

科學圖書大庫

費因曼物理學

(第二部一上)

譯者 陳順強 校閱 黃振麟

徐氏基金會出版

科學圖書大庫

費因曼物理學

(第二部一上)

譯者 陳順強 校閱 黃振麟

徐氏基金會出版

徐氏基金會科學圖書編譯委員會
監修人 徐銘信 發行人 王洪鎧

科學圖書大庫

版權所有

不許翻印

中華民國六十七年七月六日三版

費因曼物理學 (第二部一上)

基本定價 3.60

譯者 陳順強 國立台灣大學物理系理學士
校閱 黃振麟 國立台灣大學物理系教授

本書如發現裝訂錯誤或缺頁情形時，敬請「刷掛」寄回調換。謝謝惠顧。

(67)局版臺業字第1810號

出版者 臺北市徐氏基金會 臺北市郵政信箱53-2號 電話 7813686號
發行者 臺北市徐氏基金會 郵政劃撥賬戶第15795號
承印者 大原彩色印製企業有限公司 台北市西園路2段396巷19號
電話：3611986•3813998

我們的工作目標

文明的進步，因素很多，而科學居其首。科學知識與技術的傳播，是提高工業生產、改善生活環境的主動力。在整個社會長期發展上，乃對人類未來世代的投資。從事科學研究與科學教育者，自應各就專長，竭智盡力，發揮偉大功能，共使科學飛躍進展，同將人類的生活，帶進更幸福、更完善之境界。

近三十年來，科學急遽發展之收穫，已超越以往多年累積之成果。昔之認為若幻想者，今多已成爲事實。人類一再親履月球，是各種科學綜合建樹與科學家精誠合作的貢獻，誠令人無限興奮！時代日新又新，如何推動科學教育，有效造就科學人才，促進科學研究與發展，尤爲社會、國家的基本使命。培養人才，起自中學階段，此時學生對基礎科學，如物理、數學、生物、化學，已有接觸。及至大專院校專科教育開始後，則有賴於師資與圖書的指導啓發，始能爲蔚爲大器。而從事科學研究與科學教育的學者，志在貢獻研究成果與啓導後學，旨趣崇高，彌足欽佩！

本基金會係由徐銘信氏捐資創辦；旨在協助國家發展科學知識與技術，促進民生樂利，民國四十五年四月成立於美國紐約。初由旅美學人胡適博士、程其保博士等，甄選國內大學理工科優秀畢業生出國深造，前後達四十人，惜學成返國服務者十不得一。另曾贈送國內數所大學儀器設備，輔助教學，尚有微效；然審情度理，仍嫌未能普及，遂再邀請國內外權威學者，設置科學圖書編譯委員會，主持「科學圖書大庫」編譯事宜。以主任委員徐銘信氏爲監修人，編譯委員王洪鎧氏爲編輯人，各編譯委員擔任分組審查及校閱工作。「科學圖書大庫」首期擬定二千種，凡四億言。門分類別，細大不捐；分爲叢書，合則大庫。爲欲達成此一目標，除編譯委員外，本會另聘從事

翻譯之學者五百餘位，於英、德、法、日文出版物中精選最近出版之基本或實用科技名著，譯成中文，供給各級學校在校學生及社會大眾閱讀，內容嚴求深入淺出，圖文並茂。幸賴各學科之專家學者，於公私兩忙中，慨然撥冗贊助，譯著圖書，感人至深。其旅居國外者，亦有感於爲國人譯著，助益青年求知，遠勝於短期返國講學，遂不計稿酬多寡，費時又多，迢迢乎千萬里，書稿郵航交遞，其報國熱忱，思源固本，至足欽仰！

今科學圖書大庫已出版一千餘種，都二億八千餘萬言；尚在排印中者，約數百種，本會自當依照原訂目標，廣續進行，以達成科學報國之宏願。

本會出版之書籍，除質量並重外，並致力於時效之爭取，舉凡國外科學名著，初版發行半年之內，本會即擬參酌國內需要，選擇一部份譯成中文本發行，惟欲實現此目標，端賴各方面之大力贊助，始克有濟。

茲特掬誠呼籲：

自由中國大專院校之教授，研究機構之專家、學者，與從事工業建設之工程師；

旅居海外從事教育與研究之學人、留學生；

大專院校及研究機構退休之教授、專家、學者

主動地精選最新、最佳外文科學名著，或個別參與譯校，或就多年研究成果，分科撰著成書，公之於世。本基金會自當運用基金，並藉優良出版系統，善任傳播科學種子之媒介。尚祈各界專家學人，共襄盛舉是禱！

徐氏基金會 敬啓

中華民國六十四年九月

原序

這些講演都是前年和去年我在加州理工學院對物理系大一和大二同學講的。當然，這些講演並非一字不變的照錄，他們已經被重新編校過了。這些講演只能說是整個完整課程的一部分。當時來聽講演的學生約有 180 名，每週上課兩次。然後他們再以 15 到 20 人分作一組，在助教的指導下上演習課。除此以外，他們每週還上一次實驗課。

我們的主要目標是希望一直維持這些到開特屈來的極優秀同學們的濃厚興趣。他們在來這裏以前已經聽到不少關於物理是如何的有趣和令人興奮，如相對論、量子力學及其他一些非常新穎的觀念，可是以往每逢我們兩年一貫的課程結束後，很多人會變得非常沮喪。因為他們覺得老師們對一些很宏偉、很新穎的新觀念講得太少了。他們以為只學習些有關斜面 (inclined planes) 和靜電學 (Electrostatics) 等問題是很失望的。因此，使天賦很高的同學，能夠永遠熱衷於學習，是我們的一項重要目標。

這些課程不是概略性，而是完全正式的。它的對象是對物理有興趣的同學，而且我也相信，即使是最優秀的同學也無法對所有講演全部融會貫通。因為除了主要課程外，我們還加了許多其他方面的應用問題。在我講解時，如果有新的意念湧出，要是能由同學們學過的觀念或式子導出時，我就試著把他們導出，要是目前沒法證明我就只把他們加進去解釋一下。在講演開始時，我假定同學們在高中時已經學過了一些基本知識一譬如說幾何光學 (Geometrical optics) 簡單的化學觀念等等。我的講演並沒有一定的次序或範圍，事實上直到我要在課堂上開講時，我才把那次的內容作最後的定案。講演中穿插的舉例，是對某一問題誘導性的討論，我總是先介紹一些它的特殊性質，再作完整的推導或講解。

目前存在的一大困擾是這部教材仍在試驗階段，沒有反應來表示它到底好不好。我私下感覺至少第一年的課程很適合。但是第二年的課程就很難講了。第二年開始時我首先講解電磁學。這部門我想除了用老方式外，實在想不出有什麼別的更理想的方法。在第二年快結束時，我本想講一些

有關物質的性質的東西。但結果只概述了一些如基譜方式 (Fundamental modes)，擴散方程式的解 (Solutions of the diffusion equation)，振動系統 (Vibrating Systems)，正交函數 (Orthogonal functions) -----。也就是只講了一些通常叫作「物理的數學方法」 (The mathematical methods of physics) 的東西。因此在第三冊的量子力學中我就補介紹了一些原先想講的內容。

一般的看法量子力學儘可在三年級時講授。但很多來聽講的學生只是想獲得一些物理知識以備在其他方面應用。而通常講述量子力學的方式使大多數這些同學無法接受，因為那種講法需要太多的時間。而結果是這些電機或化工方面的同學學了一大堆微分方程的應用，而在實際工作上極少用到。所以我想採用一種新方式，使得即使沒學過偏微分方程 (Partial differential equations) 的同學也能了解，而這對一個念物理的人而言，我覺得也是一樁很新穎的方式—跟以前相反的方式—這點你們可由課程中體會。到最後時間不足了，我只能把能量帶 (Energy bands)，振幅的空間依賴性 (Spatial dependence of amplitudes) 大致提一下。

對於為什麼沒有關於如何解題的講演，我的回答是：那些只是記憶的工作。雖然我在第一年有過三次講演如何解題，本書也未把它們編入。

至於到底這些講演是否成功？我自己的看法是不樂觀的。雖然有很多跟學生一起研討的先生們似乎不完全同意。其中大概只有十或二十個學生，才能幾乎完全了解。這些學生的思考方式和態度必是一流的。Gibbons 曾說過：「如果不是興趣昂然的學習，不能產生很好的效果。而這種興趣昂然的學習，是很少見的。」

我一直不希望有同學完全跟不上。我想有一個辦法是很理想的，就是再引述一系列的例題，以說明講演中的觀念。例題能補充講演的不足，而且使教材更逼真，更完整，在腦中的觀念也因一再運用而更加根深蒂固。另外我想除了一個學生和一個好老師直接密切合作以外，沒法使教學得到最大效果。要是只呆坐著聽講，或只作一些老師交待的題目，收效必不大。但目前學生人數遠超過老師，就只能求其次，或許我的教材對此能有所貢獻。

前 言

約有四十年之久，費因曼先生將他的興趣放在物理界的神秘作用中，將他的智慧用於在渾沌中追尋出條理來。最近兩年，他利用他所具有的特殊本領和精力，對大學新生講授普通物理。他抽取了物理知識的精華，在表達方式上，他也下了功夫，希望學生們聽完後能對物理學的世界有所認識。在講演詞中，他帶入了清晰的觀念，獨出心裁的門道，充沛的活力，及熱誠的講解。所以，看這本書實在是一大快事。

這套書的第一冊就基於他第一年的講演。在這第二冊中，我們嘗試了記錄下他第二年的部份講演—這些講演是在1962—63學年中對大二學生講的。至於第二年剩餘部份的講演將編成第三冊。

在第二年的講演中，前三分之二是詳細地敘述了物理學中的電磁學部份。我們希望這部份能達成兩項目的：第一，因為電磁學是物理學中的一個重要部份，我們希望學生們在聽完這些講演後，能對電磁學是什麼獲得一個相當完整的梗概—我們從早期富蘭克林的摸索開始敘述，經過馬克斯威爾的偉大綜合，直到羅倫徹有關物質性質的電子理論，最後以電磁自身能量(Electromagnetic self-energy)仍未解決的雙關論(Dilemmas)作結束；而且，第二，我們希望，藉在開頭時引入向量場的微積分，能給學生們建立起一個關於場論方面的穩健數學基礎。為了強調數學方式的一般用法，其他有關物理方面的資料，有時也與對應的電學一起講解一下，而我們一直試著想把數學的一般性弄得明白些（「同樣的式子有同樣的解」）。於是我們就利用與課程互相配合的習題和考試來強調這觀點。

在電磁學後面有兩章，一章講到彈性，一章講到流體的流動。在每成對章的前一章中，我們講基本而實用的觀點；在第二章中，就把有關現象的範圍整個描述一下。這四章必要時可以省略而無大礙，因為它們對第三冊來說，並非必要的準備知識。

大約第二年的最後四分之一的時間，是介紹量子力學的入門知識，它們被擺在第三冊中。

在這費因曼的講演中，我們希望不只是紀錄下他的講詞就算完事，還希望能把這書寫得如同原來講演所依據的觀念一樣清晰。對其中某些篇講演來說，就只要把記錄稍加潤飾即可；但對其他的講演來說，就得作大幅度的排列或改寫了。有時，我們覺得需要加些新的材料以使內容更清楚明暢。在整理的過程中，我們非常榮幸地一直得到費因曼教授的協助和建議。

把一百萬字的口語改寫成一本有條理的教科書，而此書又得有緊密的結構，這份轉換工作相當龐大，何況還有許多別的事限制了我們的力量，譬如，我們還得對學生們引入一些新的工作—包括演習課，接見學生，設計習題和考試，打分數等。在工作進行中，我們得到了許多人的建議和援手。在某些情況下，我相信，我們能夠報答的一個誠摯的典型就是費因曼先生了。在另外一些情況下，我們連報答的目標都沒有。總之，我們的成就是得自幫助我們的人的協助。若有失誤的話，我們感到非常的歉咎。

在第一冊的前言中，我們也曾詳述過，這些講演是加州理工學院的物理教程校訂委員會 (Physics Course Revision Committee 主席是R.B.

Leighton，其餘委員有 H.V. Neher and M.Sands)

: T. K.Caughey, M.L.Clayton, J.B.Curcio, J.B.Hartle, T.W Harvey, M.H.Israel, W.J.Karzas, R.W.Kavanagh, R.B.Leighton, J.Mathews, M.S.Plesset, F.L.Warren, W.Whaling, C.H.Wilts and B.Zimmerman.

J.Blue, G.F.Chapline, M.J.Clauser, R.Dolen, H.H.Hill and A.M.Title. Gerry Neugebauer

Matthew Sands

第二部要目

上冊

第一章	電磁學	1
第二章	向量場的微分學	18
第三章	向量積分學	38
第四章	靜電子	58
第五章	高斯定律的應用	80
第六章	在各種情況下的電場	97
第七章	在各種情況下的電場 (續)	122
第八章	靜電能	144
第九章	大氣中的電學	162
第十章	電介質	182
第十一章	電介體內	197
第十二章	靜電學類推	217
第十三章	靜磁學	238
第十四章	各種情況下磁場	258
第十五章	向量位	275
第十六章	應電流	298
第十七章	感應定律	315
第十八章	馬克士威爾方程式	339
第十九章	最少作用量原理	357
第二十章	在自由空間中馬克士 威爾方程式的解	383
第廿一章	有電流和電荷時的馬 克士威爾方程式的解	407
第廿二章	交流電路	429

下冊

第廿三章	空腔諧振器	463
第廿四章	波導	482
第廿五章	以相對論的符號來表 示的電動力學	504
第廿六章	電磁場的羅倫徹變換	523
第廿七章	場能及場動量	547
第廿八章	電磁質量	566
第廿九章	電荷在電場與磁場內 的運動	587
第三十章	晶體內部的幾何學	603
第卅一章	張量	645
第卅二章	稠密物質中的折射係 數	667
第卅三章	表面反射	688
第卅四章	物質的磁性	711
第卅五章	順磁性與磁共振	730
第卅六章	鐵磁性	748
第卅七章	磁性物質	788
第卅八章	彈性	801
第卅九章	物質的彈性	825
第四十章	乾水的流動	848
第四一章	濕水的流動	868
第四二章	彎曲的空間	886
名詞對照		912

目錄

(第二部上冊)

原序

前言

第一章 電磁學	1
1-1 電力.....	1
1-2 電場和磁場.....	6
1-3 向量場的特性.....	7
1-4 電磁定律.....	10
1-5 場是什麼.....	15
1-6 科學及工業技術上的電磁學.....	17
第二章 向量場的微分學.....	18
2-1 物理之探討.....	18
2-2 純量及向量場 - T 和 h	19
2-3 場之導數—梯度.....	23
2-4 算符 ∇	27
2-5 和 ∇ 有關之運算.....	28
2-6 熱流之微分方程.....	31
2-7 向量場之第二導數.....	32
2-8 陷阱.....	36
第三章 向量積分學.....	38
3-1 向量積分； $\nabla\psi$ 之線積分.....	38
3-2 向量場之通量.....	41
3-3 任一立方體之通量；高斯定理.....	44
3-4 熱傳導；擴散方程式.....	46
3-5 向量場之環流量.....	50
3-6 圍繞方塊之環流量；斯托克斯定理.....	52

3-7	無旋度及無散度之場	54
3-8	摘要	56
第四章 靜電學		58
4-1	靜電磁學	58
4-2	庫侖定律；疊加原理	60
4-3	電位	64
4-4	$E = -\nabla\phi$	67
4-5	E 的通量	69
4-6	高斯定律及電場 E 的散度	74
4-7	一個帶電球的電場	75
4-8	場線；等位面	76
第五章 高斯定律的應用		80
5-1	靜電學的內容	80
5-2	靜電場中的平衡	80
5-3	由帶電導體所產生的電場中的平衡	82
5-4	原子的穩定性	83
5-5	線電荷的電場	84
5-6	面電荷的電場	85
5-7	球形電荷及球殼形電荷	87
5-8	高斯定律和平方反比定律的一些討論	89
5-9	導體內的電場	93
5-10	導體中空洞內的電場	94
第六章 在各種情況下的電場		97
6-1	靜電位的式子	97
6-2	電偶極子	99
6-3	關於向量式的幾點注意	103
6-4	把偶極位能視作一梯度	104
6-5	對任意分佈電荷的偶極子近似	107
6-6	帶電導體的電場	109
6-7	利用像求電場的方法	110

6-8	一點電荷鄰近一個傳導平面.....	111
6-9	一點電荷鄰近一傳導球.....	113
6-10	電容器；平行板.....	115
6-11	高電壓疲竭.....	118
6-12	場致發射顯微鏡.....	119
第七章 在各種情況下的電場 (續前)		122
7-1	決定靜電場的方法.....	122
7-2	二度空間的形；複變函數.....	124
7-3	離子體振盪.....	129
7-4	電解溶液中的膠態質點.....	133
7-5	柵極靜電場.....	137
第八章 靜電能		140
8-1	電荷的靜電能。一個均勻球.....	140
8-2	一個電容器的能量。作用於帶電導體上的力.....	143
8-3	一個離子性晶體的靜電能.....	147
8-4	在核中的靜電能.....	150
8-5	靜電場中的能量.....	156
8-6	一點電荷的能量.....	160
第九章 大氣中的電學		162
9-1	大氣中的電位梯度.....	162
9-2	大氣中的電流.....	164
9-3	大氣電流的起源.....	167
9-4	雷雨.....	169
9-5	電荷分離的機械作用.....	173
9-6	閃電.....	178
第十章 電介質		182
10-1	電介常數.....	182
10-2	極氏向量 P	184
10-3	極化電荷.....	186

10-4	電介質的靜電方程式	190
10-5	電介質的電場和力	192
第十一章	電介體內	197
11-1	分子偶極子	197
11-2	電子電極化	198
11-3	有極分子；轉向極化	202
11-4	電介體內空腔內的電場	206
11-5	液體的介電常數；克勞修斯—莫梭梯方程式	209
11-6	固態介質	210
11-7	鐵電性；BaTiO ₃ ，鈦酸鋇	212
第十二章	靜電學類推	217
12-1	同樣的方程式具相同的解	217
12-2	熱流；在一無窮平面邊界附近的點源	218
12-3	張緊的膜	224
12-4	中子的擴散；在均勻介質中均勻圓球的源	227
12-5	無旋流質的流動經過一圓球的活動	230
12-6	照度；平面的均勻照明	234
12-7	自然界的根本一致性	235
第十三章	靜磁學	238
13-1	磁場	238
13-2	電流；電荷不滅	239
13-3	作用在一電流上的磁力	241
13-4	穩定電流的磁場；安培定律	243
13-5	一條直導線和一組螺線管的磁場；原子電流	245
13-6	磁場和電場的相對學說	248
13-7	電流和電荷的轉換	255
13-8	疊加；右手定則	256
第十四章	各種情況下的磁場	258
14-1	向量位	258

14-2	已知電流的向量位.....	262
14-3	一條直導線.....	264
14-4	一個長螺線管.....	266
14-5	一個小迴線的磁場；磁偶極子.....	269
14-6	一個電路的向量位.....	272
14-7	畢奧、薩伐爾定律.....	273
第十五章	向量位	275
15-1	有電流的迴線所受的作用力；偶極子所含的能量.....	275
15-2	機械能和電能.....	279
15-3	穩定電流的能量.....	282
15-4	B 對於 A 的關係.....	284
15-5	向量位和量子力學.....	286
15-6	適用於靜力學而不適用於動力學的一些定理.....	294
第十六章	應電流	298
16-1	電動機和發電機.....	298
16-2	變壓器和電感.....	303
16-3	作用於應電流上的力.....	306
16-4	電學工業技術.....	311
第十七章	感應定律	315
17-1	感應的物理現象.....	315
17-2	「通量定則」的例外情形.....	318
17-3	由一個感應電場以加速質點，電子迴旋加速器.....	319
17-4	一個佯謬.....	322
17-5	交流發電機.....	324
17-6	互感.....	328
17-7	自感.....	331
17-8	電感和磁能.....	333
第十八章	馬克士威爾方程式	339
18-1	馬克士威爾方程式.....	339

18-2	到底這新的項有什麼功用？	342
18-3	所有的古典物理	345
18-4	一運動場	346
18-5	光的速率	351
18-6	解馬克士威爾方程式；位和波動方程式	352
第十九章	最少作用量原理	357
	一篇特殊的講演—幾乎是一字不差的照錄	357
	講後小記	382
第二十章	在自由空間中馬克士威爾方程式的解	383
20-1	在自由空間中的波；平面波	383
20-2	三度空間波	395
20-3	科學的想像	397
20-4	球面波	400
第二十一章	有電流和電荷時的馬克士威爾方程式的解	407
21-1	光和電磁波	407
21-2	由一點源發出的球面波	409
21-3	馬克士威爾方程式的一般解	412
21-4	一振動偶極子的場	414
21-5	一運動電荷的位能；李納和威夏的一般解	421
21-6	一電荷以等速運動的位能；羅倫徹式	425
第二十二章	交流電路	429
22-1	阻抗	429
22-2	發電機	436
22-3	理想元件的電網路，克希荷夫定則	440
22-4	等值電路	446
22-5	能量	448
22-6	梯形電網路	451
22-7	濾波器	453
22-8	其他電路元件	459

第一章 電磁學

- 1-1 電力
- 1-2 電場和磁場
- 1-3 向量場的特性
- 1-4 電磁定律
- 1-5 場是什麼？
- 1-6 科學及工業技術上的電磁學
(複習：第一冊第 12 章，力的特性)

1-1 電力

考慮一種近似重力的力，大小隨距離的平方成反比，但比重力要強十億十億十億個十億倍（ 10^{40} ）。加上其他的區別；譬如分物質（matter）為兩類，我們稱它正的或負的物質，同類相斥，異類相吸，不像重力一只有相吸的作用，這樣的力將會發生什麼現象呢？

一團正粒子會因巨大的排斥力而向四面八方崩散，一團負粒子也會發生相同的現象，但是當一團正粒子和負粒子均勻而巧妙地混合後則產生一些截然不同的景象，異類粒子藉強大的吸引力被緊拉在一起。由於正粒子負粒子間形成緊密而奇特的混合物，結果使得這一些駭人聽聞的巨力在正負粒子之間形成非常完美的均衡，因此在兩個相離的此種混合物之間，實際上會感覺不出一點相吸相斥的力。

如此的力即為電力（the electrical force），所有物質皆由帶正電的質子和帶負電的電子組合而成，質子和電子均以巨大的電力相吸或相斥，然而電力之間的平衡非常微妙，以致當你們站在任何其他人的身旁竟無法感覺到一點力的存在。事實上，電力若有不平衡的話，甚至只是一點點，你們也可感覺到。茲假設你和某人相距一臂之長，每人身上電子都比質子多百分之一，所產生之斥力卻強大得令人難以置信。多大呢？可舉起帝國大廈？否！可舉起喜馬拉雅山？否！相斥力之大是足夠舉起相當於整個地球的重