

553240

33
7/5566
F3

科學圖書大庫

費因曼物理學

(第三部—量子力學)

譯者	陳順強	黃大民	武以誠	姚樂文
	陳正弦	李一陽	黃力夫	盧伯誠
校閱	黃振麟			

徐氏基金會出版

23
7/5566
F3

• 553240

科學圖書大庫

費因曼物理學

(第三部—量子力學)

譯者	陳順強	黃大民	武以誠	姚樂文
	陳正弦	李一陽	黃力夫	盧伯誠
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

科學圖書大庫

監修人 徐銘信 科學圖書編譯委員會主任委員
編輯人 林碧銓 科學圖書編譯委員會編譯委員

版權所有

不許翻印

中華民國六十七年一月十四日三版

費因曼物理學

(第三部—量子力學)

基本定價 4.80

譯者 陳順強 黃大民 陳正弦

李一陽 武以誠 姚樂文

黃力夫 盧伯誠 國立台灣大學物理系理學士

校閱 黃振麟

國立台灣大學物理學系主任

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。

(63)局版臺業字第0116號

出版者 財團法人臺北市徐氏基金會 臺北市郵政信箱53-2號 電話 7813686 號

發行者 財團法人臺北市徐氏基金會

郵政劃撥賬戶第 15795 號

承印者 大興圖書印製有限公司 三重市三和路四段一五一號 電話 9719739

費 因 曼 序

這些講演都是前年和去年我在加州理工學院 (Caltech) 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加州理工學院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——譬如幾何光學 (geometrical optics)，簡單的化學觀念等等。我的演講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諸方式 (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。而這對一個唸物理的人而言我覺也是一種很新穎的方式——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講如何解題，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的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。

Richard P. Feynman

一九六三年六月

前 言

二十世紀物理學的偉大成就—量子力學理論的發現—到目前已經快接近四十年了。然而我們教授學生的普通物理課程（對於許多學生，這是他們最後的物理課程。）卻很難得提及此一物理世界的中心論題。我們應該設法改善這一缺點。本講演希望能夠以簡單易懂的方式，提供給學生們一些量子力學基本而主要的觀念。你將發現本課程的開端對於大學二年級水準的課程來說，是非常新奇而獨特的，它主要是被當作一種實驗。不過後來看到許多學生能夠很容易的接受它，我相信此一實驗是成功的。當然，經過在教室實際講授之後，發現本課程中尚有許多可資改善的餘地。你在此所讀到的只是第一次實驗的紀錄。

從1961年九月到1963年五月，費因曼物理講演在開特屈（Caltech）連續講授了兩年，作為普通物理課程。只要討論現象時有所需要，量子物理的觀念總是不厭其煩地被引入。尤有進者，在第二年的最後十二次演講中，對於量子力學的基本觀念，作了一系列的介紹。然而到本講演接近尾聲時，顯示出已沒有足夠的時間留下來討論量子力學。雖然講授的資料事先已準備好，但是我們不停地發現許多其他重要而有興趣的論題可以用已講過的基本方法討論。同時又擔心在第十二次演講中，對於薛定諤波動方程式過分簡短的敘述，不能提供給學生有效的橋梁以閱讀其他更進一步的書籍。因此我們決定再增加七次演講；在1964年五月對二年級學生講授。這些演講補充並擴展了以前演講所推演的結果。

本冊書中，我們把這兩年的演講併在一起，而在次序上略加調整。還有，原來作為新生課程量子力學介紹的兩次演講，整個地從第一冊（第37章和第38章）移來做為本冊書的前面兩章—使本冊書自成一個體系，與前兩冊互相獨立。關於角動量量子化的幾個觀念（在斯特恩—格拉赫實驗的討論中提及）曾經在第二冊的第34章和第35章中提及，我們假定學生對此已很熟悉；為了沒有該冊書在手頭的學生的方便，此兩章重印在本冊書的附錄中。

本講座希望能從頭闡明一些量子力學最基本而最通常的現象。首先處理

機率振幅的觀念，振幅的干涉，狀態的抽象觀念，以及狀態的疊合與分解——狄喇克符號從開始時就被使用。對於每一題材，觀念的介紹都附以一些特例的詳細討論——盡可能使物理觀念顯得實在。接著討論定能量狀態因時間而改變的性質，而這些觀念立刻被應用到雙態系統 (two-state system) 的研究。關於氫雷射 (Maser) 的詳細討論提供了對於輻射吸收和感生轉變 (induced transition) 的大略介紹。然後繼續討論更複雜的系統：電子在晶體中的傳佈，以及對於角動量的量子力學作相當完整的處理。我們以第 20 章結束此量子力學的介紹：討論薛定諤波動方程式，其微分方程式，以及其對於氫原子的解。

本冊書的最後一章並不是要作為「課程」的一部分，而是以「消遣」的精神，對超導體作「研究討論」。希望藉此擴張學生的眼界，明白我們所學過的東西和一般物質文化間的關係。最後是費因曼的「跋」作為這三冊書的結束句點。

就如在第一冊的前言中所解釋的，這些演講只是加州理工學院在物理課程修訂委員會 (physics Courses Revision Committee) (Robert Zeignton, Victor Neher, 和 Matthen Sands) 指導下，對於發展新的普通物理課程計劃的外觀。許多人士對於本冊書提供了技術上的幫助：Marylou Clayton, Julie Curcio, James Hartle, Tom Harvey, Martin Isreal, Patricia Preuss, Fanny Warren, 和 Barbara Zimmerman。Gerry Neugebauer 和 Charles Wilts 兩位教授仔細閱讀了大部分的手稿，對於正確性和易讀性上有極大的貢獻。

但是你在此所讀的量子力學故事仍是屬於費因曼的。當我們看到隱藏在他生動的物理講演後面的觀念時，我們心靈上感到無限的興奮。只要這一冊書能把一些我們身受的感覺帶給別人，我們的苦工就沒有白費了。

1964 年十二月

Matthew Sands

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，今多已成為事實。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，尤為社會、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，始能為蔚為大器。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為監修人，編譯委員林碧鐸氏為編輯人，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；分為叢書，合則大庫。為欲達成此一目標，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；尙在排印中者，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，並藉優良發行系統，善任傳播科學種子之媒介。尙祈各界專家學人，共襄盛舉是禱！

徐氏基金會 敬啓

中華民國六十四年九月

目 錄

費因曼序

前 言

第一章 量子動態	1
1-1 原子力學	1
1-2 槍彈的實驗	2
1-3 波的實驗	4
1-4 電子的實驗	6
1-5 電子波的干涉現象	7
1-6 觀察電子	9
1-7 量子力學的第一原理	12
1-8 測不準原理	14
第二章 波動觀點與粒子間的關係	15
2-1 機率波幅	15
2-2 位置與動量的量度	17
2-3 晶體散射	20
2-4 原子大小	23

2-5	能階	25
2-6	哲學含義	27
第三章	機率波幅	31
3-1	結合振幅定律	31
3-2	雙狹縫干涉圖樣	37
3-3	晶體散射	40
3-4	全同粒子	43
第四章	全同粒子	49
4-1	波色粒子及費密粒子	49
4-2	兩個波色粒子的狀態	53
4-3	n 個波色粒子的狀態	57
4-4	光子的發散及吸收	60
4-5	黑體光譜	61
4-6	液態氦	67
4-7	不相容原理	68
第五章	自旋 1	73
5-1	利用斯特恩 - 格拉赫裝置過濾原子	73
5-2	對被濾過的原子的實驗	79
5-3	斯特恩 - 格拉赫過濾器串聯	82
5-4	基礎態	84
5-5	干涉振幅	87
5-6	量子力學的構造	92
5-7	不同基礎間的變換	95
5-8	其他情況	98
第六章	自旋 $\frac{1}{2}$	101

6-1	振幅變換	101
6-2	旋轉坐標系的變換	104
6-3	繞 z 軸旋轉	108
6-4	繞 y 軸旋轉 180° 和 90°	113
6-5	繞 x 軸旋轉	117
6-6	任意地旋轉	119

第七章 振幅與時間之關係 123

7-1	靜止的原子：定態	123
7-2	均勻運動	127
7-3	位能，能量守恒	131
7-4	力；古典的極限	135
7-5	半自旋粒子之旋進	138

第八章 哈密頓矩陣 143

8-1	振幅與向量	143
8-2	鑑別狀態向量	146
8-3	世界的基本態是什麼	150
8-4	狀態如何隨時間變化	152
8-5	哈密頓矩陣	157
8-6	氮分子	158

第九章 氮雷射 165

9-1	氮分子之狀態	165
9-2	在靜電場中的分子	171
9-3	在與時間有關場中之轉移	177
9-4	共振時之轉移	181
9-5	離開共振時之轉移	184
9-6	光的吸收	185

第十章 其他的兩態系統 189

10-1	氫分子之離子.....	189
10-2	核子力.....	196
10-3	氫分子.....	198
10-4	苯分子.....	201
10-5	染料.....	203
10-6	自旋為 $1/2$ 的粒子在磁場中的哈密頓算符.....	204
10-7	在磁場中自旋的電子.....	208

第十一章 更多的兩態系統 213

11-1	泡利自旋矩陣.....	213
11-2	當作運算符的自旋矩陣.....	219
11-3	兩態方程式的解.....	224
11-4	光子的偏振.....	225
11-5	中性 k - 介子.....	230
11-6	N - 態系統的通式.....	240

第十二章 氫的超精細裂距 245

12-1	由兩個半自旋粒子組成之體系的基礎態.....	245
12-2	氫基態的哈密頓算符.....	248
12-3	能 級.....	255
12-4	塞曼裂距.....	258
12-5	在磁場中的態.....	263
12-6	單自旋的投影矩陣.....	266

第十三章 晶體點陣中的傳播 271

13-1	電子在一度空間點陣中的狀態.....	271
13-2	定能量的狀態.....	274

13-3	與時間有關的狀態	279
13-4	在三度空間點陣中的電子	280
13-5	點陣中的其他狀態	282
13-6	點陣的欠完美性所引起的散射	284
13-7	點陣的欠完美性的陷穽作用	287
13-8	散射振幅和束縛狀態	288

第十四章 半導體 291

14-1	半導體內的電子與空洞	291
14-2	不純半導體	296
14-3	霍耳效應	299
14-4	半導體接頭	301
14-5	在半導體接頭的整流作用	303
14-6	電晶體	305

第十五章 獨立粒子近似法 309

15-1	自旋波	309
15-2	雙自旋波	315
15-3	獨立粒子	318
15-4	苯分子	320
15-5	其他的有機化學問題	326
15-6	近似法的其他利用	330

第十六章 位置對於振幅的關係 333

16-1	線形原子列上電子的機率振幅	333
16-2	波動函數	339
16-3	定動量態	342
16-4	態對於 x 的歸一化	346
16-5	薛定諤方程式	350
16-6	量子的能級	354

第十七章 對稱與守恒律..... 359

17-1	對 稱.....	359
17-2	對稱與守恒.....	363
17-3	守恒律.....	368
17-4	偏振化光.....	372
17-5	Λ^0 的蛻變.....	374
17-6	旋轉矩陣的摘要.....	380

第十八章 角動量..... 383

18-1	電偶極子輻射.....	383
18-2	光散射.....	386
18-3	鉍的湮沒.....	389
18-4	任意自旋的旋轉矩陣.....	396
18-5	核自旋的測量.....	402
18-6	角動量的合成.....	403
	附註 1：旋轉矩陣的導來.....	414
	附註 2：光子發射中的宇稱守恒性.....	418

第十九章 氫原子與週期表..... 421

19-1	氫原子的薛定諤方程式.....	421
19-2	球對稱之解.....	423
19-3	與角度有關之狀態.....	428
19-4	氫原子之一般解.....	433
19-5	氫波函數.....	437
19-6	週期表.....	440

第二十章 算符..... 447

20-1	運算及算符.....	447
------	------------	-----

20-2	平均能量.....	451
20-3	原子之平均能量.....	454
20-4	位置算符.....	457
20-5	動量算符.....	459
20-6	角動量.....	466
20-7	平均值隨時間的改變.....	468

第廿一章 古典論題中的薛定諤方式：超導電性的研討 473

21-1	磁場中的薛定諤方程式.....	473
21-2	機率的連續性方程式.....	477
21-3	兩種動量.....	478
21-4	波動函數的意義.....	480
21-5	超導電性.....	481
21-6	邁斯勒效應.....	483
21-7	通量的量子化.....	486
21-8	超導電性的動力學.....	489
21-9	約瑟遜接頭.....	492

費因曼跋	501
-------------------	-----

附 錄	503
------------------	-----

索 引	543
------------------	-----

第一章 量子動態

- 1-1 原子力學
- 1-2 槍彈的實驗
- 1-3 波的實驗
- 1-4 電子的實驗
- 1-5 電子波的干涉現象
- 1-6 觀察電子
- 1-7 量子力學的第一原理
- 1-8 測不準原理

1-1 原子力學

前幾章已討論過一些基本觀念。這些基本觀念都是要瞭解光（或電磁輻射）的大部分重要現象所必需的。（有一些論題留待第二冊再討論，特別是光密物質的折射率，及全反射現象）。前幾章所討論的叫做電波的古典理論。此理論能夠非常合理地描述自然界的許多效應。在此理論中，我們還不必考慮到光的能量是否以整團的形式出現，即是否以光子的形式出現的。

我們將討論體積相當大的物質的性質一如這些物質的機械性質及熱的性質。在討論這些性質時，我們將會發現古典理論（或舊的理論）幾乎馬上就不適用了，因為物質實際上是由原子大小的質點所構成的。然而，現在我們將只討論古典理論適用的部分，因為這是以我們所學過的古典力學所能了解的部分。但此討論並不會很成功。我們將會發覺，討論物質並不如討論光一般的順利，而會很快就碰到困難。當然我們可以一直忽略原子的效應，但我們卻要在此加入一些物質的量子性質的基本觀念（即原子物理的量子觀念），使讀者能夠感覺到我們在此所省略掉的是什麼。因為有些論題我們必須省略掉而又會接觸到。

所以，我們現在將把量子力學做一簡單的介紹，但要到以後才能深入的