

大學物理叢書

電 磁 學

譯者 官德樣 葉天正 林啓東
林棟樑 盧伯誠
校閱 黃振麟

徐氏基金會出版

財團
法人

徐氏基金會

科學圖書大庫

— 大學物理叢書 —

電 磁 學

基本定價 5.40 港



譯者 官德樣 葉天正 林啓東 林棟樑 盧伯誠

校閱 黃振麟 國立台灣大學物理系教授

出版者 財團法人徐氏基金會

發行人 鍾 廖 權

地 址 台北縣新店市中正路284巷3號

電 話 917-9077~8

電 傳 911-7618

郵政劃撥帳戶第00157952號

行政院新聞局登記證局版臺業字第3033號

一九九七年十月一日初版十刷

本書如有裝訂錯誤或缺頁敬請『刷掛』寄回調換

ISBN 957-18-0375-8 版權所有・不許翻印

校閱者序

這個年代有人說是「知識爆炸」的年代了。例如以專門刊登物理學的新發明或新發現為宗旨的美國物理評論（The Physical Review）來說，從 1950 年到 1959 年的十年間共出了 270 公分厚的文章；從 1960 年到 1969 年便一躍增加到 1000 公分厚的了。這一事實告訴我們：今日物理學的進展速度，已達令人可怕的程度。

自從相對論、量子力學、統計力學等的發明以來，物理學家對於自然界的看法，起了很大的變化，對於新問題的探討方法也隨之改變。從而工業技術也直接或間接地受到影響，急速地改變。像電子技術、原子能、非線性光學、結晶、高分子等等這一切的發展，無一不是受了今日物理發展的影響，而形成了所謂「技術革命」。各先進國家逐漸領悟到。此後真正決定國家生命的關鍵已經轉移到以科學為背景的生產技術了。因此，每年訓練出多少理工人材已成爲各國競爭的目標，而如何有效地加以訓練人才，更成爲迫切的問題。

爲了適應這些知識的急激累積及時代的迫切需要，學校教育開始放棄了傳統性的「實用知識」的傳授，改以養成能適用於多種領域的科學研究態度。就物理來說，過去的教科書骨子裡，不過是半世紀前的物理，鮮有新的物理基礎觀念的介紹。補充的新知識也只是移花接木地硬加上，且其分量不過十分之一二。更重要的是沒有一個貫通的思想。新的教科書應該矯正這一點。

本套大學物理叢書 Berkely Series 就是針對上述問題而編的一種新教材。不可企圖祇灌輸新知識，而意圖讓學生養成能適應新時代的體質。它把過去的知識體系徹底打破之後，按照未來的延長線方向，逐次把新舊材料加以檢討。然後，對未來有益者，如何老也採用；無益者，如何新也捨之不用。這樣取捨選擇而成的就是本教材。

本叢書共有五本；對象是大學一年級和二年級的理工科學生。

第一本：C. Kittel, W.D. Knight and M.A. Ruderman“力學”

- 第二本：E.M. Purcell, “電磁學”
第三本：F. Crawford, “波動學”
第四本：E. Wichmann, “量子物理學”
第五本：F. Reif, “統計物理學”

美國 California 大學 Berkeley 分校的物理學系是站在冠於全世界的地位，正在領導着全世界的物理發展。該系的優秀教授（不但是在教學方面，而且在研究方面）共同籌劃，費了幾年心血寫成這五本書。翻譯本叢書的是我國最優秀的物理學生，國立台灣大學物理學系的系友，正在美國一流大學中攻讀博士學位的愛國愛群的一群學子。他們在美國深深地了解物理教育的新浪潮，並痛覺我國教育改革的必要性，以滿腔的熱忱先翻成第二、三、五的三本。第一本因為前聽說過有國立交通大學畢業生的翻譯計劃（擬由徐氏基金會出版），所以他們暫時作罷。但是如今已經知道該計劃並未完成，他們正着手趕譯中。至於第五本，因為原書祇有臨時性的打字版，俟正式的排字版問世後，就可立刻開始翻譯。預料在明年上半年間第一、第五兩本可同時送上讀者諸位的面前。

黃振麟 謹識

於國立台灣大學物理學系

原序

這冊的主題為電與磁。在它粗略的外形上，編排的順序，還是和往常一樣：靜電學，穩定電流，磁場，電磁感應，和物質裏的電，磁偏極化。然而，我們的探討却不同於傳統的方式。最顯著的差別，可以從第五、六章看到，我們以電荷的相對性和不變性的表徵，來說明動電荷的電場和磁場，探討的焦點集中在某一些基本問題上，諸如電荷不滅，電荷不變性，以及場的真諦等。狹義相對論是需要的，不過所借用的工具，只有座標的羅倫茲轉換式 (Lorentz Transformation) 和速度相加公式而已，事實上學生需要將第一冊所發展的觀念與態度，諸如從不同的參考座標來看一件事，不變性的體會，對稱的討論等，應用到這部分裏，方纔能夠徹底了解。在第二冊裏，我們也常常用到基於疊加 (Superposition) 原理的討論。

探討物質的電磁現象，是採微觀式的 (microscopic)。亦即強調分子原子的電磁偶極性質。以杜魯德—羅倫茲模型 (Drude-Lorentz Model) 描繪電導現象，也是一種微觀式的說法。當然有些問題要等到學生修完第四冊的量子物理以後，方能解決，但是我們仍自由地以具體方式談及分子原子是一種電性結構，擁有大小，形狀和硬度，至於電子軌道，自旋，也同樣地賦予具體觀念。我們以很小心的態度，處理「物質裏微場 (microscopic field) E 和 B 的意義」的問題。在一般的介紹性教科書裏，這類問題有時避去不談，有時則弄得陰影重重。

在第二冊裏，學生的數學裝備，增加了向量微積分 (Vector Calculus) 裏的一些工具，諸如梯度 (Gradient)，散度 (Divergence)，旋度 (Curl)，以及拉普拉斯算符等。前面幾章需要這些觀念，我們會好好地處理它。

第二冊的原始版本，已被加州大學好幾班期裏用過。從勃克萊課程 (Berkeley Course) 有關人員那兒來的批評，使得該冊獲益不少，特別是用這教科書給第一班期上課的 E.D. Commis 和 F.S. Crawford，給我們助益很大。他們及他們的學生發現無數個地方，需要加以澄清，或用更嚴格的

手段處理，學生對原始版本的批評由Robert Goren收集。Goren 先生也幫忙籌組習題。從J.D. Gavenda和 E.F. Taylor那兒也得到不少有價值的指正，他們兩位先生用這原始版本，分別在德克薩斯大學（Univ. of Texas），威斯累思大學（Wesleyan Univ.）教過。在早期寫作過程中，Alan Kanfman 也出過不少好主意，而A.Felzer 更是我們初稿中的“試驗學生”。

在探討電與磁的過程中，我們受到多方面的鼓勵，這些鼓勵除了來自我們原來的課程委員會以外，還有來自和我們並行發展新課程的麻省理工學院（Massachusetts Institut of Technology）。後者中J.R. Tessman是M. I. T.科學教育中心和杜夫特大學（Tufts Univ.）的先生，在早期的組織策略中，他給我們很大的幫助與影響，他亦在M. I. T.用我們的原始版本上課，他對整個教科書閱讀後，促使了更進一步的改變與修正。

原始版本，以及爾後版本的印刷，由Mary R. Maloney女士管理監督，大部分的手稿由Lila Lowell女士打字，插圖由Felix Cooper完成。

本冊的作者對勃克萊的朋友，保留最深摯的感激。尤其是 Charles Kittel，由于他的刺激與長期的鼓勵，使得這段冗長的工作成爲一項樂趣。

E.M. Purcell

教學指引

通常在十四或十五週的一個學期裏我們就足以將本冊的一些主題涵蓋。換句話說，一個唸過第一冊的學生在這段時間裏可以仔細地研究本書中的精要，從容地閱讀其他的部分，並且至少可以在問題裏發掘一兩個有興趣的題目來好好地發揮他的思想，雖然如此，作為教師的却必須把本書的內容作一個適宜的挑選與計劃。在本書中的論題若要全部在一個學期裏精研完畢是嫌多了一點。在第一遍的研讀裏我們可以也應該把某些小節刪去，或是把它當作臨時性的覽讀。我們在後面註出了一些或多或少可以節略的部分。真正節略的情形可由教師依課堂的興趣，學生的程度，上課的總時數以及教師對於這些題目個人的觀點如何來決定。

問 題

本書的習題很多，學生也許無法全部做完。這些習題分成兩個部分。每章後面所列的問題是和該章所述的內容直接有關的，而且大體上也是簡單而非拐彎抹角的問題。如果學生會覺得這些問題有困難，那就可能是想歪了。在本書末的補充題裏也依照章節地錄了很多習題。這些習題就要比每章後面的習題要難，也比較有趣味。有些題目甚至還包含了不少新的論題及應用，有些是課文裏有省掉了的證明，有些則給我們一些暗示及討論的要旨。因此這些題目有幾個好處：第一，它可以使最好的學生好好地細想咀嚼尋味，第二是不論學生做不做這些題目，即使是光把題目看一次，也能得到不少新觀念和廣泛的應用，第三是有些問題牽涉到了課本以外的內容（如問題 4.25 與空電限制的二極管有關），因此教師們有時也可把這些東西在上課之前提出討論。總之，把補充題用來全體討論是極為適合的。

實證教學

由於任何一本書都無法完全地把電與磁介紹給學生；所以實證教學的配合是很重要的，尤其是教科書已經把許多問題作成了結論，也合乎邏輯，所以教科書是太理論了一點，這一本書也不例外，學生們應該有機會真正使用

一下磁鐵，線圈，做一些火花出來或是看一些靈敏精巧的儀器，學生們也應該看看百萬瓦特的功率及微瓦特的功率在操作的情形。每一個教師都要使學生體驗到書中所述的事情，譬如說電場並非是個符號而已，而是真正能產生作用的東西。

考 試

書裏有許多論題是比較深的，我們相信學生一定可以在這些地方的處理方法中得到不少好處，可是教師應該避免把考試的水準提得太高。簡單一點的題目比較適合。

第一章（靜電學：電荷與電場）本章簡潔地介紹了一些主要的觀念。可是這一章的趣味性不高，最好一開始便使用教具講解。

可節略章節：1.6

第二章（電位）本章提到的新觀念並不多，可是却有許多可應用的數學工具，這些數學方式必須講得很清楚，說明的速度可由學生的數學程度及吸收能力而定，這些內容在後面遲早會用到，有關旋度的運算要到第六章才用得到，所以教師們如果想沖淡一點本章的數學氣氛，那麼就可以把自2.15節至2.18節的這一段延到那個時候再講。教師們必須注意學生們對散度及旋度瞭解的狀況。圖2.32及2.34和一些習題都可能有便於教學。不過像手勢，討論和畫圖說明仍然是必要的。

可節略章節：無

第三章（導體周圍之電場）這一章可以很快地講過去。其中所提的平行板電容器在以後會常常出現。由唯一定理牽涉了許多重要的觀念，此章中的討論甚為精關。本章對於邊界值問題所引入的張弛法與變分法較之傳統所用的映像法更有啟發性，雖然不太普通，但却使學生較有興趣。當然要把這一節（3.6節）整個刪去也無大礙，同樣的在第3.6節中所述的容電係數牽涉到一般線性系統的處理問題也可以刪除。在這一章裏有許多東西沒有提到，譬如說電場與電位的量法，量這些東西的儀器等等，教師均可在課堂中或實驗室內講解實施。

可節略章節：3.6，3.8

第四章（電流）先注入體積電流密度的觀念之後，再跟著講解離子輸送電

荷的微觀現象。歐姆定律則利用了古典的杜魯德—羅倫茲模式來解說。第4.4節可依照進度的情形以決定講解的深淺，講少了也沒有關係，別的部分都不與這一節有關。可是這一節講的東西很重要，讀者必須要把它唸一遍。直線線路部份講得很少，教師可以用更多的例子或問題來推廣一些。

可節略章節：4.5，4.6，4.10

第五章（運動電荷的電場）由第一冊所學的內容以及在實驗室中的經驗，學生早就知道在磁場中作用在運動電荷上的力是 $q(\mathbf{v}/c) \times \mathbf{B}$ 。一開始就可以把這一點復習一下，在5.3節之前就可把一些磁作用及平行電流間作用力問題的證明做一做，在本章中學生可以由一個嶄新的觀點來觀察磁的作用，最基本的便由電荷的不變性開始，所以在有運動電荷的系統中電量的定義是個極重要的問題，整章的精華也在於瞭解等速運動電荷產生如何地一個電場，因此關鍵便在於把電場轉換到一個運動座標的轉換過程，所以在這時候需要把場的觀念作一個全盤的討論，到了學生把5.5節的討論學完了之後，他就會懷疑這一章裏的特例是不是適合於一般的轉換公式。另外高速粒子所產生的電場更使一般學生驚訝，即使是那些以為電場被「遲滯」了的學生也會對這件事發生興趣。輻射現象雖然稍微超出了一點我們要討論的內容，而且輻射會在第三冊中詳細討論，教師們不妨把連續輻射（問題5.8）及同步加速器的輻射現象加以簡述，5.8節花了不少篇幅證明一些學生們早就視為當然的式子，如果學生對第一冊401頁力的轉換公式很熟悉的話，這一節就可以很快地講過去。最後一節講的是與運動速度有關的力。讓學生明瞭為什麼會有這個力產生倒比推導的過程還更重要些，而且還要特別強調結果的簡單性與正確性。

可節略章節：無

第六章（磁場）上一章把磁場的來源說明了，這一章又再次地說明磁場 \mathbf{B} 。由直導線所導出的積分關係 $\int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 4\pi I/c$ ，通常在穩定電流的條件下才可成立，在本章中引入了向量位。在本章以及第十章中都使用了這個量，而且這個量也不複雜。一個將來準備唸物理的學生一定要把它搞得很熟。同時我們也要注意電與磁的對稱性。不過這一章裏僅僅強調磁場而已，另外還可以用幾個例子來說明真空中場的轉換情形。問題6.15是個在課堂上討論的好題目。6.8節與6.9節可以作為任意閱讀的部份。

可節略章節：6.8，6.9

第七章（電磁感應與馬克士威方程式）這一章應該使用很多教具來實驗證明種種的現象，我們可用靈敏的電流計來證明 7.2，7.3，7.4 諸節的現象。這一章沒有牽涉到什麼特別的問題。最好能儘可能地利用實際的說明來講解感應現象。本章似乎有兩點好像有些小題大作：(1)是 7.8 節中的自感，由於這個觀念有點困難，所以先介紹互感的現象。(2) 7.12 節強調了位移電流的重要性。一些愛動腦筋的學生很可能會被這些問題弄得混亂，所以對於這些學生最好先告訴他們直接的結果。馬克士威方程式出現之後，電磁波也就呼之欲出。7.13 節便逐漸引入第三冊的範圍了。

可節略章節：7.7，7.13 的最後部分。

第八章（交流電路）本章只包括交流理論的一些初步內容以便和學生在實驗室中的實際經驗配合。其中複數的表示法有助於第三冊的研讀。在時間允許的條件下，教師可以在這方面多作發揮。假如學生將來在工科方面還要完整地唸一遍交流電路的話，那麼這一章就可以整章剔除。如果要把整章剔除，那麼就把 8.1 節放在第七章裡講，因為這一節和 7.10 節相連，所以可以保留下來。

可節略章節：無（或除了 8.1 節外全章刪除）

第九章（物質裡的電場）常常由於一開始的教學計劃不週，因此每在講到第九章第十章的時候就一下子趕過去。事實上這兩章所需要的時間要多過全部的五分之一才對，如果二個學期是十四週，這兩章就應該佔三、四個禮拜。主要的目的就是要使學生熟習於物質中有關於電的結構，其次便是微觀場的理論。譬如說時間不夠了，我們就可以不講有關於原子感應偶極與永久偶極的介電球的例子。（9.13 節在第一次閱讀時也可略去不唸，當然程度好，有興趣的學生是不在此限的。）教師還可利用學生在化學上的一些基礎，因為這一章是和化學物理都有關連的，說不定在班級裏就因此而產生了幾個原子生物學家和生理學家呢！

可節略章節：9.6，9.10，9.11，9.13，9.17

第十章（物質裏的磁場）這一章雖然和第九章一樣教師可以引導學生尋找許多有趣的問題，可是這一章却可以比第九章少花一點時間。如果時間不夠或是想留下點時間討論課外相關的問題，那麼就可以從(10.23)式開始研究 10.5 節中抗磁性的分析，10.3 節與 10.4 節就不需看推導的過程只要看結

果就可以了。另外在物質巨觀場的問題上也可以少花一點時間，因為如果讀者需要明瞭得透澈，他還可以回過頭來唸。巨觀磁場也早在第九章時和電場一併提過了，所以可以講快一些。圖 10.19 的總結可以讓教師在說明時有一個腹案。

單 位

在本書中大部份均用高斯 CGS 制單位，在適當之處也用了實用單位：伏特，安培，庫倫與歐姆。電流的基本單位就用靜庫／秒。基本磁場為 \mathbf{B} ，單位用高斯，本書中並不稱其為磁感。單位以及換算表列在封底裏中。附錄中並列有 MKS 制電單位與現在所用 CGS 制單位的關係。

數值表刊於 VIII 頁。

數值表

量	符號	數值	
真空中光速	c	2998×10^{10}	厘米/秒
基本電荷	e	4803×10^{-10}	靜庫
蒲朗克常數	h	6.626×10^{-27}	爾格-秒
萬有引力常數	G	6670×10^{-8}	達因-厘米 ² /克 ²
電子.	m	0.911×10^{-27}	克
質子.	M_p	1.672×10^{-24}	克
亞佛加德羅常數	n_0	6022×10^{23}	摩爾 ⁻¹
標準狀況下之摩爾體積	V_0	2.24×10^3	厘米 ³ /摩爾
波茲曼常數	k	1.38×10^{-16}	爾格/°k
電子伏特 (能量單位)	eV	1.602×10^{-12}	爾格
電子.	mc^2	0.511×10^9	電子伏特
質子.	$M_p c^2$	0.938×10^9	電子伏特
波爾半徑	a_0	0.529×10^{-8}	厘米

目 錄

前言

原序

教學指引

單位

數值表

第一章 靜電學：電荷與電場	1
1.1 電荷.....	1
1.2 電荷不滅.....	2
1.3 電荷的量子化.....	4
1.4 庫倫定律.....	5
1.5 一組電荷的能量.....	8
1.6 晶體點陣的位能.....	11
1.7 電場.....	13
1.8 電荷之分佈.....	16
1.9 通量.....	19
1.10 高斯定律.....	21
1.11 球狀電荷分佈的電場.....	25
1.12 線狀電荷分佈的電場.....	26
1.13 面狀電荷分佈的電場.....	28
問題.....	30
第二章 電 位	35
2.1 電場的線積分.....	35
2.2 電位差與電位函數.....	37
2.3 純量函數的梯度.....	38
2.4 由電位導出電場.....	40

2.5	電荷分佈的電位	41
2.6	均勻帶電的圓盤	44
2.7	面電荷所受之力	50
2.8	電場內所含的能量	53
2.9	向量函數的散度	55
2.10	高斯定律的微分形式與高斯定理	57
2.11	笛卡兒(直角)座標系中的散度	57
2.12	拉普拉新	62
2.13	拉普拉斯方程式	64
2.14	數學與物理學之區別	65
2.15	向量函數的旋度	67
2.16	斯托克斯定理	70
2.17	直角座標系中之旋度	70
2.18	旋度的物理意義	74
	問題	80
第三章 導體周圍之電場		84
3.1	導體與絕緣體	84
3.2	在靜電場中之導體	85
3.3	一般靜電問題與唯一定理	92
3.4	簡單的導體系統	95
3.5	電容器與電容	100
3.6	導體上之電位與電荷	105
3.7	電容器所儲存之能量	108
3.8	邊界值問題之觀點	109
	問題	112
第四章 電流		116
4.1	電荷輸送與電流密度	116
4.2	穩定電流	118
4.3	導電性與歐姆定律	121
4.4	電導的模式說法	124
4.5	歐姆定律在何處不適用?	129

4.6	金屬的導電性	131
4.7	導體的電阻	132
4.8	電路與電路單元	135
4.9	電流中的能量消耗	141
4.10	電動勢與伏打電池	142
4.11	電容器與電阻器中之可變電流	148
	問題	151
第五章 運動電荷之電場		158
5.1	從奧斯特到愛因斯坦	158
5.2	磁力	159
5.3	在運動中電荷之量度	162
5.4	電荷之不變性	166
5.5	不同座標系中量得的電場	169
5.6	等速運動時點電荷之電場	173
5.7	起動或停止時電荷之電場	176
5.8	作用於運動電荷上的力	182
5.9	運動電荷與其他運動電荷之相互作用	186
	問題	194
第六章 磁 場		198
6.1	磁場的定義	198
6.2	磁場的某些性質	204
6.3	向量位	209
6.4	任意電流導線之磁場	213
6.5	環與線圈之磁場	216
6.6	磁場 \mathbf{B} 在金屬板上的變化	221
6.7	場之轉換	225
6.8	羅蘭實驗	231
6.9	在磁場中電之傳導；霍耳效應	232
	問題	235
第七章 電磁感應與馬克士威方程式		239

7.1	法拉第的發現	239
7.2	導體在均勻磁場中的運動	243
7.3	迴路在不均勻磁場中的運動	247
7.4	場源移動而迴路固定的情況	257
7.5	感應的一般定律	259
7.6	互感	265
7.7	互易定理之一	268
7.8	自感	271
7.9	含有自感的電路	273
7.10	貯存在磁場裡的能量	277
7.11	「某些東西遺失了」	279
7.12	位移電流	283
7.13	馬克士威方程式	287
	問題	294
第八章 交流電路		299
8.1	共振電路	299
8.2	交流電	305
8.3	交流電網路	314
8.4	導納與阻抗	317
8.5	交流電路的功率和能量	321
	問題	326
第九章 物質裡的電場		328
9.1	電介質	328
9.2	電荷的分佈矩	331
9.3	偶極的電位和電場	336
9.4	外電場作用於偶極的力矩與力	339
9.5	原子與分子偶極；感應偶極矩	342
9.6	極化張量	348
9.7	永久偶極矩	351
9.8	極化物質所產生的電場	354
9.9	充滿電介質的電容器	361

9.10	極化球的電場	365
9.11	均勻電場裡的極化球	369
9.12	電介質媒體中電荷的電場和高斯定律	372
9.13	電極化率與原子極化率的關係	375
9.14	極化時的能量變化	381
9.15	由有極分子組成的電介質	382
9.16	變化場中的極化	383
9.17	束縛電荷電流	385
	問題	390
第十章 物質裡的磁場		395
10.1	各種物質對磁場的反應	395
10.2	磁「荷」的消失	401
10.3	電流迴路的磁場	403
10.4	外電場作用於偶極的力量	410
10.5	原子裡的電流	413
10.6	電子的自旋與磁矩	421
10.7	磁極化率	424
10.8	磁化物質的磁場	425
10.9	永久磁體的磁場	433
10.10	自由電流與場H	436
10.11	鐵磁學	440
	問題	448
補充題		453
附錄		505
索引		509