經受得住試驗的。牠給予存在空無所有的空間（empty space）中的光波以正確的速度，這我在先已說過了。牠指示了光波在穿過物質時的速度是得和那物質的介質常數之平方根成反比的。這一點在有些場合的確不錯，不過在另一些場合中可又離標的太遠了。這偏離（Divergence）是不是驚異的；而足以驚異的倒是必須有些東西，對於牠，牠是真確的這一點哩，因為介質常數是在一種不變的電力下量得的，而光波中的力竟每秒鐘往復

變動至萬萬萬次以上呀。一個較好的證驗是尋求反射和折射的偏極光的強度 (the intensity of reflected and refracted polarized light) 在這一理論上之如何隨入射角 (angle of incidence) 及偏極面 (the plane of polarization) 而變，以及光受微點作用時的散射 (scattering) 定律等等。這些試驗的結果對於這個理論是特別有助的，理論和實驗的一致，就大體看，在這理論上比在任何其他的光論上都來得好咧。

然而無論如何，不等到馬克士威死了將近十年之後，電波的存在之實驗的證據總是沒找到的。因為要做到這一點，有兩件事是必需的：(一) 假使牠們是存在的，那麼就需要一個產生這些波的方法，(二) 在牠們產生之後又需要一個探察 (detecting) 牠們的工具。對於第一點當時已經有電容器的振動放電 (the oscillatory discharge of a condenser) 來應付了；所難的還是探察牠們。這困難的發生是因為波中的電流每秒鐘要變更牠們的方向幾百萬次的緣故。而對於方向變得這樣迅速的電流當時是還沒有法子可以用來探驗的；雖則現今是容易得到一種僅供電流作單向進行 (one-way traffic) 的電路，譬如，把一條導線接到某種晶體 (crystals) 或者

一個熱游子管(thermionic valve)由此而成的電路就是了。不過這些方法在那個時代還沒有發現，而實際的發現電波倒是由於憑藉一個照發現的次序說，最老的電的現象——電花(electric spark)。通過兩個放在一起極靠近的金屬球中間的電花之產生，雖則有需於相當大的力量，不過只要這樣的一個力量一經具備了，那麼在一個非常之短的時間，在適宜的條件之下小於百萬分之一秒還很多的那樣短的時間中，電花就可產生了。波中的電力在一個方向上起作用的時間是要比這長點的，因而牠在一個和牠方向相反的力還沒有來干涉牠之前，就能產生了牠的效應(effects)了。赫芝，那一位赫爾姆霍斯(第一個支持馬克士威理論的大陸物理學家)的學生，也就是利用了這些電花，以及觀察了在把電花隙(spark-gap)放在種種不同位置的時候電花長度的變動，纔奠定了電波之存在的。他證明了：牠們是和光波一樣受反射的，牠們也能向一個焦點收斂，牠們也像光一樣能偏極化，而在建立牠們的波性(wave character)上，尤其頂重要的。是牠們也顯示了干涉效應(interference effect)，因為從這裏牠們的波長就可計算出來了。

赫芝的研究，在物理學的全部歷史中，是實驗技巧，天才，以及慎於結論的那種態度之最希有的偉業之一。比較年青的物理學家們，現今聽他們用來探察電波的已經有很有有效的工具了，他們自然是不會知道這些實驗的種種困難的，不過年老點的，像我自己就是一個，他們是用赫芝方法開始實驗過，而且觀察過當檢波器 (detector) 從一個位置掉到另一個位置的時候，那些僅有一耗幾分之幾長的小電花是盈呢還是虧呢 (waxed or waned) 的人，他們這就記得這些實驗如何地費力與麻煩，而要證實這許多觀測到的效應不是偽造的，又如何需要很長的時間了。這方法雖則似乎是不精細的，但牠在赫芝的手中也竟能證明了電波之存在，並且使他能將馬克士威是其始祖的那個理論建立了起來；在這一問題的歷史上，此所以馬克士威和赫芝這兩個名字，就總拆不開來，而總歸連在一起了。

電波的發現不僅僅具有科學的利害關係，儘管這是唯一引發了牠的關係。正和法拉第的發現電磁感應一樣，牠在文明上也具有深刻的影響；牠已經有力於種種方法的提供，來使世界上的一切的居民彼此相互都在聲音能及的距離之內，以完成現今纔被我們開始認知到的，許多社會的

教育的以及政治的種種效能了。

(註)本篇原題爲 James Clerk Maxwell 作者爲 Sir J. J. Thomson ——譯者。



## 馬克士威對於德國理論物理學的影響（蒲郎克）

一個偉大的研究家之於知識世界的影響首先是經由他的許多科學成果的。這些就是他生平工作所得的最直接而最有價值的收穫了。雖然也常有一個偉大的人格發出的影響比較是不大直接的，但常是比較重要的。這一點可以從這樣一個人所發出的刺激力對於一羣同情的當代人士之作用裏現出來，而常是經由他們的媒介，他的科學的貢獻纔得到加一的收穫的。在精神科學的領域中，這種直接的和間接的影響之間的分別能明確地看出來，那是不常有的事，因為精練的見解之造成儘可以是他的努力之一個主要的部分。但在科學中，研究者和他的研究目標兩者分別是分別得極清楚的，要逐步地跟着一個偉大的研究家在其中不僅由於他自己的發現，也由於被他引起的別人作成的那些發現，而獲得的永久不朽的路走去，那也就容易得多了。

任何人，只要他相信物理科學所關涉的，與其是一個主觀的個人的經驗世界的描畫（*view*）

cription) 毋寧是一個客觀世界的描畫，那他無論如何就得承認：各個不同國家的有學問的人之接觸實際上是不必需的了。即使世界上各個國家都完全各各隔絕了，在每個地方，物理學也還是可以照舊進步的。這一個觀念是有事實來支持的，只要必要的客觀條件 (objective conditions) 充分了，偉大的物理發現和機械發現不常是在各個不同的國家中各不相干地同時完成嗎？所以，只要一達到某個時機，異地的許多科學家就儘可以各不相干地貫徹他們的工作了。

在每種科學中又總有幾個特殊的人物，他們似乎是非常的尊崇，而放出的潛勢力常遠遠達他們的本國界外，且因而直接地鼓動了并且加速了整個世界之研究工作的。詹姆士·克婁克·馬克士威，他的百歲誕辰正在舉行着的一位，在這些人中是要算數的。雖則人不能懷疑，他在整個物理學範圍中所獲得的一切，即使他未嘗活過，也遲早要變成普通的科學知識，可是我們給他的敬意還是免不了的，這不僅是因爲他如許之多的第一次發現，也由於他曾經如此之好地爲各國和他同時代的人効過力，激發了他們，也拯救過他們，讓他們不再走許多徒勞無功的歧路。

馬克士威的許多偉大的發現任在何種意義上都不是偶然的，牠們是從他的豐富的天才中

發生出來的，他在許多的活動範圍內都是一個先驅者，領袖和權威，這不就是明證嗎？

近代物理學 (modern physics) 認可兩種主要的概念體系 (conceptual schemes)，不連續質點 (discrete particles) 的物理學和連續媒質 (continuous media) 的物理學，而牠們之間的分別就是從馬克士威的時代以後纔首先變得較為顯明的。這兩種體系是差不多，可不是完全和物質的物理學 (physics of matter) 與以太的物理學 (The Physics of the Aether) 相當的。馬克士威在這二者的領域中，都會引進了不少的新而且極其有用的觀念。

要想表明這些概念對於德國物理學發展的意義，最清楚不過是把馬克士威對於他的德國科學伴侶，那些在當時或不久之後就在他們的科學中位於領袖之列的科學家們所施的影響來研究一下。

質點物理學，就先來說這個吧，在很遠很遠的過去時代原就有其根源了，但在前世紀中葉前後，牠纔以氣體動力論的形式而再生。這一個理論是緊跟着熱之功當量的發現下來，由許多各不相關的研究者在不祇一個國家中同時給牠以定型的；這就是英國的焦耳 (J. P. Joule) 和瓦透

斯登(J. J. Waterston)與德國的克倫力虛(A. Krönig)和克勞休司(R. Clausius)了。在這個理論中，一種氣體的壓力和熱兩者都被委爲是由於一羣飛動着，相互之間和各各與器壁之間連續地發生碰撞(colliding)的分子之急速的不規則的運動所致了；對於這一個新假設，馬克士威也早就感到了興味。這假設在當時似乎是非常大膽而驚人的，因而就招致了各種實證主義者(positivist)之猛烈地攻擊，認他是一種危險的錯誤。馬克士威在他的前輩所導出來的分子的平均速度(mean velocity)與壓力和比熱的簡單關係上，又加了一個新而比較根本的考慮方面，那就是考究到那些隨意挑出來的分子，牠們每個的實際速度。馬克士威對於這個問題的回答，這就使他奠定了物理學一個新枝——統計力學(statistical mechanics)的基礎。因爲這問題顯而易見是只能用一個或然律(probability law)來答覆的；只有這或然律纔能在那種隨意選擇一個分子的試驗試之又試，試了很多次之後，把那些被發覺具有一個有定速度(definite velocity)的分子之成數(fractions)告訴我們。這一個定律，首先就是馬克士威發現的，後來也就以他的名字名之。我們可以見到只要速度的三個分量(components of velocity vectors)能當作獨

立的來研究的時候，這定律無論如何總是和高斯的錯誤律(Gaussian Error Law)相符合的。

這一個發現的結果在德國是頗有形形色色之觀的。克倫力虛似乎不會使他自己和這一個問題發生過關係。克勞休司對於這結果雖則讚賞過，但顯然沒有把牠看得太重要，這是從他研究且嘗試證明牠的正確性(validity)以馬克士威所處理的彈性分子的場合爲限，這件事上可以看出來的。

然而在波爾茲曼可完全不同了。他立刻而且很清楚地承認了馬克士威的速度分配律(Velocity Distribution Law)在氣體動力論中的根本地位。這一來，他就在德國預備了路線，好接受馬克士威的勞作了，雖然，也許就因爲，他正是牠的一個熱切的批評家吧。

波爾茲曼首先把馬克士威的證據精練了并且一般化了，那證據是假定單一原子性(monatomic)的球形分子包舉了多原子性(polyatomic)的分子之場合的。他更用他的著名的H定理(H. Theorem)更進一步地證明了，馬克士威的「分配」只要牠達到了這種狀態之後，不僅是穩定的，而且牠也就是唯一可能的平衡狀態咧，因爲任一體系，不管牠的原始狀態怎樣，最後總

歸要達到這種地步呀

波爾茲曼再進一步又證明了，對於一種在穩定狀態下的氣體之一個分子，和牠的每一個自由度 (degree of freedom) 相結合的都是相同的平均能 (average energy)。這一來，以前馬克士威在計算比熱時所曾經碰到過而有阻礙動力論之虞的一種困難，也就被波爾茲曼極其成功地克服了。這是和定壓比熱 (specific heat at constant pressure) 與定容比熱 (specific heat at constant volume) 的比率，在一切斷熱過程 (adiabatic processes) 中佔有一個重要地位的一種比率有關的。對於一種單一原子的氣體，比如水銀蒸氣吧，這一個比率被測出確確為  $1\frac{2}{3}$ ，正和球形分子 (spherical molecules) 之假定相當，但對於多原子的氣體，理論與事實之間就有了一定的差額了。因為假使把三個不同的惰矩 (moment of inertia) 歸屬於一個非球形的分子 (non-spherical molecule)，那麼，這兩種比熱的比率就應該是  $1\frac{1}{3}$ ，可是為氫、氧和氮測得的數值則為  $1\frac{2}{5}$ 。波爾茲曼於是就發現了一條逸出這個困難的容易的路，他假定這樣的分子僅有兩個不同的惰矩，而非三個。這假定正和事實相合，這些分子原是二原子的，因而連結這兩個原子的

線就正是一條對稱的轉動軸了。

要更深一層問到，相關於一個分子的諸原子之共同振動 (mutual vibration) 的那個自由度如何作用，這問題就既不是波爾茲曼也不是馬克士威所能回答的了；因為這一個問題的解決是屬於物理學之一個較晚時期的事。

這裏我們見到這兩位研究者如何因友誼的競爭而彼此相激勵，一起兒造成這幼稚的科學——統計力學了。在他們兩位順着爲適應他們各自的個性而闢出的兩條不同的路邁步前趨的時候，要跟蹤他們，這已經有人特別注意到了，而要注意視他們在他們達到同歸於一個目標的過程中之互相校正和展伸彼此的工作，那倒還沒有人注意到咧。他們的方法不同是可以從事實上看到的，比如，馬克士威在找出一個複雜的力學的機構 (mechanical structure) 之統計定律 (statistical law) 的時候，他的步驟是研究同時存在於無數不同狀態下的機構，而另一方面波爾茲曼呢，則寧願長時期地注視一個單一的機構之多樣的狀態變化。這二個方法，只要一致地貫徹了，二者是都可以引出同一的統計定律來的。他們兩人對於統計力學和熱力學之密切的關係

也都十分明瞭，而且兩人也都同意，熱力學的第二定律只是一條或然律，因而由力學的觀點出發，就必須認可有許多特別的例外纔行了。

有些非可逆作用 (irreversible processes) 如黏滯流動 (viscous flow)，熱之擴散 (diffusion) 和傳導 (conduction) 等都是隨時間而變化的，動力論一關連到這方面就遭遇到許多大困難了。儘管這學說中也有幾種結論，如馬克士威的推論——一種氣體的黏滯與其壓力無關，和觀測極其符合，然而要企圖把黏滯係數 (coefficient of viscosity) 的數值精確地計算出來，也業經證明是非常之難的事了。因為，要得這複雜的計算能以完成，實需要幾個單純的假設，比如說，一切分子速度相同，或者更較重要一點，說一種湧流氣體 (streaming gas) 的多種速度之分配是由於把湧流速度 (stream velocity) 加於此種氣體在靜止時的速度分配之上而得到的。然而一切這樣的假設可引出矛盾來了，因為在不曾計及的許多量中，常有些是和那些被算在裏面的量次數相同的緣故。在這個範圍內的研究家中，最少有六位，他們依照各自的計算法所得到的擴散係數 (coefficient of diffusion) 與導熱係數 (coefficient of conduction of heat) 之比



值都是不同的。

波爾茲曼這纔在原則上發現了走出這座迷宮的路，因為他在爲一層狀態不穩定的氣體之速度分配求得一個確實的表示式(expression)上是成功了的。然而，困難又起來了，對於彈性的和球形的分子之最簡單的場合，無論如何，牠是業經證明不能滿足這個方程式了。波爾茲曼於是就以他所特有的恆心和果斷，供獻了一份未可輕視的精力，也許就是他寶貴的精力中之太可重視的一部分，來嘗試解決這問題了；他所憑藉的則是相繼膨脹(expansion in series)；先在一方面，然後又在另一方面的膨脹。他的三篇論文，『氣體激動論』(Zur Theorie der Gasreibung)，各頁之上都是被差不多無盡的公式和數字遮滿了，而具有長而困難的計算之深切的痕跡的。

馬克士威的方法則不然。他不像波爾茲曼讓他自己緊抓着爲彈性球形分子的場合找解答這樣的難以處置的問題不放，他倒把問題的本身改變了，他用了具有許多較顯明的特性的他種分子代替了彈性分子。這一條路線，他知道是可能的，因爲他看到一種氣體的壓力，黏滯及其他等性質，只要能量和動量(momentum)不滅律不發生問題，是必定和那些統轄兩分子碰撞

(colliding) 的定律大不相關的，這是因為一次碰撞的發生只在一個相對地非常之短的時間中的緣故。在彈性固體的場合中，因為兩個分子的速度，無論大小和方向，先前總是固持不變的，非達到碰撞的一剎那，他們纔突然地變了的緣故，所以碰撞在這裏是一個完全不連續的過程。一個人假使要不這樣想，而且他僅僅關心於最後結果的話，他也能把一次碰撞認為是從初速 (initial velocity) 到終速 (final velocity) 之間的一次連續而急速的變動，只要假定分子之間有一種排斥力 (repulsive force) 而牠的大小正和牠們相互的距離之一個不很低的乘方成反比就行了。這樣一來，於是兩個分子在相隔很遠的時候，牠們的作用差不多是各不相關的，也就是，牠們是以不變的速度運行的，而僅僅在近到一起的時候，牠們的速度纔起大變化，而構成一次碰撞呀。

在一切力之可能的乘方律中，那個五乘方反比定律 (Law of the inverse fifth power) 業經證明是特別合宜的了。照這一個定律說，二個分子在一次遭遇碰撞 (head-on collision) 的時間中，牠們之接近的最近距離是和牠們的相對速度 (relative velocity) 的四次根成反比的，而由

此可知，兩分子的相對速度在黏滯性的最後表示式裏既經消失，那麼在一種不穩定的狀況之下的一種氣體，其速度的分配之一般式也就不再需要了。馬克士威因而就假定了有一種排斥力和距離之五乘方成反比，而於是比較簡單地解決了黏滯性問題。

馬克士威的這一項成就以及牠之呈現的形式，這兩者給波爾茲曼的印象都很好，致使他把牠竟列入一種完善的藝術工作之林了。他用好些宏麗的字句把馬克士威的工作比之於一齣偉大的歌劇 (musical drama)。這一點是被他用一種差不多是他和馬克士威所共有的特性描畫出來的。

最初莊嚴地展開了速度的變異 (variation of velocity) 一幕，於是從一邊進來了狀態方程式 (equations of state)，從另一面進來了中心場中的運動方程式 (the equations of motion in a central field)，而始終在較高之處掠過的總是混亂一團的公式 (the chaos of formula) 於是實然地聽到了四個字：『設  $N$  爲 5，『惡魔  $V$  (二分子的相對速度) 消滅了，而在低音部中佔有優勢的一節也突然地靜默了；那些以前似乎不能制勝的現在也就像被一次驚心動人的突然變動勝過了。要說爲什麼這樣變換或者爲什麼那樣變換，那是沒時間說的；誰不能感覺到這一點，那他就把這本書放在一邊好

了，因為馬克士威並不是寫音樂節目單的人，他是並沒有負有義務來把範圍內的一切都給解釋了的。一次次的結果由許多具有韌性的公式發出來，直至達到了非預期的頂點，就來了一種重氣體 (heavy gas) 的熱平衡 (heat equilibrium) 此後幕就放下了。

我們也很願意就讓這幕放下吧，我們好轉向物理學之另一範圍中了；那就是以太物理學或電動力學，馬克士威的天才在這裏是獲得更大的成功的。因為在氣體動力論中，馬克士威還是和其他幾位共分領袖之席的，而在電動力學的範圍內，他的天才可巍然獨立了。在許多年靜默地研究之後，他終於得到了一次成功，而那次成功在一切智力的最大的成就之中必定是數得到的。他用純粹的推理揭發了大自然的許多秘密，不過在這些秘密之中有些是遲了整整一個世代 (generation) 纔經用了許多機巧而繁難的實驗證明了的。假使人先不假定在自然律 (laws of nature) 和精神律 (laws of mind) 之間有着很密切的關係存在，而要說這樣的預言全然是可能的，那就十分難解了。

我們自然一定還沒有忘記吧，馬克士威並沒把他的電動力學理論 (electrodynamic theo-

「造在半虛空裏呀。因為「無」中是不能生「有」的，從「無」裏出來的還是「無」。他把他的理論思考是造在許多堅固的基礎之上的，那就是我們在這不久之前剛剛紀念過的那位法拉第先生的實驗工作。不過馬克士威是有異常的想像力和數學的鑑別力 (mathematical insight) 的，他走得比法拉第可更遠了，法拉第的觀念既被他一般化，也被他弄得更確實了。這樣他就造出了一個理論，不僅能和許多既成的電磁理論競爭，而且在成就上且完全超過牠們了。平常一個理論的價值標準是看牠能否完全解釋除開牠所據以成立的那些現象之外的其他現象，從來能極其滿足這個標準的就只有馬克士威的理論哩。法拉第或馬克士威起初在他們考慮電磁學的基

本定律時都不曾相關連地考慮到光學 (optics)。可是整個的光學領域，那差不多有百年以上的功夫是曾經抗禦了人們從力學方面所施之攻擊的，竟被馬克士威的電動力學理論一舉而克服了；這一來從那時起，每一個光學現象就能够直接地當作一個電磁問題來處理。而這必定永遠是人類最大的智力勝利之一了。

然而無論如何，馬克士威的理論起初是有過一個多少艱難的襁褓時代的，這大半是由於牠

的本性。使牠難以爲一般人了解，因而大大地減小了牠說服人的力量的，那就是不能夠發明一種可供摹想的模型，把牠的公式關聯到普通的力學原理上去這一回事了。

在德國這一個困難竟是一個重大的障礙。這裏在前世紀中葉時代電動力學的完成是從勢論 (Potential Theory) 着手的；而勢論呢，是高斯從牛頓的靜電場與磁場中之超距作用定律裏導出來，而又把牠帶到一種高度的數學的成就 (mathematical completion) 的。在牛頓的萬有引力定律裏，兩個質量 (mass) 的吸引力是被假定和牠們的速度及加速度，也和牠們的位置 (position) 有關的，因而需要把動力的過程包括進去的普遍律 (generalization)，其獲得也，這就要從推廣那個定律着手了。

法拉第和馬克士威的主張——這樣的直接的超距作用全然是不存在的，以及力場 (field of force) 有其獨立的物理的存在，這些對於一種整個的思想方法都不適宜，因而使馬克士威的理論在德國就毫無立足之地而難以受人注意了。即使竟然受人注意呢，也只是被人當作一種怪有趣的新奇事物看待而已。僅有很少很少的物理學者有和牠較爲接近一點的趨向。這之中，先有

波爾茲曼，他特別地研究過馬克士威在折射率 (refractive index) 和介質常數之間確定下來的關係，並且用過各種物體，尤其是氣體，做過極慎重的實驗，把牠完全證實過。他又屢次地企圖過，把馬克士威的電動力學方程式用機械的模型弄得比較易於領會些，但，這是不大成功的。

其次，作為中間的過渡的是赫爾姆霍斯。他之容納馬克士威的理論是由於牠的形式單純性 (formal simplicity)。經過了許多重要的研究，他終於為斷電路 (open circuit) 間的相互作用立了一個普遍定律，而把各種不同的超距作用的理論和對應的馬克士威的公式兩者都作為牠的特例了。不過，這方法并不能把超距作用和直接接觸 (immediate contact) 作用之間的對立 (antithesis) 移去。這一種理論的鬭爭，在德國乃至在全世界最後的解決是有利於馬克士威的，而使牠解決的則是赫爾姆霍斯的最特出的學生赫芝。他早在他的劃時代的實驗未作成之前許多年，由於理論的研究，根據當時已知的許多物理事實，就已經看出來馬克士威的理論之較優於各種超距作用的理論了，這是很可注意的。因為他的推論似乎還沒有獲得他所應得的認識，在這裏不妨再簡述一下。

假使世上的電力僅有一種，因此一根被摩擦過的橡皮棒所藉以吸引或者排斥一個通草球的一種力，和一個動着的或變着的磁石藉以在一個導體裏感發(induce)電流的那一種力，兩者就該是同樣的，而這一個磁石就該能使通草球動了；所以，照機械的作用與反作用的原理說，一個荷電的物體這就該在一個動着的磁石上產生一個大動力(ponderomotive force)，因而結果和普通的磁作用十分相遠，一個動着的磁石就一定以一個與兩磁石的相對運動有關的電力大動力地(ponderomotively)作用於另一磁石之上了。但電磁的理論原以超距作用為基礎，牠是假定二磁石間的許多大動力只是那些僅與牠們的瞬時磁化(instantaneous magnetization)有關而與牠們的時變(time variation)無關的，因此，從這一個觀點看來，這樣的一種電動力學就不能算是完全的了。

那個加上了必要的項目而得的改正(correction)確然是很小的，因為牠含有所謂臨界速度(critical velocity)的平方在分母之中。不過無論如何，人也不能就停在那裏從大動力作用的改正上，人依照能量不減原理是無可避免地對於感應作用會得到一個改正的。因為無論如何，



感應和大動力主體上總是相同的，所以對於大動力這就又需要一個新的改正了，而且永遠如此哩。假使有一個人每次都把相當的改正引入，那他對於大動力作用和電及磁感應作用二者，這就獲得了一個無限級數；牠所含有的項是逐漸降低的臨界速度的些偶次方 (even powers)，所以普通牠都是一個收斂級數。這一個級數確切地滿足了馬克士威定出的微分方程式，而擾動 (disturbances) 就是依照牠以臨界速度傳播開去的，這似乎是一件很可注意的事實吧。

這樣從一個直接的超距作用的假設裏導出來的馬克士威理論的特殊的餘論，在赫芝自然是不把它當作那個理論的正確性之一個證明的，因為人不能從不確實的假設找出可靠的結論，不過，它對於以下的一個結論倒是充分的。「假使在通常的體系和馬克士威的體系之中僅能選擇一個，那麼後者無疑地是佔優勢的。」

由於一個奇特的合一吧，赫芝這一篇論文的出現，正在馬克士威的理論從波爾茲曼方面得到一個有力的支持的時候。那就是波爾茲曼在黑體輻射熱的溫度變異 (the temperature variation of the heat radiation of a black body) 上之較短而在現今甚著名的貢獻了。在這裏，

他用了馬克士威的輻射壓方式 (expression for the pressure of radiation) 從熱力學第二定律上導出了經驗的斯忒藩定律 (Law of J. Stefan)。

這一來，馬克士威的觀念之普遍的意義就漸漸越過越清楚地為各方面所認識了，直到最後赫芝在用極速的電振動 (electrical oscillations) 所做的定局的實驗 (crucial experiment) 裏產生了波長僅有幾個厘米的電波，乃得到了無比地終局的勝利。馬克士威的推論於是經由了一個在全部科學世界中都產生了最大感應的發現而被變為事實，而實驗物理學和理論物理學的一個新紀元也就開始了。

赫芝試驗對於馬克士威理論的意義，只要一想到赫芝的動機并非僅在證明馬克士威的理論，那似乎就格外顯著了。他從理論方面所得的偏見如何之小，從一件事實上可以見到——有一個時候，他相信過，他已經用他的試驗給電波在自由空間中及在導線中的兩種傳播速度立下了一個差額 (difference)，而這結果是和馬克士威理論不合的。到後來他纔知道，這個觀測得的差額乃是由於周圍的導體之擾動勢力而起的。

從此以後，馬克士威理論的勝利是已經決定，無庸再辯，而進一步的問題是研究牠在一切可能的方向上之發展，特別該研究那種波長位在光波與電磁波之間的波及其產生了。

德國物理學者中，對這一項工作有貢獻的首先是盧奔斯 (Heinrich Rubens)，他和哈根 (Ernst Hagen) 合在一起，證明了，只要所用的光，波長一經够大，那麼用量得的光之金屬反射 (reflexion of light by metals)，即在極微細的方面，也是和馬克士威理論相合的，因為馬克士威本人曾經看到他的理論在這一現象上會感到極大的困難，這一個證明這就不啻把一個大困難變成一個大勝利了。

在這裏還有一個問題留而未決，仍是一個暗點。那就是短波光之金屬反射。我們在這裏事實上真達到了一個限度，這個限度以外的地方，馬克士威的方程式，假使還保持着牠們的老式樣，那就不能去了，這是因為牠們的根基立在連續分佈的物質 (continuously distributed matter) 的假設之上的緣故；而引入原子的過程，其需要也就立即顯明了。在時間的前進中，在量度的技術之進步中，人們也日漸清楚，不僅物質具有原子性質，就是能量在某種意義上也具有牠們；更進一

步呢，又開始看出了，即使前此被當作當然之事，引入物理學中而形成這種種反射之處置的基礎的那種分別，微粒的作用與波的作用之間的分別，也不能夠完全作成，僅能被認為是一種極限場合 (limiting case) 了。因為，剛剛在一邊，一個均勻波 (homogeneous wave) 的能量就常常似乎是在許多不相連續的質點 (discrete particles) 之中，而在另一邊呢，兩分子的碰撞又必得當作兩波羣 (wave group) 之干涉來處理呀。

馬克士威沒有活着等到看見這一幕革命的展開；他的工作只是構造并完成古典的 (classical) 理論，而在這樣的工作上，他所得到的成功之偉大是無與倫比的。他的大名這就堂皇地立於古典物理學 (classical physics) 的門口，而我們能用這樣的話來恭維他了：詹姆士·克婁克·馬克士威，在他的誕生上，他是屬於愛丁堡的，在他的人格上，他是屬於劍橋的，而在他的功業上，他是屬於整個世界的。

(註)本篇原題為 Maxwell's Influence on Theoretical Physics in Germany 作者為 Max Planck —— 譯者。

## 馬克士威與物理的實在概念之發展（愛因斯坦）

相信<sup>在</sup>知覺的主體外，還有一外在世界（external world），這是一切科學的基礎。但因我們的直覺（sense-perceptions）僅間接地把這外在世界，或物理的實在（physical reality），告知我們，所以要牠對於我們成爲可以理解的，那只有藉助於推理了。而由此可知，我們的物理的實在這概念是永不能一定的；我們必得常常準備着更改牠們，也就是，更改物理學之公理的基礎（axiomatic basis），因而纔能以極盡其可能的論理的完密顧及到些覺知的事實。這只要一看物理學的發展就知道了，這公理的基礎在時間的進程中事實上就曾受過深刻的變動。

從牛頓建立了理論物理學後，在物理學之公理的基礎上——在我們的「實在」之構造的概念方面——最大的改變是開始於法拉第和馬克士威兩氏對於電磁現象的研究。在後面，我們就要把這說明白點，同時也研究到物理學的發展之較早的及稍後的經程。

照牛頓的體系說，物理的實在是以空間、時間、質點和力（質點間的相互作用）這幾個概念爲特性的；而物理的作用（physical processes）則想作是質點在空間中依照某種定律所作的運動（movement）。只要「實在」是變化不居的，質點就是「實在」的唯一代表了。顯然地，在些可覺知的物體中，質點這概念是有其根源的；質點是可以想作和些可動的物體（movable bodies）類似的，只要除去牠們的幾種特性——廣延（extension）、形式（form）、空間的排列方向（spatial orientation）——和一切牠們的「內部的」（inner）性質，而僅僅留下慣性和移動性（translational）來，外加上力的概念，這就行了。但如此心理底地作爲「質點」概念的構成之出發點的質體呢，現在牠們自己倒反要被想作是些質體系（systems of material particles）了。這裏要注意的，這一理論的體系本性是原子論的和力學的；一切活動都被想作是純力學的——也就是，僅是質點依牛頓運動律所行的運動而已。

這一個理論的體系中，最不完善的部分，除開近代在「絕對空間」（absolute space）這概念上的困難外，要算是光論了，爲要求理論的一致，光在牛頓想來，也是由質點構成的。但光在被吸

收的時候，其成分質點 (constituent material particle) 將怎樣呢？像這一問題即使在那時也就已經銳利地感到它的迫切了。而且，把兩種完全不同的，需用以代表有重量的物質 (ponderable matter) 和光的質點引入理論，其自身就是最不完滿的了；以後出現了電的微粒 (electric corpuscles)，又成爲第三種質點，性質亦復完全不同哩。再如，把那用以決定事物之遭遇的交互作用的力，認爲是一個純然不定的假設，這也是理論基礎上的一個弱點。可是，話雖如此，這一個「實在」的概念成就正也不淺哩。那麼，必得把牠放棄掉。這樣的感覺，究竟如何發生的呢？

牛頓因爲想給他的體系配上數學的形式，他就首先發現了微係數 (differential coefficient) 的概念，並且就用了全微分方程式 (total differential equation) 的形式把運動律 (laws of motion) 宣佈了出來——這在人類智力的發展上許是最大的一步，從沒有給任何人做出來的哩。單爲着這個目的，偏微分方程式 (partial differential equation) 原是不需要的，牛頓因而就沒有系統地 (methodically) 用過牠們。然而牠們在柔體力學 (the mechanics of deformable bodies) 之公式化上是需要的；這是和這樣的事實相連的——在這種問題中，物體之如何由其

質點構成，確是先不關什麼重要的。

這樣一來，偏微分方程式到理論物理學中來原是一個使役，但漸漸地牠倒反成爲牠的主人了。這一過程實始於十九世紀，當人們受些觀測得到的事實之威壓，接受了光之波動論 (undulatory theory of light) 的時候。在一無所有的空間中的光被想爲是一種以太的振動 (vibration) 了，而要再把這種以太的本身認爲是質點的一種集合體 (conglomeration) 呢，那也就似乎無謂了。偏微分方程式到這裏纔第一次現出來，作爲物理學中基本原理之逼真的表示式。在理論物理學之一特殊的分枝中，連續區域 (continuous field) 和質點又是一起出現作爲物理的實在之代表的。這一種二元主義 (dualism)，雖然紛擾了每個系統化了的心 (systematic mind)，現今仍然沒有消滅哩。

假如物理實在的觀念現在不再是純原子論的了，牠也仍然是純力學的；一切的變動也仍然被解釋做是慣性質量 (inertial mass) 的運動。至於它也能作別樣想法，這一點實在還沒有想到哩。以後，一個空前也許絕後的最大的革命出現了，那是和法拉第、馬克士威和赫芝這幾個名字連



結着的。在這一革命中，最大的貢獻還是馬克士威的。他證明了，當時已知的一切光和電磁的現象，都能用他的著名的複系 (double system) 偏微分方程式來表示，在這方程式中，電場和磁場皆是作為獨立變數 (dependent variable) 的。馬克士威也試過，給這些方程式找出一個理想的力學的解释之基礎或者證明來，他也曾同時應用過這些解释之中的幾個，不過就沒有太熱切地用過牠們之中的任一個；至於，這些方程式本身全都是重要的，以及其中的場強度 (field intensity) 也都是基本的，不是從別的更較單純的「實有」(entity) 中可以導出來的，這也都是很明顯的了。所以在世紀轉換的時候，把電磁場作為一個不可再變的「實有」這一概念就已經普遍地被接受了，而一些比較有權威的理論家呢，也就不再相信馬克士威的方程式之仍需辯護，或者給牠們配一個力學基礎之可能了。而在相反的一面呢，倒立即作了這樣的一個企圖：想藉馬克士威理論之助給質點和牠們的惰性一個場論 (field-theory) 的解释了，但這企圖可沒有獲得最後的成功。

假使我們放開馬克士威生平貢獻於物理學各特別部門的些重要的特殊的結果不談，而把

我們的注意集中到他在我們的物理實在的本性之概念上所產生的變動方面，我們就可以這樣地說了：在馬克士威之前，物理的實在，就牠之代表自然的過程 (Processes of nature) 說，是被想作由質點構成，而牠的變異 (Variation) 僅僅是由於些受制於偏微分方程式的運動。自馬克士威後，物理的實在纔被想作是得以用連續場代表的，這裏的連續場也受制於些偏微分方程式，而且是不能夠作任何力學的解釋的。這一個變動在「實在」的概念上，是最深刻的，且也是最多成果，物理學自牛頓時期後所沒有經驗過的；但我們也必得承認，包含在這一觀念內的體系，雖完全實現，無論如何還遠哩。自那時以後，纔開始的些成功了的物理的體系，代表的倒寧可說是這兩大體系之間的妥協的趨勢，實在也就是這一妥協的性質把牠們區分了出來，說牠們是暫時的 (Temporary)，而且是論理不周密的，雖則牠們在牠們各自的範圍內會有些巨大的進步。

在這些體系之中，第一應該說的是羅倫茨 (Lorentz) 的電子論 (theory of electrons)，場和電的微粒在其中是同時出現，作為了解「實在」的兩個相互補助之元素的，其次是特殊相對論和一般相對論 (special and general theories of relativity)，牠們雖則完全立基於場

論研究，但也還不能避免質點和全微分方程式之獨立引入哩。最晚而最成功的理論物理學的產物，名字是量子力學 (quantum mechanics)，牠在其原理上，和我們簡稱爲牛頓的及馬克士威的兩大體系，是根本不同的。因爲出現在牠的定律中的種種量，並沒有企圖描畫物理的實在自身，牠們所描畫的，只是一種特殊的，爲我們的注意所集中的，物理的實在之出現之可能性 (Probabilities)。笛納克 (Dirac)，照我的意思，我們是由於他纔得到這一理論的最論理底地完全的呈現的，他就正確地舉例指出過，要想給一個量子作一個理論的描畫，並且在其中要把決定那光子 (photon) 通過或者通不過一架斜置在牠的徑路上的極化器 (polarizator)，這一問題的因素包含在內，這似乎就不是容易的事。

然而我依然傾信，即使這些理論對於一般相對論的假定頗能適合，物理學家也終不會永久地滿足於這樣一個間接的對於「實在」之描畫的。他們將來得回頭，重新努力實現那個宜於稱爲馬克士威之體系的體系：用那滿足一組偏微分方程式而毫無例外的場域，來作物理的實在之描畫。

(註)本館原題爲 Maxwell's Influence on the Development of the Conception of Physical Reality 作  
者爲 Albert Einstein ——譯者。

## 馬克士威的科學環境（拉默爾）

來浪費這一次集會的時間，這在我似乎是很有些歉然的。卡文迪虛的教授之堅執的主張，我頗能予以辯解，他或許以為在他準備的名單之中，需要有一個前世紀遺存下來的人吧。

愛丁頓（Eddington）現在必已在告訴你們，他怎樣幫助過愛因斯坦（Einstein）和閔柯夫斯基（Minkowski）構成了一個「超智者」（super-intellect），因而在單單的一瞬之間就能把握住全部歷史，以及宇宙（cosmos）的一切部位了，那是在一切不同的方面，對從古到今的天文學家們呈現過的，他們就會經辛勤地精確地觀測過正在衝過天空中的行星之一個，並且根據觀測的紀錄，構成過他們的科學——因此他們本身就產生一個卓越的智者（transcendental realiser），而那確應是一個唯我主義的哲學家（solipsist philosopher），因為別種典型是沒有位置

的。在這個誇張宇宙的體系(hyper-cosmical scheme)之早年時代，我們之中有些人，在適度的困惑之後，就已經放棄了這個野心，認這是超乎我們的範圍之事了，那正是愛丁頓和答非生(Davison)，在戴生(Dyson)協助之下，帶着精細的日蝕紀錄從熱帶非洲和巴西回來的時候，他們告訴一個爲戰爭所毀了的世界說，這些紀錄已預示了宇宙必須如此看法，一個人只有由這條路對於種種的事物，或許纔可以達到徹底的了解；但誰要計數在安排這個可怕的輕體動物的噴火獸(chimera dire)上面已經耗費了的時間呢？在晚近這些日子中，笛納克，一個智力更超過那兩位給外來的空間系統有過反響的漢密爾敦(Hamilton)和格拉斯曼(Grassmann)的人，用新的符號方法，又繼續地給這企圖注入了新希望，把在這個超乎我們時空的「超智者」的外觀上的種種連鎖(concatenations)和我們一致的人類悟力的水平連起來，而這「超智者」的四度方向(four-fold range)正提示了，人們也得認識許多其他的，雖則不合致，但永不自相矛盾的，具有可能性的領域(domains of possibility)，而這有限的人類知覺尚未曾了解的。現在我們正等候，以主要的「康德空間之拉格蘭治殘餘」(Lagrangian residues of Kantian space)

爲根據的，愛因斯坦的新嘗試的結果；而按照威爾孫天文臺 (Mount Wilson) 觀測者的最近報告，宇宙，這個把牠自己的空間賦在牠自己背上的宇宙，也正在急遽地向復活了的大空中膨脹哩。

然而，在由超越的相對論 (transcendental relativity) 之最新的體系而起的顧慮之中，我們在這裏不應該忘記剛在兩世紀以前 (一七三二年) 的天文相對論 (astronomical relativity)：一位謙恭的鄉村牧師，牛頓 晚年的一個朋友，在爲原理 (Principia) 一書的撰述而做的彗星規道之探索中曾經幫過他的忙，因而解開了牠們的祕密的那一位牧師，他怎樣證明過，如何把天體之有律的體系從混亂紛紜地登記下來的觀測（那是一切的天文學者們在牠們在規道上運行的時候，所作的觀測，地點和情形都是沒有一定的）之中分析出來——於是隨即提供了必要的補充給牛頓的先導的理論，開始了一門精確的科學，實用天文學 (practical astronomy)，并且把牠安置得根基鞏固，使得他在後來的時代中，即使有一個愛因斯坦，對於牠的體系，除非在少數極其微細而或許仍然不確定的細節上，也不能提出什麼修正哩。

在這裏人們也必定樂於聽到波耳 (Niels Bohr) 這一個名字吧。他假使不是一個斯干的那維亞人的話，差不多可以說他是一個劍橋人的。因為他曾經在這裏沈緬於馬克士威所呼吸過的同樣的學院空氣中，也同樣地偏愛過種種世界之基礎構造的力學的或者天文學的模式，這些模型無論如何總是暫時的，因牠們的公開的缺點而具有希望和無所畏怕的（註一）。當他用一個簡單的算術運算給我們在這裏證明了，蒲郎克 (Planck) 的普遍常數 (universal constant)，那時正得到充分而全無條件的認可，如何能經由分光的綜合研究 (spectroscopic generalization) 而和很少數的物理科學之其他的絕對量 (absolutes) 相連結的時候，難道我們不驚異嗎？他即使在他的情形已因對於氦光譜 (spectrum of helium) 之於氫光譜 (spectrum of hydrogen) 的關係之一個恰好的預言而鞏固了以後，他又從這光桿兒的符合 (bare coincidence) 之中造出點什麼來呢？然而我們知道，他也已經走去找他的路，來重新展望分光術的基本原理，和重新解釋以前不易於理論的化學元素羣之組織問題，這一切或許都是由於拒絕沈浸於輔助的代數之吸引中，因而能把這整個正在迅速澎漲中的現象域 (field of phenomena) 活動地保持於一



個單純的直接景況 (direct outlook) 之中的緣故吧；那差不多已和愛因斯坦與愛丁頓所造的「超智者」之丰度媲美了。他們說，馬克士威是一個不善演講的講師，這或許是因為，像拉格蘭治一樣，他不能夠把他的活潑的心靈安放在他應該來說明的微文末節上，反而讓牠在那些不能常常現露在他面前之新見解的暗示之後浪蕩着的緣故吧。在我們的朋友波耳方面，或許也是如此；他一定要立即從浮泛在他眼前的倉庫之中，把太多事物的相互關聯指示給我們，因而，正和馬克士威的情形一樣，就大體上說，倒是他印出來的有系統的文字較易於研讀了。

齊曼 (Zeeman) 之受歡迎的出現使我們回想起一件極其微末的現象，那在其較簡單的方面是十分合理而且幾乎明顯的，之如何由他本人一生的實驗研究，因探索他呈現出來的錯綜的局面，而能在 G. P. 亥爾 (Hale) 的激勵的領導之下響遍宇宙的洪爐，作為一條趨向基本知識的原始道路。

於是再來呢，這就要到這個希有的進程之最近代的階段了——不過我們將要保有的可驚之情並不較在一世紀前為大——你們一定要聽到提 G. P. 湯姆孫 了。他就那個形容字的極其

謹嚴的意義說，是一個劍橋人，在他的實驗的探究之中，他已經在令人吃驚的形態之下賦予電子以搏動的羽翼 (pulsating wings)，開始一種新穎而精細的技巧；並且因此而似若被迫去研究和特不路格 (L. de Broglie)，那位把一切觀測者的貢獻合到他的體系內的同一「超智者」的同志協力，從其中之一曾經被他說明過其不充分性的一些瓦礫堆 (débris) 中，從新造起一個新的物理世界。再有，特不路格和虛路定荷 (Schrodinger)，他們不曾獨立地避免過向抽象的理論推進，而在人類思想的最終的限界之外，像一顆沈下去的星似地，追蹤知識，因而他們就把一個極其顯著，雖然尚難合致的酬報帶回來給科學了。

於是再有就是富婁 (R. H. Fowler) 最近的有價值的論著了。在這論著中，他顯露了可羨可妬的分析能力和廣闊的思想，而這篇用近今熟知的隱喻法 (mode of metaphor) 所做的論著，正可以拿來作爲一個徵候，說牠所論及的宇宙之開創者必定是一個統計學者哩。

而人們需要提及路塞伏 (Rutherford) 本人了，他在這裏是和唐孫得 (Townsend) 及麥奈蘭 (McLennan) 同時代的，在二十五年前曾經用他的實驗的推斷把歷史的原子論 (historical

atomic theory) 之內含摘要地支解過，而此後他就受到處罰，以擔當較近於心之需求的事物之一新體系的艱難困苦的構造來補償了。而且，這一問題現今已變成惹人注目的了，其精確即使較之刻卜勒 (Kepler) 所做過的還遠遠超過哩，這是在阿斯登 (Astun) 的手中造成的，他追縱着并且改正着他的先生 J. J. 湯姆孫的結果，已經掘進了化學構造 (chemical structure) 之最原始的根源，顯露了種種驚人的單純性 (simplicities)，而對於這些單純性之必要的解說，我們之中有許多人是難期有那樣的長命來看到的。而且還不祇此呢，在這裏，人們也需要一說『超光學』 (Ultra-optics) 這一門新的應用科學吧。這門科學是由 W. L. 和 W. H. 兩位布納格 (Bragg) 先生來發展和培育而成的，但操持實驗的則是席格巴音 (Siegbahn)，向新方向發展的則為代拜 (Debye) 和他的夥伴。這科學把晶體的內部構成 (internal arrangement) 以及比較有規則的種種分子之構造都顯示了；而且，牠也已經把艱苦地重造結晶學 (crystallography)，以及在那門似乎無止境的科學之中的理論與技巧之發展，都擔到牠的創造者們的肩上了。還有熱游子現象 (thermionic phenomena)，雖則突發出來僅只幾年的功夫，但現在也已成爲精密的一個部門

了，專心研究牠的有李卻特孫 (Richardson)，他是受有真空技術 (vacuum technique) 之幫助的，不過在早期的不穩定階段，牠也幾乎由夫麗明和他的夥伴們把牠轉向到絕對不可思議的技巧方面去過哩。

這裏，人們又會想起最近邁克爾孫 (Michelson) 和羅倫茨的喪逝了。他們的實驗的和創造的天才之遠大的活動在時間上是可以回溯而與馬克士威的種種密切地連結起來的。

這一切範圍的活動，又要歸結於大部分從馬克士威天才裏流出來的一種純理智的領導，和他的觀念後來從赫芝的觀測得到的實驗的衝動了。赫芝很知道怎樣辯認一切在他周圍的電波，他是一位理論家，他是曉得他所期待的是什麼，而且能給偶然得到的觀測結果以一種適合的解釋，而促發其更深一層的研究的。

關於這些論題，沒有一個，在最近今的這些日子中——或者有一部分時候，由企圖綜合那非常之廣泛的計劃之種種興味而起的惶惑是可以覺知的吧——我是敢於拿來引起你們注意的。

不過，這種惱人的，衆多的，引向物理化學之源 (physico-chemical origins) 的，種種不期而出現的和自相矛盾的路線有一天合在一起了，那麼在人類的視官之前，一種廣泛的綜合 (synthesis) 就要清晰地現出來了。

現在要簡單地述說一個與現今可作的活動離得不很遠的論點；那就是有些使人麻煩的事物之歷史了。這些爲難的事是在歷史的物理科學之基本而大部分仍然必不可缺的概念——尤其是其中現今雖顯然是幼稚的，而仍須置之於知識所深切地達到的地步之列的一羣——之最初的決定上出現的。人比他所完成的思想終較偉大，因而他的種種經程也就同樣值得來研究了。假如近代的發展是立基於馬克士威，乃至W. 湯姆孫和赫爾姆霍斯以及其他巨人之心靈活動 (mental activity) 上的話，那麼，馬克士威和湯姆孫更番地和法拉第起過交互作用，而成爲他的註釋者，正和他好多年地依照他的眼光研究過并且修正過安培 (Ampère) 一樣。那是早在一八二一年，奧斯特 (Oersted) 和安培後一年，電動機 (electromotor) 就出生了：牠是以法拉第所謂持續不變的電磁轉動 (sustained electromagnetic rotation) 之簡單而美麗的形式表現出來

的。爲什麼沒人想到牠必定是一具可逆機關 (reversible engine)，牠也能反過來從供給牠的能  
力上發出電流，這就是一個問題了。這問題正說明了從現今雖是最基本的而當時尚在未發展之  
狀態中的種種物理概念上所能生出的制限 (limitations)；雖然噶爾諾 (Carnot) 特別着重  
於可逆循環手續 (cyclic reversible operation)，在那些多產的時日之中三年之內就告成了。  
法拉第活動的私人紀錄，他自己從那些給他的實驗的研究一書第二卷準備的資料中仔細地預  
備出來的，生出了一個繼續努力十年的觀念，在他能在最近受到紀念的一天（一八三一年）說  
明了實際的應電流 (induced current) 之前。在安培之初步的精細地探討之後，接着就有了中間  
介質 (intervening medium) 之電張狀態，假設的應力狀態 (state of stress) 之假設，後來又由  
馬克士威把牠發展到中止的數學精確地步，而在一八三一年登峯造極，成了感應定律 (law of  
induction)，這其間的速度正確地證明了法拉第在那整個的十年中透澈地熟悉了物理的相  
互作用之種種適當的新觀念，而這也許是僥倖由數學的需要引起的。

不過，假使現今易於認知馬克士威是一位主要的先鋒，一面又是湯姆孫學派中的一名門徒，從他那裏，近代的實驗電學和光學中之大部分的進步知識纔有其根源的話，那麼就另有一更較根本而更為緻密的思想領域，在他的發展上他是留下過一個不可磨滅的聲名的，雖然這一次他倒毋寧是一隊多少帶點試驗性質的合作者中之一員。在這裏他是要被認為和那些引導一門抽象的一般的能之科學 (science of energy) 的進化的巨人們有關聯的。他們就是噶爾諾、焦耳、邁歐 (Mayer)、瓦透斯登、W. 湯姆孫、克勞休司、赫爾姆霍斯、波爾茲曼、越拉德吉不斯 (Willard Gibbs) 再可以加上工程師郎肯 (Rankine) 和克拉披倫 (Clapeyron) 和 J. 湯姆孫 以及克希荷夫 (Kirchhoff) 和雷萊這些人了；他們最後都是站在法蘭西的實驗學派 (French Experimental School) 的立場之上的。這一派發現過氣體之種種的基本的熱的性質 (thermal properties) 並且提供過材料組成亞佛加德羅 (Avogadro) 和安培的，而事實上就是近代分子化學 (molecular chemistry) 的種種觀念。這種種觀念之流在人心，以及在時機成熟的時候常常獨立在各個不同的心中發生起來的方式實在應該是與有力的 (instructive) 而且在作為一種方法的

鍛鍊上是值得嚴密研究的；比較永不得決定和困難的只是大師們的這些觀念所歸着於其上的種種問題，而這之中較大的又該是因此而引出的利益了，特別是在飛逝的時間把那些能妨礙同時代的活動，然而在科學的同志中並不假定其能長存的種種個人的和地方的偏好（preferences）和爭論趕走了的時候。對於歷史的不重視，或許任在科學那一部門中，總沒有在物理學中來得厲害吧。而這話呢，對於我們要來討論的因為最普通而也最不可捉摸的幾章，是尤其適用的。

不過在繼續講下去之前，我們可以來談談漢密爾敦改造的，近今正是百年的動力學對於馬克士威的魔力吧——這不是因為甲可比（Jacobi）會把牠展開成一種微分方程的抽象的場論，而是因為牠是某同一體系中之一羣狀態的疏遠關係（distant relations）之經由拉格蘭治變異（Lagrangian Variation）的一種連繫（connection）的緣故，疏遠的關係經由一個特性的函數（characteristic function）而確定了，牠在實際應用上的功效，漢密爾敦是很滿足的。馬克士威在光學的體系中之美妙的發展正說明了這一點興味也證明了他在物理的活動範圍之對稱的幾何 || 代數之分析（geometrico-algebraic analysis）中的熟練，那對於他似乎已經容易了，



不過，可以驚異的是他在他的短短的生涯中爲了牠竟也花去很多的時間，而那是在休養中或者在格老雁（Galloway）的獨居中費去的。（註二）

在拉格蘭治的名著分析力學（*Mécanique Analytique*）中，動力的科學（*dynamical science*）就已經取過一種抽象學科的形式，使能以自行嚴密發展後，再和那些提示牠的世界現象比較，來看牠的假設的理論之並走得如何遠近了。牠的種種根基是能够改正，來增進這種合致性的；牠們能完全伸展到那些出乎能以直接與經驗相對的範圍之外的種種範圍中去，或者完全能用人類的官能來摹想，而因此呢，就展開了許多新科學的根原，照馬克士威的口氣，引起了「世界中還未生過的新穎的勝利。」就例如相對運動（*relative motion*）的理論吧，牠是由拉格蘭治從代數的抽象性中發展出來，而再與種種現象比較過的；因而就開引（*initiating*）了有關於參考間架（*frame of reference*）的不變量（*invariance*）之重要；而達到赫爾姆霍斯利（*Helmholtz-Lie*）的位移羣論（*theory of groups of displacements*）。「我所陳述於彼處之方法，并不要求幾何學或機械學之理想，其所要求者，僅在代數之運算而已；且此運算必走入一有規則及一

致的步驟也。』

在一八六五年的偉大的集中的電學報告文中，應用拉格蘭治創成的代數的動力的理論於種種關係尚有一部分未被發現的現象之探索上的，除開早在三十年前漢密爾敦曾經受他從光線 (optical rays) 和影 (image) 上引出的類推之吸引而被迫用過之外，無論如何，最早應用牠的要算馬克士威了；不過有系統的闡明，指出其在變動作用 (varying action) 上之一基礎的，則是幾年之後（一八六七年）由湯姆孫和太特弄出來的，在這之中含有對於應用柯太施基本的光學的視距定理 (theorem of apparent distance)，能在那條射線或者軌道 (orbits) 的範圍之中能駕御一切單純關係的那條定理的主張，也有在流體力學 (hydrodynamics) 上之驚人的種種應用，而那些在較為嚴格的公式化之下是變成了牠在航海和航空方面之應用的要點了。

熱力學這一門科學是在一八二四年以一種對於流行的觀念太新奇的形式充分地形成，而當時即獲得承認的，牠是從前世紀特出的科學天才噶爾諾的頭腦裏出來的。噶爾諾在他的短短

孤立的生涯上很可以使人聯想到巴斯噶 (Pascal)，不過在那適於他服役軍事工程師而在巴斯噶以及伽利略和托里拆利身上也有的那種實踐的氣質上，他和許多比較抽象的智者很不相同，他的名也和他的同時代者如阿拜耳 (Abel) 和蓋路斯 (Galois) 一樣是未完成的。然而他所自然地開闢出來的廣闊的題目，在牠的主要的觀念方面，是不能成爲一種進步的科學的，除非有了一個基本的物質理論，在其上熱性 (the nature of heat) 之原始的未成熟的概念，否則在任意意義上都是深遠的概念，能取得多少有定的形式以後；而那是僅有在氣體動力論定式化 (formulation) 了之後纔能十分精密地達到的。然則是誰合理地把這一基礎弄穩固的呢？在這裏，即使在大部分的，自然之構成的解釋上較多，其發展的過程也永遠是有趣的，一件真實的「由幻覺而真理的進步」(progress through illusion to the truth) (註三) 哩。即或拿來試驗的已經標準的原料了，試驗的結果也仍然能顯露出極其複雜多樣的，似真而常不一致的，向問題接近之路來。這一個領域的錯綜的歷史實在是還沒有精細地探索過的；而要來說——那許是我最後效力的機會吧——自認把一生的時間用來注意一種從不會和爭論脫離過，而馬克士威的思

想在牠後來定式化的階段上擔承過重要任務的那種科學的發展，這也許還不出乎本分吧。試驗性的 (tentative)，最近的種種擴展是把牠們自身放在由近代原子試驗之較廣的範圍和勢力展開出來的許多新種類之現象上的，牠們也并未把歷史上的熱力學註銷；牠們只是把牠的範圍限制在十分凝結的，這些大部分在極高和極低溫度之下纔顯出重要，因而大部分超乎人類直接經驗的現象在其中是可以不顧的領域之中罷了。然而，從許多權威的說明之逐一的比較上，這樣的結論實在還是難以避免的——最後可信的較廣的交互作用的方式確還沒有達到哩。

〔這一篇論文餘下的部分，大部分是對於從噶爾諾和焦耳以來，與馬克士威關聯過的熱力學和氣體動力論之歷史根源的研討，因為展開得太長了，不適用於這一冊書的緣故，將另行刊佈。〕

(註一) 馬克士威也同樣做過一種以太的臨時模型，不過後來被人勝過了，在愷爾文 (Kelvin) 因主張牠們的需要而與同伴分離的時候。

(註二) 在流體力學中，馬克士威也曾經和渦旋理論家 (vortex theorists) 之一個有力的學派發生過密切的關係。

那學派中包括的，在赫爾姆霍斯和克希荷夫這兩位先鋒之後，在愷爾文領導之下的有J. J. 湯姆孫、蘭布（Lamb）、希克斯（W. M. Hicks）、勒夫（Love）、不銳安（Bryan）諸人把那發源於峻削的翼面之後邊的狹片中之渦流平靜下來——在較近的追蹤赫爾姆霍斯和愷爾文的蘭凱斯透（Lanchester）的種種觀念之後——使成爲一種穩定的空氣運動，和那在氣翼（air-wing）兩端現出的連續不斷的一羣渦旋環（vortex rings）連合起來環流在氣翼的周遭，這現今在航空工程學中已經成爲熟知的事了。

（註三）這是阿保特博士（Dr. E. A. Abbott）在筆者肄業大學時代在大學裏開的黑爾心講座（Hulsean Lectures）之一組的題目。博士在一個長而孤獨的生涯中是神學家、語言學者，也是教育家。假使記得不錯的話，馬克士威教授是常常隨從他的。

（附註）本文原題爲 The Scientific Environment of Clerk Maxwell，作者爲 Sir Joseph Larmor——譯者。

## 馬克士威的方法（詹斯）

肯拜耳和加奈特在他們的馬克士威生平一書中，一開頭就把他描寫作是：「一個增潤了牛頓之遺產和奠定了法拉第之勞作的人——一個推進劍橋的心靈向着一條真實研究之新道程的人。」

他們說，就因為這個緣故，他「在人類的記憶中，纔顯明地獲得了他的地位。」馬克士威的聲譽實是與日並增的，以致處在今日的我們要訴述他的令名就得用更較高級的辭語了。無疑地他在我們的記憶中由於他之適當地追踪了些偉大的前賢已經獲得了一個地位了，但他之獲得更較高級的地位呢，則由於他展開了一個新的科學的境地。電磁學在他的手中首先變成了一個數學底地確實的科學，而對於物理學的其他諸大部門，也正可以用同樣的話說。在他那一輩中，他又是以能於看穿現象之表層聞名的——他看到的即或不是作為基礎的「實在」的確最低限度

也是「實在」極其深刻地置放下來的實感罷。

他的重大的科學工作開始於前世紀中葉，當時正是科學進步之快，在前除開兩個時期以外幾乎從未之有的時候。那兩個時期就是伽利略和牛頓相應地生活着的時候，都是短得僅有很少的幾年功夫的。

那時的科學有牠自身的顯明的特性。牠的主要的對象是發掘自然界的種種事實，而目的只在把牠們能立即應用起來；牠是工業革命期的科學，在一八五一年的大博覽會（Great Exhibition）中是得過尊崇的。密凱爾·法拉第，那一位我們剛紀念過的人，具體地表現了那時代的科學精神，我們若以法拉第作背景，而來把馬克士威對於科學的些貢獻觀照一下，這就更看清牠們的特殊性了。

法拉第無論如何總只是一個試驗家（experimenter）；丁鐸爾（Tyndall）說過他：「一個實驗做好了，能使他幾乎快樂得跳舞起來。」他的科學研究的範圍是廣闊的，雖然他起初是一個化學家，而終身心目中也總存着是一個化學家的念頭。而在另一方面呢，馬克士威的科學生涯則

開始於有規則之固體的研究，以及在愛丁堡皇家學會宣讀關於平面曲線的論文，在他還是一個孩子的時候。這兩種興味，性質都是純粹抽象的。真的，他又用些科學的玩具給他自己娛樂過，也帶過好些實驗的零碎東西跟他到劍橋來。他在做他的第一篇數學論文的時候，他曾以一個甲蟲作工具做了些銅印，而大吃一驚地發現了死甲蟲不是電的良好導體。在他比較發育完成的幾年中，我們可以見到他津津有味地注意着死貓皮對於活狗皮是正電性的 (electropositive)，而再想着，假如這兩種動物都是活的，把牠們的皮放在一起摩擦起來，又該有怎樣的結果。然而，要因此而認為他對於實驗法會發生過任何較深的興味，他曾顯示過任何卓異的技巧作爲一個試驗家，那在我是不以爲然的。在實驗對於他是一種娛樂的時候，牠們僅僅是爲數學研討預備的芻秣罷了；他心知別人儘可把牠們做成，把那些常常對於成功的實驗家毫無過度延滯地增殖起來的產物收穫到的。

因此，馬克士威就不會像法拉第「改變文明面目」過至少不會把牠即刻改變，或者改變得極其一目了然。對法拉第儘可說，「我們的日常生活中充滿了種種的事物，那都是他勞作的結果；



我們每每可以見到些證明，證明他的駭博的想像力。」但對馬克士威的生平，這就不大說得過去了。

法拉第是一個試驗家，他用了他的明快的直覺和至高無上的才能，開發了自然界中那些接近我們手頭的階層（*Strata*）；馬克士威則是一個理論家，他用了他的明快的直覺和至高無上的才能給較深的些階層掘發了，在那些階層之中許多上層的現象都有其根源所在。

法拉第發現了自然界的事實；馬克士威則拿起已知的事實來，給牠配上理論的骨架，并賦予牠以精確（*Precision*），使牠的應用能以無限地擴大。正因為這種工作太深刻了，所以要過了一個長時間，牠的應用纔能顯之於世。假使要說個例子，我們可以舉出馬克士威的電磁論，以及隱含在這理論中的電磁波來。這些波，差不多在他的理論發表之後經過了四分之一個世紀那樣長的時間，纔在實驗室中被找出來，再又過了四分之一個世紀，牠們在人們的日常生活中纔獲得了牠們的位置。在牠們例示了：在播種期與收穫之間，在純粹的科學研究與其功利的應用之間，所必不可免的時程（*time lag*）之中，牠們同時也提供了一個更加顯然的例子，證示了純粹科學研究的價

值之如何偉大——即或那常是一種過時的價值 (deferred value)——儘管着手研究的時候人們爲的只是純粹科學的本身，而除開想了解大自然的最內在的作爲這一點外，別無其他的動機。

數學家常分成兩種多少還算清楚的典型。一種人把數學主要地當作符號的處理看待；假使這些符號被處理得合乎傳統的規則而無錯誤，結果，正確的答案就得出了。對於這一派人，所謂中介步驟 (intervening steps) 是毫無實際意義的——公式的變換以及方程式的解答與物理觀念全無連繫；牠們只不過是些到達一種數學目的的數學的步驟而已。

今日的數學物理學家是必然歸屬於這一派的；他所用的種種符號，大部分都沒把物理的意義帶進他的心中；他儘管能憑藉一個符號的活動把原子界的全部進程都給解釋了并且預示了——如虛路定荷波動力學 (Wave-Mechanics) 中的  $\psi$ ——他可不能把  $\psi$  在物理學中有什麼意義告訴我們；而我個人呢，就很懷疑他將來終能做到這一步咧。

在第二派方面呢，解析中每一個數學的步驟都富有物理的意義；每一個符號都是活生生的，

在數學家的心中呈現出一個清晰的物理的概念來。即或那個符號在大自然中找不到任何一種存在的事物和牠相應，這話也還是不錯的。磁有向勢 (Magnetic Vector-potential) 就是一個顯然的例子，那在馬克士威是把牠想像作是法拉第的「電張狀態」之強度的量度的。他說這個有向勢的各個構成部分 (components) 是「電張函數」 (Electrotonic Functions) 或「電張強度之諸構成分子」。

馬克士威是自然而然的，而且滿心地歸屬於這第二派的。他的數學的觀念從最初的一瞬起就不僅為一種強盛的「物理的實在」之感覺所引導，而且也為它所制馭了。何潑金斯是他在劍橋的導師，他在描寫他的時候，說了「在我的經驗之全程中，毫無懷惑的，是我所遇到的最傑出的一人」這話之後，接着就說，「在馬克士威，要他不正確地想到物理的題目，那似乎是不可能的；雖然，在他的解析中，他是很有缺點的。」他心靈的這種性質，最明顯的例子，或許可以從他第一次給與氣體動力論的貢獻中找出來，那一門學問，馬克士威後來竟使牠成為他自己所特有的哩。物性 (properties of matter) 可以藉物之最根本的，不可見的質點之急速運動 (rapid motion)

來解明這觀念最低限度也得和琉克埋細阿 (Lucretius) 一般地老了。在較近的時代中，把氣體認爲是由成陣的急速運動着的質點組成的，而藉此，氣體的許多性質纔可以解釋明白，這也有好幾個物理學家，包括柏努利 (Bernoulli)、克勞休司和焦耳，證明過了。不過，他們心目中的種種質點還都是以相等的速度運動着的。直到馬克士威，他纔不僅看到一個質點的速度在牠碰到另一個質點的時候每次皆需乎改變，在任何場合中這是顯而易見的；他更看到了只有承認各種不同的質點各有其不同的速度，纔能得到一種更遠一層的，確實的進步。這樣一來，給造成一種氣體的不同質點不同的質點的速度找出一個數學公式來，那倒成爲絕對根本而重要的一件事了。馬克士威通過了一系列的論證——那些對於分子，或者對於牠們的運動的動力學，或者對於邏輯，甚或對於一般常識都似乎全屬無關的論證，得到了一個公式，那公式如依照一切的成例以及科學的哲學之一切規例說，應該是毫無希望地錯了的。事實上後來牠到被證明了是完全不錯的，而至今還被稱爲馬克士威定律哩。

也就是這一種深刻的物理的直覺力，配上了够用的雖則不是特出的數學技巧，給馬克士威

的偉大奠下了基礎。他也具有一種活潑的物理的想像力，但這要比起他加諸其上的謹嚴的運用功夫來，或許反而不大值得注意了。他從不讓牠跟他跑開去。儘管他在他的心眼 (mind's eye) 中把種種物理的概念看得如何清楚，他可從不曾把牠們和最根本的物理的實在錯認為「同一」。他對於事物看得也很深切，但并不就把他所看到的想作是一切的基層 (ultimate stratum) —— 最後的而且是絕對真實的。七十年代的每一個泛泛的科學家，我想，他們都會毫不遲疑地堅持着，主張光的本性終究是一種以太介質的波動。現在我們且來聽馬克士威自己的話：

光在由一種介質過到另一種介質的時候，牠所遭受的方向的改變 (change of direction) 和一個質點在動着穿過一條狹窄的，而其中有巨力作用着的空間的時候所遭到的徑路的偏斜 (deviations of the path) 二者正是一回事。這一類比早就被信作是光之折射的正確解釋；而我們在解答某種問題上現在也還覺得它是有用的，在解答中我們儘可毫無危險地用它作為一種人造的方法。另一個類比是介於光和彈性介質的振動之間的，那就引伸得更遠了，不過，雖則它的重要和成熟不能夠過分地估量，我們也得回想一下，它的根據只是光和振動二者定律之間形式上的類似而已。

這聽來幾乎像是近代波動力學的一篇講義——而且也是很好的一篇講義的摘要哩。

他既從不把他的物理的肖像 (physical pictures) 和「實在」認爲是一回事，因而他自己就得以自由在地，爲便利和顯明起見，把一個「肖像」拋掉，再採用另一個「肖像」了。他曾經用了下面的話形容過他的進行辦法：

假使我們採納了一種物理的假設 (physical hypothesis)，我們就只有通過一種介質纔看到現象了，而我們對於事實，也就易陷於盲昧，對於由一種片面的解釋所促成的假定也就易陷於輕易從事之譏了。所以我們必得發現一些研究的方法，讓心在每一步都能把握住一個清晰的物理概念，而不受在那個概念所由出的物理科學之上建立起來的任何學說所束縛纔行。

法拉第努力過，把靜電力 (electrostatic forces) 形容作是彈性介質中沿力線跑着的應力；馬克士威希望把法拉第的觀念變得能順從精密的數學的處理，就展開了我們現今稱做的「流體動力類比」 (hydro-dynamical analogy) 來，又如下地論證了他的步驟：

把一切事物都歸着於一種理想流體之運動的純粹幾何的觀念，我希望由此來達到一般和精確，並避免種種山一個早熟的自以為能解釋許多現象之原因的理論所引起的危險。假使我所想過的單純推論的結果，對於實驗主義的哲學家，在編列和解說他們所得的結果時，有點兒用處，牠們是會適合於他們用的，而一種成熟的理論呢，其中物理的事實得物理底地解釋，這就要那些願意向大自然家本身究問，而由此來得到那些由數學理論所引起的問題之唯一真確的解答的人來造成了。

這種哲學的精神，差不多正在馬克士威逝世的時候，就把科學離棄了，這是十九世紀科學的大不幸。其結果，有許多大科學家就把他們所確知的一件事情宣稱爲『傳光以太的實在和體現』(the reality and substantiality of the luminiferous ether)，而又鄭重地算出牠的密度必百萬倍於鉛之密度了。馬克士威原是能够構成現象之許多最不可能之描繪的，不過等從牠們那裏習知所要知道的一切以後，於是在牠們是以爲他的進一步的發展之妨礙之先，就立即把牠們拋開了，而他的些後輩呢，要是同樣地構成了不可能的種種描繪，這就進一步鄭重地對着一個奇異世界宣稱牠們就是些科學的實在了。

在這時，能完全用確實的數學來處理的唯一科學，照今一般的科學意見，無論怎樣，總是天文學。牛頓的萬有引力定律，已被信認是確實的了，太陽和諸行星也都能當作質點來研究，達到差不多完全的近似值了。於是，至少在理論方面，要差不多極精確地來預告行星的運動，應該是已經可能的了。

另一方面，在物理科學中，也有引進點單純化的假設之必要了，這些假設，可好可壞，但無論如何總不相信牠是最完善的。因此，用數學來處置物理問題多不過是一步接近 (approximation)，而且常常足夠是一步十分不好的接近了。最顯明的一個例子就是數學的彈性固體論。那在馬克士威是曾經想改善過的，但得到的也只是一個平平的成績。

在馬克士威轉向光之電磁論的時候，他就藉一種介質來把牠描畫出來了；這介質的種種性質是能完全藉一個單純的數學常數列舉出來的。他看到，假使這個常數值一經發現了，那就應該可以用完善的數學精確性，預示光論中之一切現象了。馬克士威並且證明了，這裏的常數應該只是電之電磁單位和靜電單位 (electromagnetic and electrostatic units) 之比率，而他第一次



的計算也就暗示了，這個數實際上就等於那種量度光速的介質之常數。

第一次說到這個大發現是在一封信中，那是他在一八六一年十月十九日寫給法拉第的：

我假定一個球體的彈性施反作用於其四周的電質 (electrical matter) 上，並且把牠壓下去。於是我就從何爾勞許 (Kohlrausch) 和韋不歐 (Weber) 兩氏所測定的關於電之靜力效應與磁效應之間的數直關係出發，測定了空氣中介質的彈性；再假定牠和傳以太一樣之後，我就測得了橫振動 (transverse vibration) 之傳播速度了。

結果是每秒一九三、〇八八哩。以前菲左 (Fizeau) 用直接實驗測定的光速，則為每秒一九三、一一八哩。

當時的情勢，在其超凡的程度上，是可以和牛頓拿月球距離的計算來首先試驗他的萬有引力定律時的那偉大的一刹那相比擬的。牛頓由於一個偶然的不幸，用了一個不精確的數值做地球的直徑，結果因為數值相差太遠了，使他把他的理論放棄了差不多有二十年功夫。馬克士威碰到的機會正相反；上面引出的二數相差是有限的，每秒鐘只差了三十二哩，雖則怪得很，兩者都是錯誤到每秒鐘差了六〇〇〇哩以上的。在馬克士威刊佈他的論文『電磁場之動力論』(A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field) 之前，

mental Theory of the Electromagnetic Field) 那一篇他從不曾做過的最重要而最成功的論文時，他把這兩個速度都用每秒千米 (kilometer per second) 來表示了，結果顯然這兩數一致的程度是沒有他先前假定的那樣好了。柯爾勞許和韋不歐測定的兩種單位的比率（每秒三一〇、七四〇、〇〇〇呎）和馬克士威在信中寫的數值是差不多極其相合的，但菲左的光速（每秒三一四、八五八、〇〇〇呎）那就沒有一處和他所引的數字相近了。好的是他似乎已經覺知所知的光速是并不完全精確的，這使他自己不會像牛頓一樣，因了數值的一個大不合，而沮喪起來。

在光之電磁論以後，馬克士威的最重要而最著名的勞作則是氣體動力論。他在這裏用以開始工作的，還是一個完全有定的描畫——無數的堅硬而具有完全彈性的小球體，牠們僅在衝擊 (colliding) 的時候纔互相作用；他也仔細地解釋了他的模型也只是暫時的——假使由牠推得的結果和實驗不合，那是可以立即放棄的。起初，牠確是極其成功，而馬克士威是能藉助於衝擊分子 (colliding molecules) 之自由徑路 (free path) 把氣體的黏性和滲透以及牠們的導熱

(conduction of heat) 解釋明白的。但照我們現今所了解的道理說，牠在比熱問題之前可失敗了，而且是非失敗不可的。

馬克士威是用極其謹慎的話說出他的結論的：

我們現在已經遵從數學的彈性固體質點衝擊說 (the mathematical theory of the collisions of hard elastic particles)，并已通過了種種的場合，在那之中似乎是有有一種和許多氣體現象相類之處的……我們證明了如此的一系質點是不能滿足一切氣體的兩種比熱間之已知關係的。

第二年他又在大英協會的牛津大會 (Oxford Meeting) 上宣讀了一篇論文，就是「論柏努利的氣體學說」(On Bernoulli's Theory of Gases)。他先說了他已經在分子衝擊的區域中走過了之後，就以如下的有意義的話結束了他的論文：

但是誰能領我去到那個依然不大顯明而模糊的區域之中呢？那是一個思想在其中已經和事實結婚，——而數學家的

心之活動和分子的物理作用二者的真實關係在其中正可以看到的區域呀。然則到它那裏去的路就不通過玄學家的，那佈滿了先前探險者的遺物而爲每一個科學者所嫌棄的洞穴嗎？

理論與觀測之間的差額表可還沒有完全。馬克士威就已經發現，假使一種氣體的分子是堅硬的彈性球體，其黏性是應該和絕對溫度 (absolute temperature) 的方根成比例的。他拿幾種實際的氣體做了好幾個實驗，那就是他在一八六六年皇家學會席上，在他的拜克銳講演中說到的。他發現了，一種氣體，在牠受熱後，就變得較黏了，這是和他的模型相仿的，不過增加的速率 (rate of increase) 可大於那個由假定氣體爲一羣堅硬的彈性球體而得到的數值了。馬克士威相信他是已經找出了一種實際氣體的黏性是確確實實和絕對溫度成比例的，他也看出了，這應是那種兩分子在其中互依牠們的距離之五乘方的倒數相排斥的一種氣體之性質。於是他就開始了他的工作，用數學來研究這樣一種氣體的種種性質了。由於一個好機會，這一個特殊的定律被證明了特別適於精確的數學研究，而問題就在他的偉大的論文，論氣體動力說 (On the dyna-

mical theory of gases) 中獲得圓滿的解決了，那篇論文是後來在一八六六年中纔出現的。在這裏，我們可以看出馬克士威之令人驚異的物理的直覺力和他的極可重視的數學能力之最高峯了吧。不幸，他也和亞基里斯 (Achilles) 一樣，還留了一個可乘之隙，受人非議，那就是早在十三年前他的劍橋導師已經注意到的——基本的分析和單純的算術了。那是人類的一種非常的過失，在我們之中有許多是願意歡迎它作為我們自己和一個真正的偉大數學家之間的一條連索的，不過呢，它有的只是不幸的結果而已。馬克士威相信一種實際氣體的黏性之與絕對溫度成正比，證明了那是以不完全的算術為根基的，而他從他的這種信仰中得出的結論也就因不完全的代數而有誤了。因而這偉大的研究與其被作為一個紀功碑看，倒不如作為一個方法的典型看為是了。然而，要說牠所達到的結果之好和任何其他的研究在當時所已經能達到的正不相上下，也還未可能哩。因為再過了三分之一個世紀，量子論 (quantum theory) 纔出世，而只有牠，據我們現今知道，是能給我們一個鎖鑰，把馬克士威當時企圖解決的祕密解開來的。

要說馬克士威應該極其完全地做好一件工作，使其毫無增改之餘地，那對於他的方法是不

相應的；他的計劃倒毋寧說是在林蔭中開闢幾條寬闊的路，而把牠們的瑣細的開發工作留給後代去做。這在氣體動力論方面，在光之電磁論方面，以及在他的一般的電學研究方面實在都是如此。然而，對於這一個一般的陳述，也有一個例外。他第一次重要的數學的研究是論土星光環之穩定，而使他在一八五七年獲得了亞丹施獎金的。在這論文中，他證明了土星光環在構造上不能夠是連續的，而一定是由一羣小質點，就是那個大行星的無數的微小月亮構成的。這裏我們差不多纔得到一個僅有的例證，那是馬克士威本人完成了而以極完備的形式留下來的一件勞作。他的結論，三十八年後，在美國天文學家開勒爾（Keeler）得到了景折術的證明，證明了那個光環的最外邊的部分比內面的部分轉得慢些的時候，就得到了觀測的證實了。

僅有科學家自己纔永遠知道他在選擇他的科學路徑時是如何地不大自由吧。一個問題常會引他無可避免地向另一個問題走去，所以就是說一個人生平的勞作在他的第一次科學研究中就已經含有牠的苞芽，那也是儘可能的了。這雖然沒有一定的證據，但許多人總是以爲馬克士威的土星光環之質點的研究，引他直接地而無可避免地進入了氣體動力論的領域中，而使他一

生在其中花了很多的時間。雖然也許在他過橋從天文學到物理學去的時候，他是預期他能永遠成爲一個偉大的數學天文學家的——但是僅僅成爲了一個自牛頓以後世界上最偉大的數學物理學家。

(註)本文原題爲 *Clerk Maxwell's Method* 作者爲 *Sir James Jeans* ——譯者。

## 馬克士威的實驗室（加奈特）

*Magna opera Domini exquisita in omnes Voluntates ejus. (註1)*

這是從拉丁版聖經 (Vulgate) 中引出來的一句，用粗大的字體刻在卡文迪虛實驗室之宏大的橡木門上的；牠完全表示了馬克士威對於他希望他本人和他的學生能在他所設計好的實驗室裏做出來的許多研究工作的態度。雖然有大學指派的建築師耶穌學院 (Jesus College) 碩士馮賽特君 (Mr. W. M. Fawcett) 建築圖樣儘可由他去預備，建築工程也儘可由他去監督，但最初設計的實驗室和牠的設備依然是由馬克士威的心中發生出來的，完全像阿馨奶 (Athene) 從宙士 (Zeus) 的腦中出來一樣咧。

一間磁學室 (Magnetic room) 佔據了這座建築底層的東端，而以許多銅管子來生熱。室內的桌子是由四呎見方的石板架在磚墩上做成的；這些磚墩各各立於一些互無關聯的基礎之上，



穿過地板而并不觸及地板。在這些桌子中，有一個桌子上，放的是大英協會的巨大的力測電流計 (electrodynamometer)，這是和那些用於大英協會標準 (British Association Standards) 之測定上的種種儀器，以及最初的「歐姆」一起兒由大英協會存放在這個實驗室裏的。第二個桌子上放的則是一架克攸式的單線地磁儀 (unifilar magnetometer of the kew pattern)。北壁的高頭有一個窗子，從那裏可以作測定子午線的觀測。第二間房子是鐘室 (clock room) 裏面有一個支持主鐘 (principal clock) 用的石墩，和一個懸掛試驗用擺 (pendulum) 的石架，二者的基礎都是和地板不生關係的。坡印亭後來就用過這架子，以一種改良的形式，重把「卡文迪虛的實驗」做過一遍。

和鐘室相連的是天秤室 (balance room)，光線來自北方，於是接着就是熱學室 (heat room)，裏面放着馬克士威的空氣黏性測定器；空氣黏性測定就是一八六六年拜克銳講演的題目。電池室 (battery room) 裏備有一組威廉湯姆孫式的丹品爾電池，它的盤子約二呎見方，並且鍍了一層鉛，盤內鋅板支持在一吋立方的一個瓷塊上，每一個電池的電阻為  $0.16$  歐姆。另外再有一

間小的工作室 (workshop)，底層這就完了；這一間工作室可以說是工程試驗室 (engineering laboratory) 和劍橋儀器公司 (Cambridge Instrument Company) 建設的先趨。

這一座建築裏的全部工作檯 (working tables) 都是和地板不相關連的。地板上留下些洞來，而橫柱則支持於底下房間裏牆壁上的托架之上。在這些橫柱之上，又釘起許多的木砧，一頭和地板齊平，但并不碰到地板，桌腿就是支持在這些木砧之上的。同時，在這一所實驗室裏，每一個窗子的窗臺又都是石頭做成的，裏外都是如此，而且裏外齊平，這使儀器可以一部分放在窗內，一部分放在窗外。在西邊的牆上，二樓，正對着走廊的地方，開了一個小窗，放着一架追日鏡 (helio-stat)，從那裏可以無阻擋地送出一柱光，全長一二〇呎，正是這實驗室的全長。第一層和第二層樓板上，又開了無數的小孔，使那從屋頂掛下來的長線得達於底層。

二樓上是普通實驗室 (general laboratory)，六十呎長，三十呎寬；教授私人研究室 (professor's private room) 裏面有架象限靜電計 (quadrant electrometer)，放在一角上的一個架子上；儀器室 (apparatus room) 裏面置有玻璃櫥，放着好些具有歷史價值的儀器；預備室 (pre-

paration room)和一個容得一百八十个學生的大講堂(lecture theatre)。

三樓上是一間聲學實驗室，一間畫圖房(drawing office)，一間輻射熱室(room for radiant heat)和兩間光學實驗室，這旁邊又有一間黑房(dark room)，裏面的牆全是黑色的。正在儀器室上面的是一大間高壓電氣(high tension electricity)實驗室。這間房子裏備有一架特殊的儀器，用來乾燥空氣，又有一個窗子，和大講堂交通，離講堂的地板十七呎高。假使講堂內的空氣太溼，不能在那裏用玻璃機械(glass machine)發生高壓電時，那麼，引線(leads)就可以通過這個窗子拉到講臺上來，供給高壓電了。樓梯間(staircase)一角的地板上和梯頂留着的空子，放着一架本生抽水機(Bunsen water pump)和一隻高過五十呎的水銀筒(mercury gauge)。

假如我們要問馬克士威爲何預期這個實驗室有用，那最好讓馬克士威本人來說明。

馬克士威在一八七一年三月十五日給雷萊勳爵的一封信上寫着：

假使我們太成功了，而破壞了青年的心靈，等到他們觀察到振動和偏轉(deflection)，而不成爲甲等數學優等生，反成

乙等或丙等數學優等生(senior optimes)那麼，我們就要自招整個大學和全體家長的反對了。

但在他公開發表的言辭裏，他倒沒有表示過，恐怕這實驗室會激起大學當局們或者家長們的反對。他在一八七一年十月的就職講演裏，他就把「示範實驗」(experiments of illustration)和「研究實驗」(experiments of research)分別了。對於前者，他說：

目的只在把一些現象呈現於學生的感官之前，使他可以把他和相當的科學觀念連結起來罷了。在他一經把握了這個觀念之後，用以說明牠的實驗也就已經達到牠的目的了。

對於後者：

在嚴密地稱爲實驗的研究中，最根本的目標總是量度我們所已經見到的些東西——獲得某些量的一個數值估計 (numerical estimate)。

這一類的實驗就是一所物理實驗室裏的正常工作。在每一個實驗中，我們首先要使我們的感官和那些現象熟識；但我們一定不能就停在這裏，我們必得再在牠的種種特徵中找出那些能以量度的來，並且也要尋出來需要何種量度，纔能對於這些現象得到一個完全的說明。於是我們又得去做這些量度的工作，而從這些量度中把我們需要找尋的結果推出來了。

近代實驗的這一特點——牠們主要的是成於量度——是很顯著的，這主張似乎已得到全世界的同情，以致在很少的幾年功夫中，一切重要的物理常數就行將大略地估計好，而後此留給從事科學的人們做的就惟有把這些量度再推進一步，帶到下一個小數位了。

假使我們正向之接近的事物的情形確是如此，我們的實驗室在作爲一個良心的勞動和至高的技巧的地方上，那就或許可以頌揚了，不過牠在大學裏倒要失去地位，而寧該躋於我國其他大工廠之林了，因爲在那裏「相等的能力」(equal ability)是向着較爲有用的目的去的。

然而我們可沒有權利就想到那些無可稽考的創造的財富，或者這些財富繼續地注進去的那些純潔的心之未經開發的豐饒……一部科學史證明了，即使在她的進步達到使她自身專力於她所早經熟知的那些量的數字量度之準確度(accuracy)的改進那樣的時期，她也是在預備着材料，以便征服新區域的；那些區域，假使她對於她的早先的開路先鋒們的粗糙的方法已經滿足了，那仍然是不會知道的。我一定要把那些從科學的各部門裏集合起來的事例拿向前來，證明精細的量度如何獲得了代價，報答它的就是新研究領域的發現，和新科學觀念的發展。

在實驗室中，我們的主要工作應該是使我們自己和各種科學方法相熟，拿牠們來比較以及估計牠們的價值。我想這將成爲我們大學裏的一種有價值的成績，而且在這裏的成就也好像要比在任何私家實驗室裏來得多點，假使能充分地而且自由地討論各種不同的科學手續間之相對價值，使我們終於形成一派科學批評，並且幫忙發展了方法論 (doctrine of methods) 的話。

馬克士威爲着遵守他曾經宣告的原則，他就不會企圖過把大班的大學肄業生吸引到這實驗室內，或者他本人的班上來。他的觀念是要使一班研究生在受過一次短期的量度訓練後，各人就可以各自去做一件工作。在最初的兩三年中，到這個實驗室裏來的有一小羣公費研究員和普通研究員 (post-graduates) —— 包括匹銳 (Pirie) W. D. 力芬 克銳斯陶爾 希克斯 夫麗明 格奈慈 不魯克 蕭 (Shaw) 賽特萊 · 泰婁 (Sedley Taylor) 坡印亭 麥克愛力斯透 肖斯透 和 高爾敦 —— 不過馬克士威可也不會輕視過『示範實驗』不久之後，他就鼓勵過他的示範員代那些預備參加自然科學名譽卒業試驗 (natural science tripos) 者和醫科學生開一班課程講演

力學和物理學，並且用這個實驗室內的小工廠製的而且不適於其他目的用的儀器示範給他們看咧。

(註一) 意爲「主之作爲，極其廣大，凡樂之嗜，皆必考察」——譯者。

(附註) 本文原題爲 *Maxwell's Laboratory*，作者爲 *William Garnett*——譯者。

## 對於馬克士威教授的一些回憶（夫麗明）

聽過馬克士威的大學演講之最後一學程，並且在他生存的最後兩年一八七七——七八和一八七八——七九這兩期中，在卡文迪虛實驗室裏研究過的，只有兩三個大學生，而我就是這小班子中的一個，我因此沾光能參加這一位教師，他的特出的天才在他研究過或教過的每一個題目中，都留有其令名的紀念，我是很愉快的。

就是在一八七七年十月中到劍橋的，主要的目的，是在受益於他的演講和實驗室的教導，以及使我自己能達到稍爲了解他的電學研究和著作的地步。

他在一八七三年初次刊行的巨著電磁學通論中，就已經對那些僅在實驗方面和這題目相識的人們，從來夫（Rivo）的論著一樣舊式的書中引發出來，證明了已經發生了一種以法拉第觀念之數學語言的翻譯和擴充爲根據的新方式來處理牠，而我們全都是需要受益的了。



我以為最好還是追本窮源，而試來從馬克士威本人那裏學知一點什麼吧。

在一八七七年的前幾個月中，我曾得到過一張通行證，出入於聖約翰學院 (St. John's College) 裏的科學展覽會 (Science Exhibition)，而在跨過小試驗 (Little-go) 的門限之後，我在一八七八年四旬齋期 (Lent term) 一開始的時候就開始聽馬克士威的講演了。他在向僅有兩三名學生，而不是向他在任蘇格蘭或德意志的大學裏能得到的百人以上的比較注意的聽衆，演講的許多題目上，任在何處，都是被當作一位活着的權威看待的；在找到了這樣一位教師的時候，我的驚愕之情，我還很記得哩。這原因以後是會了解的。

然而，他雖則僅對兩三個學生演講，他處理的仔細和周到還是和他要對滿堂的人演講的時候，是沒有兩樣的。這也是馬克士威教授的特色吧。

在他一生最後的一年中，他的講座所僅有的兩位聽講者，其一是一位住在聖約翰的美國紳士米得爾登 (Middleton) 先生，另一就是我自己了。

馬克士威在十月的一期中講的是熱力學，而在四旬齋和五月期 (May term) 講的則是電

我仔細地記着筆記，且在每一次聽講之後就把牠們寫出來，並且常加點補充；這些釘好的講演筆記冊子，在我的手裏已經五十二年，現在因路塞伏勳爵的容許是就要寄贈予卡文迪虛實驗室作為馬克士威在他生平最後的兩年中所作的大學演講之紀念品了。

在電學這學程中，他教給我們一個新而有力的方法，應付線形導體 (linear conductor) 的聯結問題。克希荷夫的歐姆定律系論 (circuit laws) 已經提供了一個可以應用於較簡問題之場合的工具，使人能預知每個導體中電流的方向了。然而，那在較為複雜的聯結中還是不可能的。

馬克士威創始了一個新方法，把每一導線中的實際電流 (actual current) 都當作是兩個各在一網中流通，方向相同的理想電流 (imaginary currents) 之差。這樣一來，預知真實電流 (real current) 之方向的困難即行消除。

於是這問題的解決就歸結到一組一次方程式的解決，而在任何導線中的電流就能表示作兩個行列式之商了。

在馬克士威於一八八五年逝世後，我送過一篇論文到倫敦的物理學會 (Physical Society) 中去；在其中我把馬克士威的這一方法更展開了，使能表示任何兩點間之任何網狀電路的電阻。在一八七八年十月中，我請馬克士威教授告訴我，我在卡文迪虛實驗室中該做的實際工作。他就提出了比較為大英協會委員會做的，而意欲代表一歐姆之電阻的許多線圈 (coils)。

這七八個線圈是用各種不同的合金線做成，而在其上標着牠們的電阻確為一歐姆時所需臨着的溫度的事實上，牠們已經全有點改變過了，而呈現出來的問題也只是測定那一個線圈和在那一種溫度之下是最近似真實的大英協會電阻單位而已。在這一研究中，包括的工作，是把任一個放在某已知溫度水內的線圈和一個保有攝氏零度的特殊線圈二者之間的電阻差異測定出來。而取得這種差異的方法，則是由伏斯透教授 (Prof. Carey Foster) 提出，而前此克銳斯陶爾教授在卡文迪虛實驗室中應用過的一種。

因為普通的「電橋」不適用於這一目的之用的緣故，我就設計了一種特殊電阻秤 (resistance balance)，而因為牠在形式上很像一種著名的樂器，馬克士威於是就常把牠叫做「夫麗明的五

絃琴」(Fleming's banjo)了。

研究的結果就畫在一張圖上，成了一羣的曲線，而從這圖上，平均的大英協會單位之最近似真確的數值就可以藉一個置於某一溫度下的特殊線圈把牠決定出來了。至於這一電阻的絕對值，那是後來由雷萊勳爵、肖斯透爵士和格奈慈不魯克爵士三位重新測定過的。得到的結果是：這一絕對值並非一理論歐姆 (theoretical ohm)，即  $10^9$  個 c. g. s. 電阻單位，而是要小百分之  $1.5$ ，即約為  $0.985$  歐姆的。

約在一八七六年那個時候，裴耳 (Bell) 就已經發明並且在英格蘭宣佈了他的談話用電話機。愛迪生 (Edison) 在一八七七年也已經公開了他的「炭鈕」發送機 ("Carbon button" transmitter) 了。一八七八年，許士 (D. F. Hughes) 又發明了微音器 (microphone)，並且向電器工程師們證明了他們前此常不喜歡而盡力避免的導體之「疏接法」 (loose contact) 是很有些顯而易見的有用的性質的。

在一八七八年五月中，馬克士威在評議會大堂 (Senate House) 作了一次關於電話的演

講。那是一次輝煌的演講，充滿了機智，適切的比喻和很多學問的，不過對於非科學的聽衆們，牠實在不是最有力的一次演講，因為牠不大能把電話機運用方式這一觀念傳給他們的緣故。

爽快點說，馬克士威在初等教學上，他所有的學問和創意都太過多了。然而，對於那些能跟蹤他的人，他的教學實在是種令人愉快的事。

他具有廣博的科學歷史的知識，他能用些有效的逸事趣史或辭藻說明許多最簡單的事實。在他的一切的實驗工作中，他也選取最有效而簡單的方法來獲得他的結果。

當我在卡文迪虛研究的時期中，他是把他本人限制於講演，或者在下午來一小時，和那些在那裏進行研究的人閒談閒談的。

在那時，他主要的事是完成編輯和監督印刷亨利卡文迪虛的科學論文稿本這一椿由當時的第逢州公爵交給他手裏辦的工作。卡文迪虛在許多的事中，有一件，就是他曾經十分精確地測定過有些絕緣體，如玻璃、臘、松香等的介質常數，也測定過鐵和水之相對的導電係數 (relative electric conductivities)。

卡文迪虛做這件工作用的還是粗淺的方法，他讓他的身體受電震 (electric shocks) 并且把電路調整得使每次電震之『感』 (feel) 強度相等。馬克士威也就仔細地重複做了卡文迪虛的一切重要的實驗，來確定這種比較 (comparisons) 之可能的程度。

卡文迪虛有一個僕人，叫做李却得 (Richard)，他是常常被叫去受幾次電震，并且要發表他對於牠們之意見的，雖然我們沒有聽說過，他對於這些附帶的義務快樂到如何的程度。

馬克士威同樣地召請了在實驗室中工作的我們之中的幾個來照樣幫忙。我記得，雖則已經模糊了，有一個下午我就這樣地幫他忙過，不過因為隔時已久，究竟我這個『電震計』 (Shock-meter) 精確到如何的地步，那我再不能想起了。

在這方面，許多觀測者之間，無論如何，是總有大差異的，因而馬克士威有一次就用惠斯登電橋 (Wheatstone Bridge) 把幾個人的電阻都一一地測量了，并且還發現了，正和預期的一樣，『船家』 (boating men) 由於他們特殊的手之狀態而具有非常之高的電阻咧。

對於我和其他的人，還有一件可異的事，那就是，馬克士威對於他在他的論文『電磁場之動

力論」，一篇在一八六五年刊在倫敦皇家學會學報中，而可以當作人類心靈的最偉大的產物之一的那篇論文中，理論底地預言過的電磁波之存在，他似乎從不會着想得到任何實驗的證明，這一回事了。

而那無論如何，總是到馬克士威可悼地死了八年之後，在赫芝手裏，纔把這些電磁波在空間裏用實驗造出來，並且證明了如何證驗牠們。

菲次澤刺德 (Fitz Gerald) 前此也曾經提出過，牠們或許可以用來頓瓶的振動放電 (oscillatory discharge) 來產生。洛治 (Sir Oliver Lodge) 在他對於這個题目的研究中也許走得非常之接近於它；而許士，雖然要追溯到一八七八年之前，無疑地也曾經產生過牠們，不過沒有得到清楚的認識；他並且還用了一具金屬屑檢波器 (metallic filings coherer) 來證驗過牠們哩。那麼，馬克士威爲什麼反不會把他的注意轉向到這件事上來，那或許就是因爲他的時間和精神首先要專一地用在寫作他的巨著，其次要用在卡文迪虛實驗室的設計和組織，而再則要把他的時間用在編印卡文迪虛論文集之上的緣故吧。而這第三件事，差不多就佔有了他生平最後

五年的大部分時間哩。

在一八七九年最後的一期中，馬克士威的健康顯然地開始變壞了，不過他仍然把他的演講繼續下去，直到學期終了；在我送給卡文迪虛實驗室的許多筆記本中，有一本就是他生平所作的這一次最後講演筆記。

當他完成了那一次演講的時候，他自己或許還沒覺到，而形成了他的聽衆的兩位學生也實在沒覺出，他已經完成了他對於那一座以他爲無上之光榮的大學所負的最後的義務了。

和馬克士威相熟——即使時間很短——以及有幸聽他口頭的指導，這二者本身就已經是一種高尚的教育（liberal education）了，而且還不僅止於此呢，它也是一種煙士披里純（inspiration），因爲他說過的或者做過的每一件事情都帶着一個天才的明白的特徵，而那正不僅令人不得不來予以最高的崇拜，且也要予以最大的尊敬呀。

（註）本文原題爲 *Some Memories of Professor James Clerk Maxwell* 作者爲 *Sir Ambrose Fleming*——譯者。



## 馬克士威與無線電報（洛治）

在一八六五年，馬克士威就企圖着來同化法拉第關於電場和磁場之相互關係的種種觀念，也就是法拉第的力線概念了。他覺得一個磁場是包圍在一個電流之周遭的，而一個電流，也同等的能包圍在一個磁場之周遭的，事實上，牠們之間的關係是交互的，而且是能藉他後來稱爲「旋度」(curl)的那個觀念把它數學底地表示出來的。在這兩個場共同存在空間中的時候，牠們之間的反應(reaction)能表示做是一個旋度的旋度(the curl of a curl)，而這一點經他簡化了，就成爲著名的波方程式(wave equation)，波之傳播速度是一個電的常數和一個磁的常數之幾何均數(geometric mean)的倒數。這一個速度，有一個時候，他把它叫做一個磁單位中之電單位數，以後就進而計劃能把它測量出來的種種實驗了。他在倫敦皇家學院中做了實驗，得到的結果，有些差不多都近於光速；因而，從那時以後，在他的心中，光也就變成一種電磁的現象了。

在他的許多觀念上，幫了他忙的是一種由想像構成的以太模型，一種有許多轉動的輪子和滑溜的球子的模型；他後來大概因為鑒於牠實際是太複雜了的緣故吧，他就把牠放棄了，轉而讓他的比較抽象的方程式，在他一八七三年的通論中重行產生了的許多方程式來補牠的位。這本通論的刊佈，是由一位純粹數學學家牛津的史密斯(H. J. S. Smith)教授，於那時在布納德伏德(Bradford)開會的大英協會A組，他的主席致辭中，向世界報告和宣佈了的。下面就是從這篇演講辭中引出的一段：

在目前這一年中，一本電學的通論已經由馬克士威教授刊佈了，他把那部分科學的數學理論作了一個全般的檢討，凡是我們從一串著名的人們之辛勞中所得到的，他都提及了，開始是庫倫(Coulomb)，末後是和我們同時代的許多人，連馬克士威教授本人在內這幾卷書，是沒有一個數學家能把牠們全部翻閱之後，而不很快地承認牠們包含一個理論的初稿（而有些比初稿還要多點東西咧）的，這理論已經大部分加進了純粹數學的方法和原料，而且有一天，牠還可以為那個抽象科學服務，且毫不少過天文學給過牠的原惠哩。因為現今的電學，正和舊時的天文學一樣，已經把一組全新的問題放在了數學家的面前，需要產生全新的方法來作牠們的解決了。

我那次是到會的，不久之後，我就有了一個觀念，想把這些電磁波的產生和說明作爲我生平的工作了。一八七八年，我在都柏林 (Dublin) 認識了非次澤刺德，以後，我們就一起兒討論了產生和探察牠們的許多建議或計劃。在一八八三年，非次澤刺德就送了兩篇論文到協會的 A 組中去，在有一篇中他（立於馬克士威原理上）從一個電矩爲  $\tau a^2 i_0 \parallel N$  及周期爲  $T$  的交變循環電流 (alternating circular current) 中，算出了因輻射而失去的能量是

$$\frac{8\mu\pi^4}{31^2 C^3} M^2, \quad \text{或} \quad 10^{-29} M^2 N^4,$$

這裏的  $N$  是頻率；而另一篇論文則爲「一個產生波長較短的電磁擾動的方法」(On a Method of Producing Electro-magnetic Disturbances of Comparatively Short Wave-Lengths)。這在大英協會年報上有了摘要，就是這幾句話：

這方法是利用一個蓄電池經由一小電阻放電時所產生的交流。要用這方法來產生波長小至十米，甚至更小的波，應該是不可能的。

從此以後，就可以說，餘下的困難不是電波之產生，而是牠們的探驗和說明了。

到一八八七年和一八八八年，赫芝就把牠們確實地產生了下來，也把牠們探驗出來了，他的探驗方法很使他驚奇，那是在導體將近放電時產生的小電花。赫芝的這一個偉大的發現是由菲次澤刺德於一八八八年在拔施 (Bath) 開會的協會 A 組的主席致辭中宣佈了的。同時，我也把在導線中流動而又受導線引導的電波顯露出來了。

一八八九年，我又偶然發現檢波器方法 (coherer method)，檢驗電浪 (electric surgings)，並且演明了各種不同形式之波的存在，另外又在皇家研究所 (Royal Institution) 表演了：當桌上的來頓瓶放電時，壁紙的發放電花現象。

一八九四年，布蘭萊 (Branly) 改良了這個方法，改用一個鐵屑管 (tube of iron filings)，這就用了來說明牠們的一切的光學類比了；而那年八月中，在牛津就證明了，通過空間的電報訊號也能用那個方法發送。到一八九六年，馬可尼 (Marconi) 先生蒞臨吾國（指英國——譯者註，）

這一種訊號的實際裝置即行開始。他引起了普里斯爵士 (Sir William Preece) 的興味，而此後無線電報的系統就開始了牠的早期的奮鬥而後來獲勝的生涯了。

那就是我對於馬克士威的理論研究之經由赫芝的發現而走上實際的廣大應用上去的經過所能做出的一個近於可靠的略圖。

在一八九七年中，我證明了調諧 (tuning) 怎樣可以用來增加感應的靈敏度 (sensitivity of response) 以及辨別各個不同的電臺了；到一九〇一年以後，馬可尼又發現電波可以繞地球達到美洲以及更遠的地方去。一九〇四年，夫麗明之發現真空管 (vacuum tube) 是一個比任何粉末檢波器或晶體都好的有效的檢波器，並且開始應用牠到電話乃至於電報上去；一九〇八年，第伏爾施特 (De Forest) 把真空管又改良一過，使放大 (magnification) 成爲可能的事。自是以後，再加上許多的發明，一個遍及全世界的無線發送系統就漸漸地開始，而到現今，一座無線電收音機已經差不多在每一個家庭裏都是一件家用的儀器了。

從這裏可以知道，整個的無線電報系統都是克婁克、馬克士威原初的而驚人的理論，把法

拉第的實驗研究用數學的形式表現出來的理論之一個展開；而無線電報系統之得以迅速地發展，普及於全世界，那是應該歸功於馬可尼及其合作者之能力和堅忍不撓之勇氣的。

(註)本文原題爲 Clerk Maxwell and Wireless Telegraphy 作者爲 Sir Oliver Lodge ——譯者。

## 卡文迪虛實驗室的初年（格奈慈不魯克）

克婁克·馬克士威回到劍橋當卡文迪虛教授是一八七一年，不過在這前幾年他就已經和大學中的數學教學發生過密切的關係了。

在一八五〇年早就有了一個皇家委員會（Royal Commission）裏面的委員們，在注意過研究物理光學的方法後，就說過，毫無理由可舉來解釋自然科學其他的各大部分爲什麼不能同等地變成受注意的對象，或者劍橋爲什麼不應該變成一個偉大的物理和實驗教學的學校，正和牠之已成爲數學和經典教學之學校一樣，這種話了。

名譽卒業試驗規程（Tripos Regulations）自一八四八年起就已經實行了；在規定的表內自然哲學雖已列入，但對於這一個辭語的解釋還是有限制的。熱學、電學、彈性固體論，以及流體力學（除掉極其基本的部分）都不在內。這些課目是在一八六八年認可而到一八七三年纔實行

的那一個新方案中纔被包括進去的。不過當時大學裏還沒有辦法來教授物理學的實驗部分，於是在一八六八年就有了一個委員會(syndicate)來做救治此種缺點的建議了。一八六六、一八六七、一八六九和一八七〇這四年的名譽卒業試驗都有馬克士威考的，他作爲一位主試者(examiner)的工作把系統教導(systematic instruction)，特別在熱學和電學方面之需要給委員會證明了。委員會於是建議要設立一個教席，大學評議會(senate)接受了，最後就有了馬克士威的任命。第逢州公爵，大學總長，在一八七〇年捐助設立一座實驗室，這使大學能以適宜地位置了這一位教授，而卡文迪虛實驗室終於在一八七四年六月於相當的典禮下開幕了。

我自己的大學肄業生活是在一八七二年十月開始的，那時正是按照包括熱學、電學和磁學的新章舉行的第一次試驗（一八七三年正月）之前數月。馬克士威是增加的一個考試委員，是在兩個會長(moderator)和兩個考試委員之外，因引用新章而任命的第五名考試委員。繼他之後的是湯姆孫和太特，接着至一八七六年，我得學位的那一年，是雷萊。

那是一個大有意味的時代；教科書只有很少的幾本，也可以說是沒有，收在郎曼的科學教本



叢書 (Longman's Textbook of Science Series) 中的曾金的電磁學是在一八七三年出現的，同一叢書中的馬克士威熱學的刊佈約和他的電磁學同時。這種種課題對我們自己，乃至對於我們的先生都是新穎的。特銳力苔的代爾 (Thomas Dale) 當時是我的導師。他把湯姆孫的熱力學著作，和當時在我們還覺得神祕的第二定律，或者他的靜電學論文合在一起，貫串起來，精練得正適於大學肄業生的消化；他這樣的熱力學講演筆記，我至今還保留着哩。我們的幸運還不祇此，蘭布，那時還是學院中的一個青年講師 (Lecturer)，也已經把握住赫爾姆霍斯的渦動論文 (essay on vortex motion) 以及湯姆孫的流體力學著作之偉大了他的講演，後來形成他流體力學一書的，對於我們之中僅僅讀過拜桑 (Besant) 流體力學的人，實在是一件驚人的東西。我自己的一本馬克士威電學，我想，是在一八七四年的暑假 (long vacation) 中買的。現在還在我跟前，第一卷內有幾章或者幾節還有代爾註的「R」，另有幾章是註的一個「O」字，這我們現今想來是最有趣的。第二卷在名譽卒業試驗之前是很少觸到的，直到試驗過後，在一八七六年的夏季中，我和代爾去布透米爾 (Buttermere)，我們纔一起把牠讀了很多。

當時，這位教授也正在充實他自己，實驗室已經在建築了；講演也開始，而有些學生，尤其是在我上一班的，也已經開始工作了。不過在當時，對於這些，我是毫無所知的。

在名譽卒業試驗之後，有人告訴我，說我應該準備爭得一個特銳力苔公費研究員的位置。論文制度（dissertation system）剛剛開始實行。此後，公費研究員就看一次試驗的結果而授予了；代爾因此勸我去卡文迪虛學點實驗物理，順便看看能不能找到一個便於做「論文」（dissertation）的題目。於是我們有一批人就去了，其中有坡印亭和蕭。

第一天早晨，馬克士威站在那個大實驗室中一張桌子旁邊，對我們把用惠斯頓橋測量電阻法解釋了。我很懊悔，我和他的第一次見面沒有早幾個星期，因為雷萊在他的問題之一中，曾經要我們「試釋惠斯頓橋測電阻法」，又在它的應用上出過一則簡易的附加難題（rider）。不幸的是像測量電阻這種種的實驗工作，在我的淺薄的馬克士威研究中，不會包括進去，而我就不能觸及問題也不能觸及附加難題了。

立即我們就在測量着電阻和學習着裝置以及調整各種電學儀器了。在一架湯姆孫電流計

(Thomson's Galvanometer)中，要把那一面小鏡子固定下來，調整好，在不熟練的我們，真不是十分容易的事。有系統的示範 (demonstration) 還沒有——為準備自然科學名譽卒業試驗而組織的實驗班次，那是後來在雷萊勳爵時代纔出現的。這一位教授只給我們幾個實驗和必需的儀器讓我們做；我們大部分的工作是靠我們自己的，聖約翰的加奈特在那裏是示範員，有時幫幫忙，或者指引些逃出困難的辦法。

只經過一個短時期以後，我就被派做一件工作，那我想任一位僅有數週實驗室經驗的學生都會認為是可驚的。歐姆定律之正確與否，那時是還毫無嚴格的實驗證明的，克銳斯陶爾（後來愛丁堡的教授）和桑代爾斯兩人，他們在一八七五年已經取得學位了，就正在試驗着它。馬克士威是大英協會一八七四年任命來用實驗研究其精確度——疑問是因為肖斯透提出請求批評的一篇論文而引起的——的一個委員會 (committee) 裏的一員，他們用的方法就是他發明的。這方法的內容是測量一個電阻，先在電流大的時候量一次，然後把電流大大地減小之後再量。他們用的電動力源是許多的鋸屑盤式 (saw-dust tray) 丹聶爾電池，因而他們就需要知道在工作

進行中在這些電池裏有沒有重大的變異發生這一問題了。

我就是被派做這件工作的，有周期地來測量這些電池的電動力，用的是一架大型湯姆孫象限靜電計。這件儀器，現今是很少人知道的，更不會有人會想到用牠來做這一件工作。爲着使小針保持一定的電位 (potential)，又接了一架小的墜門靜電計 (trap-door electrometer) 和一架補充器 (replenisher)，而這在每次測量之前是需得精確地把牠弄好的。要使得這東西工作起來，又還是一件困難的事咧，不過也許是 useful 的一件。克銳斯陶爾的結果，像他在一八七六年報告給大英協會的，是一個導體的電阻，它在電流非常之小的時候若是一歐姆，在電流爲一安培時，是變得不會過  $10^{-12}$  的。

大英協會的電阻線圈早已經被馬克士威帶到了卡文迪虛來，在克銳斯陶爾和桑代爾斯工作的進程中，他們就把牠們仔細地互相比較了。

這時，我們的這一位教授正從事編印卡文迪虛的電學論文，是大學總長交給他處理的，而這又引起他發明了一種球體和半球體實驗之改良的方式，試驗力之平方反比定律；這實驗是由麥

克愛力斯透做出的，他證明了，假使力是遵依定律  $L_1 + q$  的話，那麼  $q$  就應該在  $H = 1/21600$  之間。

肖斯透到劍橋是一八七六年，他做了幾件分光鏡的研究工作；其他在工作着的有亥哭克 (Heycock) 和克奈登 (Clayton)；蕭曾經去柏林跟赫爾姆霍斯工作過，一八七九年又召了回來，爲氣象會議 (meteorological council) 預備一件研究工作。坡印亭在一八七八年當選了特銳力苦的一名公費研究員之後，也回來了，繼續他測定地球平均密度的工作。夫麗明在一八七八年是從事於大英協會標準電阻之比較的，他自己設計了一個「電橋」，可以較精確也較簡便地把兩個差不多相等的電阻比較出來。這在新近的古斯里講演 (Guthrie Lecture) 中已經向物理學會顯示過了。

不過，還是掉轉頭來說我本人的經驗吧。測量一個電池組之電動力或有對於一種層疊的介質 (stratified dielectric) 的性質做點研究，這是指定給我做的工作，然而這似乎是不能供給資料給人做公費研究員論文的。我當時的興趣是在物理光學和研究斯托克給大英協會的關於雙

折射(double refraction)的報告上，而這是由於一個提議引起的，那就是證驗夫累涅爾(Fresnel)的波面形式(the form of the wave surface)的理論了。斯托克曾經把這方法應用於單軸晶體(uniaxial crystal)過，在我問他，如以同樣的方法試驗一個雙軸晶體(biaxial crystal)，在他是否仍然以為重要的時候，我就從他那裏得到了無限的鼓勵了。他所用過的測角計(goniometer)還可使用，他就把牠連同幾件其他的儀器借給我。肖斯透代我找到了一塊霰石(aragonite)並且依照斯托克的提示，代我把牠切得正適於試驗兩個相當大的波面弧(arc of the wave surface)。這件工作是比較有意義的，因為雷萊剛剛提出過一種修正的雙折射論，按照他的理論說，一個晶體的慣量(inertia)是一個方向的函數，彈性是不變的；而在夫累涅爾的理論上，慣量在一切方向上都一樣，不同的倒是彈性的緣故。

馬克士威確是已經把他的電磁學刊佈，而且其中已含有光之電磁論的大綱了，不過在當時，光學問題的討論還是憑藉種種彈性固體論的。現今頗為著名的電磁論只引起了夫累涅爾的波面說。

馬克士威很快地給我種種工作的方便，把我放在一個暗黑的小房間內，牆是黑的，空氣的流通極其不夠，那是最上一層的第一間房子，那時正適於光學研究之用的，裏面有一柱強的鈉焰 (sodium flame)，弄得周遭的空氣極不舒適。加奈特在實驗室的地下層裏曾經裝過一些工具，不過沒有固定的工匠。我們就把我們所需要的種種小件頭放在一起了。我在做小孩子的時候，是從村裏的木匠師傅那裏得過些教益的，這裨益了我，使我在設計做一個小夾器 (clamp)，好把我的晶體放在任何需要的位置上的時候，非常地能勝任愉快。在工作的進行中，馬克士威也時時來看看。我記得有一次，我有點困難了，這就請示他。他在回答的時候說，在這實驗室中，別的人也問過許多的問題，但那些問題只在他腦子的周遭形成一層很厚的外殼；而我的問題是需要相當的時間纔能被吸收進去的。不過，只在一兩天中，他又來了，說假使你照舊做下去，我想你是可以發覺那一切全是不錯的。經過了相當的經程，工作完成了，論文也寫了起來。我能以證明了，在受試驗的兩個弧上，量得的速度是和夫累涅爾理論之所示極其接近的。僅僅在兩個方向上，折射率纔差到  $0.0004$  之多，而第二回的觀測又弄清楚了，這差數的大部分還是起於觀測上之困難的哩。

就大體說，差異是比較更小的。因此最後得到的結論就是：除開在光軸 (optical axis) 附近的區域中，觀測困難的處所外，這實驗已給夫累涅爾的理論證實了。在雷萊理論的場合中，差數之大於上面說過之數五倍者還有；然而那是不能把事實說明的。

論文是交付馬克士威審查的，根據他的報告，我就被選為一名公費研究員了。院長 (master) 在我得到他的允許去會他的時候，他說了，「馬克士威教授在我們面前放下的，有利於你的情態，我們是不能抗禦的。」在選舉的那一晚上，我湊巧在不利虛利站 (Bletchley Station) 遇到了馬克士威——我們兩人都是從北邊回來的——他的慈和的寒暄和他的懇摯的祝賀，我還記得很清楚哩。

用原初的晶體做，僅能試驗兩個不很長的波弧，因而就想到需要另用一塊晶體做測量，好把這件研究工作展開來了。另一年的大部分於是就為這事佔據了去，結果與前很相同；其全部（註一）遂由馬克士威於一八七八年六月送給了皇家學會。

那時似乎很有些例證，說觀測到的夫累涅爾理論之微小的變異一定是與波長有關的，在斯



托克和馬克士威的勸告之下，我覺得需要把這來研究一下了。於是工作就繼續做下去，不過不用靛石，而用方解石 (Iceland Spar) 的稜鏡 (prism) 來代替了。這有兩種原因：一則較大的稜鏡可以供給較多的光，一則斯托克自己用方解石做的幾個實驗，結果還不曾公佈過。這實驗重複地做過幾次，用氫光譜做光源，得到了「惠更斯 (Huyghens) 的作圖法，把我對於氫光譜的三條射線所做的實驗結果表示得非常之好，使接近的程度差堪與實驗的近真誤差 (probable error) 相比擬」這樣的結果。在  $e$  線的折射率上，理論和實驗之間的平均差數是小於  $0.00007$  的。

馬克士威把含有這些結果的一篇論文 (註二) 在一八七九年六月裏送到了皇家學會。這是最後的一件工作，在其中我受過他的幫助和進言的。之後，他就生病了，在六月裏，就離開了劍橋，回到在格倫奈爾的他的蘇格蘭的家中去休養；然而他終究漸漸壞下去，而我就不會再看到他了。他是一八七九年十一月五日死於劍橋的。

對於馬克士威時代的卡文迪虛，以上只是一個很不完備的敘述；它倒毋寧說是一段故事，講的只是他如何幫助和鼓舞一個年青的學生依他的希望去發展自然知識而已，而或許它就完全

不能是另一回事咧；因爲那是他對於一切在他指導之下工作的人們所應用的方法之一個榜樣。我們是被訓練成爲獨立研究者；被鼓舞來探尋我們要希望解決的有些問題，在我們困難中受了他的幫助，而終於被引向成功之境了。對於我們的領袖之偉大，我想，我們一定是會認知；對於他本人給知識的貢獻，這雖或還沒有一個完滿的評價，一定是會崇敬；而對於他的爲人，也一定是會敬愛的。跟他研究了短短的三年，這是一件非常之榮幸的事；而現今對於他的紀念有份來參加，那無論如何也總是一件非常之榮幸的事。

(註一)「雙軸晶體中之平面波」(On Plane Waves in a Biaxial Crystal) 載於一八七九年哲學雜誌 Phil. (Trans.) 第一部分，第二八七——三七五頁。

(註二)「方解石中的雙折射與分散」(Double Refraction and Dispersion in Iceland Spar) 載於一八七九年哲學雜誌第二部分。

(附註)本文原題爲 Early Days at the Cavendish Laboratory，作者爲 Sir R. T. Glazebrook——譯者。

## 作爲講師的克婁克馬克士威（蘭布）

我自己對於馬克士威的回憶是僅與他在劍橋的教授生活之初開頭的些日子有關的。一班年青的學數學的學生，不管是準備名譽卒業試驗的候選者，還是最近畢業的大學生，都已經對於設立一個實驗物理講座的建議熱切地感到興味了。研究自然哲學，在某種有限的意義上，也已經自然而然地在這大學中盛行了好久，不過，這是一個新的分枝，因而對於這新教授的選派也就自然而然地有了好多的臆測。先就有傳說，說已經請了W. 湯姆孫，甚至於也有說赫爾姆霍斯已經到了的。在馬克士威於一八七一年終於受到任命的時候，他對於我們之中有許多，除開他曾經有一兩次在數學名譽卒業試驗中負責出過幾條高深的試題這一點，我恐怕，只不過僅僅是一個名字而已。我記得，在那時，他的兩大主要著作都還沒有刊印，而學數學的學生，要沈浸於流行的科學文獻之研究，都是要被認爲離經叛道，而有妨於他們的位置爭奪戰的。不過，無論如何，我們對於

這位新教授的蒞臨都是帶着興味和一些熱情在期待着，而且是顧慮着不要失去機會聽他的就任演辭的。這一篇演辭講出時的種種情形都不很平常。學校裏僅發了一次臨時的宣告，這使一切大學裏的領袖人物就都來不及知道了，而在時間到了的時刻，這次演講的地點，又未能如一般所料，在評議會大堂中，而是在一個偏僻的講堂中，再加以對象呢，只是二十左右學生而已。

後來的事情倒毋寧是有趣的。在過了幾天之後，當校裏用正常的方式宣告馬克士威教授將在某時某地開始他的熱學講座的時候，這大學裏的 *the majors*，以為這是他第一次公開地出現，就都全力地，失禮於這位新教授地，參加了，而有趣的是看見當地的偉大的數學家和哲學家如亞丹施、凱萊、斯托克之流正坐在最前面的一排，聽馬克士威帶着一付可覺知的閃爍的目光，嚴肅地向他們解釋着華氏表 (*Fahrenheit Scale*) 與百分表 (*Centigrade Scale*) 的關係，以及空氣溫度計 (*air-thermometer*) 的原理。

後來傳說過，而且并不是不可信的，那就是馬克士威在這次事件中并非全無關係。據說，他私人的謙恭，以及某種對於惡作劇的偏愛，就已經暗示了這一條能以避免那比較正式地開始他的

## 劍橋生涯之路了。

接下去的熱學，以及後來的電學演講都是跟着他當時正在預備中的兩本著作的線索下來的。牠們對於我們之中有些人很有些吸引力與魔力，這大部分倒並不是由於那些初等的題材，而倒是由於我們在閃爍的一瞥中從這位講師那裏得到的對於事物的看法，他的常常接近基本原理，乃至於他應付困難的策略，心性不定而未經預謀的熟思，偶有的諷刺的批評，以及常有的一種文學的，甚至於詩的諷示。關於這些，真沒一點是牽強的，或者是無謂的；所插上去的話語和說明都常常是自然湧發而適切的。牠們的性質，有些從刊在他全集中的對於各種問題偶然發表的論文中，也許還可以收集得到哩。聽他雖有時受限制，而常常強烈地感謝過去的偉大的數學家們，那也是很有興味的事。我還特別記得他提及安培、高斯和斯托克時所取的說法哩。

他充分地領受了與黑板相對的不幸。有一個人得到過一個印象，我想他那是因研究了牠的著述而纔確定的，那就是，他雖然能把重要之點緊緊地把握住，並且能把許多偉大的數學概念用公式寫出來，但他在微細的計算上總不是一個很好的熟手這一點了。他的物理的天賦是常把他

從真真重大的錯誤裏救出來的。

他的演講的效應是他的偉著，受人期待了好久的電磁學，在一八七三年出現的時候，得到極多的人去向書鋪裏爭購。牠受到熱誠的研讀，並且牠有名地成了他學生們的一長系列的研究之出發點。不過，在這裏，我可出乎個人回憶這一論點之外了。

對於馬克士威一種比較親切的認知，除掉有一次偶然地到他家裏去謁過他以外，我是全不能說什麼的。只記得，他有兩件玩具，他常常把牠們拿出來供新朋友們遣興。其一就是「動力的陀螺」，是意欲拿牠來把古典的轉動理論中各要點說明了的一種玩具。他爲這件儀器做過一篇論文，從這篇論文裏，我想，人們是能以把近代對於緯度變異（the variation of latitude）的興味之復興的蹤跡追尋出來的。另一件玩具就是一種檢眼器（ophthalmoscope）了。那或許和他的光線屈折學（dioptrics）的研究有聯帶關係，是他獨立發明的。他還常常對他自己和他的朋友們，包括那條已經被他訓練成一個有耐性而圓通的『東西』（subject）的他的狗，說明這一件玩具的用途哩。

（註）本文原題爲 Clerk Maxwell As Lecturer 作者爲 Sir Horace Lamb ——譯者。

