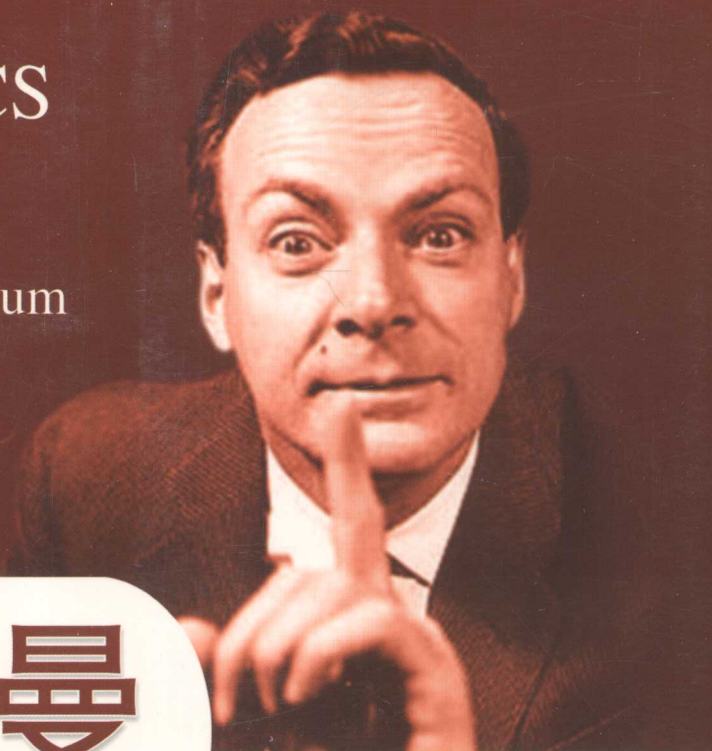


THE
Feynman
LECTURES
ON
PHYSICS

Volume III
The
New Millennium
Edition



费恩曼
物理学讲义 第3卷

新千年版

[美]费恩曼(R.P.Feynman) 莱顿(R.B.Leighton) 桑兹(M.Sands) 著

潘笃武 李洪芳 译



上海科学技术出版社

013053458

04-43
18(T)
V3

The Feynman Lectures on Physics(The New Millennium Edition, Volume III)

费恩曼物理学讲义

(新千年版)

第 3 卷

[美]费恩曼(R. P. Feynman)

莱顿(R. B. Leighton)

桑兹(M. Sands)

潘笃武

李洪芳

著

译

上海科学技术出版社



北航

C1660310

04-43

18(T)

V3

图书在版编目(CIP)数据

费恩曼物理学讲义:新千年版. 第3卷/(美)费恩曼(Feynman, R. P.), (美)莱顿(Leighton, R. B.), (美)桑兹(Sands, M.)著;潘笃武,李洪芳译. —上海:上海科学技术出版社, 2013. 5

书名原文: The Feynman lectures on physics: The new millennium edition

ISBN 978-7-5478-1638-7

I. ①费... II. ①费... ②莱... ③桑... ④潘... ⑤李...
III. ①物理学—教材 IV. ①04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 031508 号

THE FEYNMAN LECTURES ON PHYSICS: The New Millennium Edition, Volume III

By Richard P. Feynman, Robert B. Leighton and Matthew Sands

© 1965, 2006, 2010 by California Institute of Technology, Michael A. Gottlieb, and Rudolf Pfeiffer

Simplified Chinese translation copyright © 2013 by Shanghai Scientific & Technical Publishers

Published by arrangement with Basic Books, a Member of Perseus Books Group

Through Bardon-Chinese Media Agency

博达著作权代理有限公司

ALL RIGHTS RESERVED

上海世纪出版股份有限公司 出版、发行

上海科学技术出版社

(上海钦州南路71号 邮政编码 200235)

新华书店上海发行所经销

苏州望电印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 23.75

字数 490 千字

2013年5月第1版 2013年5月第1次印刷

ISBN 978-7-5478-1638-7/O·20

定价: 78.00 元

本书如有缺页、错装或损坏等严重质量问题,
请向工厂联系调换

译者序

20 世纪 60 年代初,美国一些理工科大学鉴于当时的大学基础物理教学与现代科学技术的发展不相适应,纷纷试行教学改革,加利福尼亚理工学院就是其中之一。该校于 1961 年 9 月至 1963 年 5 月特请著名物理学家费恩曼主讲一二年级的基础物理课,事后又根据讲课录音编辑出版了《费恩曼物理学讲义》。本讲义共分 3 卷,第 1 卷包括力学、相对论、光学、气体分子运动论、热力学、波等,第 2 卷主要是电磁学,第 3 卷是量子力学。全书内容十分丰富,在深度和广度上都超过了传统的普通物理教材。

当时美国大学物理教学改革试图解决的一个主要问题是基础物理教学应尽可能反映近代物理的巨大成就。《费恩曼物理学讲义》在基础物理的水平上对 20 世纪物理学的两大重要成就——相对论和量子力学——作了系统的介绍,对于量子力学,费恩曼教授还特地准备了一套适合大学二年级水平的讲法。教学改革试图解决的另一个问题是按照当前物理学工作者在各个前沿研究领域所使用的方式来介绍物理学的内容。在《费恩曼物理学讲义》一书中对一些问题的分析和处理方法反映了费恩曼自己以及其他在前沿研究领域工作的物理学家所通常采用的分析和处理方法。全书对基本概念、定理和定律的讲解不仅生动清晰,通俗易懂,而且特别注重从物理上作出深刻的叙述。为了扩大学生的知识面,全书还列举了许多基本物理原理在各个方面(诸如天体物理、地球物理、生物物理等)的应用,以及物理学的一些最新成就。由于全书是根据课堂讲授的录音整理编辑的,它在一定程度保留了费恩曼讲课的生动活泼、引人入胜的独特风格。

《费恩曼物理学讲义》从普通物理水平出发,注重物理分析,深入浅出,避免运用高深繁琐的数学方程,因此具有高中以上物理水平和初等微积分知识的读者阅读起来不会感到十分困难。至于大学物理系的师生和物理工作者更能从此书中获得教益。

1989 年,为纪念费恩曼逝世一周年,原书编者重新出版本书,并增加了介绍费恩曼生平的短文和新的序言。2010 年,编者根据五十多年来世界各国在阅读和使用本书过程中提出的意见,对全书(三卷)存在的错误和不当之处(885 处)进行了订正,并使用新的电子版语言和现代作图软件对全书语言文字、符号、方程及插图进行重新编辑出版,称为新千年版。本书就是根据新千年版翻译的。

本书中译本 1987 年版本卷第 1 章至第 15 章由潘笃武翻译,其中第 6 章至第 11 章是在吴子仪译稿基础上重译,第 12 章在李洪芳译稿基础上重译,第 15 章在潘笃武、李洪芳合译的基础上重译。第 16 章至第 21 章、索引由李洪芳翻译。郑广垣、郑永令曾参与了本书译稿的校阅工作。本卷这一版由潘笃武(1—15 章)、李洪芳(16—21 章,索引)重新校勘。

由于译者水平所限,错误在所难免,欢迎广大读者批评指正。

译者

2012 年 10 月

关于费恩曼

理查德·费恩曼(R. P. Feynman)1918年生于纽约市,1942年在普林斯顿大学获得博士学位。第二次世界大战期间,尽管当时他还很年轻,就已经在洛斯阿拉莫斯的曼哈顿计划中发挥了重要作用。以后,他在康奈尔大学和加利福尼亚理工学院任教。1965年,因在量子电动力学方面的工作和朝永振一郎及施温格尔(J. Schwinger)同获诺贝尔物理学奖。

费恩曼博士获得诺贝尔奖是由于成功地解决了量子电动力学的理论问题。他也创立了说明液氮中超流动性现象的数学理论。此后,他和盖尔曼(M. Gell-Mann)一起在 β 衰变等弱相互作用领域内做出了奠基性的工作。在以后的几年里,他在夸克理论的发展中起了关键性的作用,提出了高能质子碰撞过程的部分子模型。

除了这些成就之外,费恩曼博士将新的基本计算技术及记号法引进物理学,首先是无处不在的费恩曼图,在近代科学历史中,它比任何其他数学形式描述都更大地改变了对基本物理过程形成概念及进行计算的方法。

费恩曼是一位卓越的教育家。在他获得的所有奖项中,他对1972年获得的奥斯特教学奖章特别感到自豪。在1963年第一次出版的《费恩曼物理学讲义》被《科学美国人》杂志的一位评论员描写为“难啃的但却富于营养并且津津有味。25年后它仍是教师和最优秀的初学学生的指导书”。为了使外行的公众增加对物理学的了解,费恩曼博士写了《物理定律和量子电动力学的性质:光和物质的奇特理论》。他还是许多高级出版物的作者,这些都成为研究人员和学生的经典参考书和教科书。

费恩曼是一个活跃的公众人物。他在挑战者号调查委员会里的工作是众所周知的,特别是他的著名的O型环对寒冷的敏感性的演示,这是一个优美的实验,除了一杯冰水和C形钳以外其他什么也不需要。费恩曼博士1960年在加利福尼亚州课程促进会中的工作却很少人知道,他在会上指责教科书的平庸。

仅仅罗列费恩曼的科学和教育成就还没有充分抓住这个人物的本质。即使是他的最技术性的出版物的读者都知道,费恩曼活跃的多面的人格在他所有的工作中都闪闪发光。除了作为物理学家,在各种不同的时候:他是无线电修理工,是锁具收藏家、艺术家、舞蹈家、邦戈(bongo)鼓手,以至玛雅象形文字的破译者。他的世界是永远的好奇,他是一个典型的经验主义者。

费恩曼于1988年2月15日在洛杉矶逝世。

新千年版前言

自理查德·费恩曼在加利福尼亚理工学院讲授物理学导论课程以来,已经过去快 50 年了。这次讲课产生了这三卷《费恩曼物理学讲义》。在这 50 年中,我们对物理世界的认识已经大大改变了,但是《费恩曼物理学讲义》的价值仍旧存在。由于费恩曼对物理学独到的领悟和教学方法,费恩曼的讲义今天仍像第一次出版时那样具有权威性。这些教本已在全世界范围内被初学者,也被成熟的物理学家研读;它们已被翻译成至少 12 种语言,仅仅英语的印刷就有 150 万册以上。或许至今为止还没有其他物理学书籍有这样广泛的影响。

新千年版迎来了《费恩曼物理学讲义 (FLP)》的新时代:21 世纪的电子出版物时代。FLP 改变为 eFLP,本文和方程式用 $\text{\LaTeX}$ 电子排字语言表示,所有的插图用现代绘图软件重画。

这一版的印刷本的效果并没有什么特别之处,它看上去几乎完全和学物理的学生都已熟悉并热爱的最初的红色书一样。主要的差别在于扩大并改进了的索引,以前的版本第一次印刷以来的 50 年内读者们发现的 885 篇错误的改正,以及改正未来的读者可能发现的错误的便利。关于这一点我以后还要谈到。

这一版的电子书版本以及加强电子版不同于 20 世纪的大多数技术书籍的电子书,如果把这种书籍的方程式、插图、有时甚至包括课文,放大以后都成为多个像素。新千年版的 $\text{\LaTeX}$ 稿本有可能得到最高质量的电子书,书页上的所有的面貌特征(除了照片)都可以无限制地放大而始终保持其精确的形状和细锐度。带有费恩曼原初讲课的声音和黑板照相、还带有和其他资源的联接的加强电子版是新事物,(假如费恩曼还在世的话)这一定会使他极其高兴。*

费恩曼讲义的回忆

这三卷书是一套完备的教科书。它们也是费恩曼在 1961—1964 年给本科生上物理学课的历史记录,这是加利福尼亚理工学院的一年级和二年级学生,无论他们主修什么课程,都必须上的一门课。

读者们可能和我一样很想知道,费恩曼的讲课对听课的学生的影响如何。费恩曼在这几本书的前言中提供了多少有些负面的看法。他写道:“我不认为我对学生做得很好”。马修·桑兹在他的《费恩曼物理学指导手册》的回忆文章中给出了完全正面的观点。出于好

* 原文“*What would have given Feynman great pleasure*”是虚拟式的句子,中文没有相当于英语虚拟式的句法,所以加上括号内的句子。——译者注

奇,2005年春天,我和从费恩曼1961—1964班级(大约150个学生)中半随机地挑选一组17位学生通过电子邮件或面谈联系——这些学生中有些在课堂上有很大的困难,而有一些很容易掌握课程;他们主修生物学,化学,工程,地理学,数学及天文学,还包括物理学。

经过了这些年,可能已经在他们的记忆中抹上了欣快的色彩,但大约有80%回忆起费恩曼的讲课觉得是他们大学时光中精彩的事件。“就像上教堂。”听课是“一个变形改造的经历”,“一生的重要阅历,或许是我从加利福尼亚理工学院得到的最重要的东西。”“我是一个主修生物学的学生,但费恩曼的讲课在我的本科生经历中就像在最高点一样突出……虽然我必须承认当时我不会做家庭作业并且总是交不出作业。”“我当时是课堂上最没有希望的学生之一,但我从不缺一堂课……我记得并仍旧感觉到费恩曼对于发现的快乐……他的讲课具有一种……感情上的冲击效果,这在印刷的讲义中可能失去了。”

相反,好些学生,主要由于以下两方面问题,而具有负面的记忆。(i)“你无法通过上课学会做家庭作业。费恩曼太灵活了——他熟知解题技巧和可以作哪些近似,他还具有基于经验和天赋的直觉,这是初学的学生所不具备的。”费恩曼和同事们在讲课过程中知道这一缺陷,做了一些工作,部分材料已编入《费恩曼物理学指导手册》:费恩曼的三次习题课以及罗伯特·莱顿和罗各斯·沃格特(Rochus Vogt)选编的一组习题和答案。(ii)由于不知道下一节课可能会讨论什么内容产生一种不安全感,缺少与讲课内容有任何关系的教科书或参考书,其结果是我们无法预习,这是十分令人丧气的……我发现在课堂上的演讲是令人激动但却是很难懂,但(当我重建这些细节的时候发现)它们只是外表上像梵文一样难懂。当然,有了这三本《费恩曼物理学讲义》,这些问题已经得到了解决。从那以后的许多年,它们就成了加州理工学院学生学习的教科书,直到今天它们作为费恩曼的伟大遗产还保持着活力。

改错的历史

《费恩曼物理学讲义》是费恩曼和他的合作者罗伯特·莱顿及马修·桑兹非常仓促之中创作出来的,根据费恩曼的讲课的录音带和黑板照相(这些都编入这新千年版的增强电子版)加工扩充而成*。由于要求费恩曼、莱顿和桑兹高速度工作,不可避免地有许多错误隐藏在第一版中。在以后几年中,费恩曼收集了加州理工学院的学生和同事以及世界各地的读者发现的、长长的、确定的错误列表。在20世纪60年代和70年代早期,费恩曼在他的紧张的生活中抽出时间来核实第1卷和第2卷中确认的大多数,不是全部错误,并在以后的印刷中加入了勘误表。但是费恩曼的责任感从来没有高到超过发现新事物的激情而促使他处理第3卷中的错误。**在1988年他过早的逝世后,所有三卷的勘误表都存放到加州理工学院档案馆,它们躺在那里被遗忘了。

* 费恩曼的讲课和这三本书的起源的说法请参阅这三本书每一本都有的《费恩曼自序》和《前言》,也可参看《费恩曼物理学指导手册》中马修·桑兹的回忆以及1989年戴维·古德斯坦(David Goodstein)和格里·诺格鲍尔(Gerry Neugebauer)撰写的《费恩曼物理学讲义纪念版》特刊前言,它也刊载在2005年限定版中。

** 1975年,他开始审核第3卷中的错误,但被其他事情所分心,因而没有完成这项工作,所以没有作出勘误。

2002年,拉尔夫·莱顿(Ralph Leighton)(已故罗伯特·莱顿的儿子,费恩曼的同胞)告诉我,拉尔夫的朋友迈克尔·戈特里勃(Michael Gottlieb)汇编了老的和长长的新的勘误表。莱顿建议加州理工学院编纂一个改正所有错误的《费恩曼物理学讲义》的新版本,并将他和戈特里勃当时正在编写的新的辅助材料——《费恩曼物理学指导手册》一同出版。

费恩曼是我心目中的英雄,也是亲密的朋友。当我看到勘误表和提交的新的一卷的内容时,我很快就代表加州理工学院(这是费恩曼长时期的学术之家,他、莱顿和桑兹已将《费恩曼物理学讲义》所有的出版权利和责任都委托给她了)同意了。一年半以后,经过戈特里勃细微工作和迈克尔·哈特尔(Micheal Hartl)(一位优秀的加州理工学院博士后工作者,他审校了加上新的一卷的所有的错误)仔细的校阅,《费恩曼物理学讲义》的2005限定版诞生了,其中包括大约200处勘误。同时发行了费恩曼、戈特里勃和莱顿的《费恩曼物理学指导手册》。

我原来以为这一版是“定本”了。出乎我意料的是全世界读者热情响应。戈特里勃呼吁大家鉴别出更多错误,并通过创建的费恩曼讲义网站 www.feynmanlectures.info 提交给他。从那时起的五年内,又提交了965处新发现的错误,这些都是从戈特里勃、哈特尔和纳特·博德(Nate Bode)(一位优秀的加州理工学院研究生,他是继哈特尔之后的加州理工学院的错误检查员)的仔细校对中遗漏的。这些965处被检查出来的错误中80处在《定本》的第四次印刷(2006年8月)中改正了,余下的885处在这一新千年版的第一次印刷中被改正(第1卷中332处,第2卷中263处,第3卷200处)*,这些错误的详情可参看 www.feynmanlectures.info。

显然,使《费恩曼物理学讲义》没有错误已成为全世界的共同事业。我代表加州理工学院感谢2005年以来作了贡献的50位读者以及更多的在以后的年代里会作出贡献的读者。所有贡献者的名字都公示在 www.feynmanlectures.info/flp-errata.html 上。

几乎所有的错误都可分为三种类型:(i)文字中的印刷错误;(ii)公式和图表中的印刷和数学错误——符号错误,错误的数字(例如,应该是4的写成5),缺失下标、求和符号、括号和方程式中一些项;(iii)不正确的章节、表格和图的参见条目。这几种类型的错误虽然对成熟的物理学家来说并不特别严重,但对于初识费恩曼的学生,就可能造成困惑和混淆。

值得注意的是,在我主持下改正的1165处错误中只有不多几处我确实认为是真正物理上的错误。一个例子是第二卷,5—9页上一句话,现在是“……接地的封闭导体内部没有稳定的电荷分布不会在外部产生[电]场”(在以前的版本中漏掉了接地一词)。这一错误是好些读者都曾向费恩曼指出过的,其中包括威廉和玛丽学院(The College of William and Mary)学生比尤拉·伊丽莎白·柯克斯(Beulah Elizabeth Cox),她在一次考试中依据的是费恩曼的错误的段落。费恩曼在1975年给柯克斯女士的信中写道:“你的导师不给你分数是对的,因为正像他用高斯定律证明的那样,你的答案错了。在科学中你应当相信逻辑和论据、仔细推理而不是权威。你也正确阅读和理解了书本。我犯了一个错误,所以书错了。当时我或许正想着一个接地的导电球体,或别的;使电荷在(导体球)内部各处运动而不影响外部的事物。我不能确定当时是怎样做的。但我错了。你由于信任我也错了。”**

* 原版如此。——译者注

** 《与习俗完全合理的背离,理查德·P·费恩曼的信件》288~289页,米歇尔·费恩曼(Michelle Feynman)编,Basic Books,纽约,2005。

这一新千年版是怎样产生的

2005年11月到2006年7月之间,340个错误被提交到费恩曼讲义网站 www.feynmanlectures.info。值得注意的是,其中大多数来自鲁道夫·普法伊弗(Rudolf Pfeiffer)博士一个人:当时是奥地利维也纳大学的物理学博士后工作者。出版商艾迪生·卫斯利(Addison Wesley),改正了80处错误,但由于费用的缘故而没有改正更多的错误:由于书是用照相胶印法印刷的,用1960年代版本书页的照相图出版印刷。改正一个错误就要将整个页面重新排字并要保证不产生新的错误,书页要两个不同的人分别各排一页,然后由另外几个人比较和校读——如果有几百个错误要改正,这确是一项花费巨大的工作。

戈特里勃、普法伊弗和拉尔夫·莱顿对此非常不满意,于是他们制定了一个计划,目的是便于改正所有错误,另一目的是做成电子书的《费恩曼物理学讲义》的加强电子版。2007年,他们将他们的计划向作为加州理工学院的代理人的我提出,我热心而又谨慎。当我知道了更多的细节,包括《加强电子版本》中一章的示范以后,我建议加州理工学院和戈特里勃、普法伊弗及莱顿合作来实现他们的计划。这个计划得到三位前后相继担任加州理工学院物理学、数学和天文学学部主任——汤姆·汤勃列罗(Tom Tomlrello)、安德鲁·兰格(Andrew Lange)和汤姆·索伊弗(Tom Saifer)——的支持;复杂的法律手续及合同细节由加州理工学院的知识产权法律顾问亚当·柯奇伦(Adam Cochran)完成。《新千年版》的出版标示着该计划虽然很复杂但已成功地得到执行。尤其是:

普法伊弗和戈特里勃已将所有三卷《费恩曼物理学讲义》(以及来自费恩曼的课程并收入《费恩曼物理学指导书》的1000多道习题)转换成 $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ 。《费恩曼物理学讲义》的图是在书的德文译者亨宁·海因策(Henning Heinze)的指导下,为用于德文版,在印度用现代的电子方法重画的。为了将海因策的插图的非独家使用于新千年英文版,戈特里勃和普法伊弗购买了德文版[奥尔登博(Oldenbourg)出版]的 $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ 方程式的非独家的使用权,普法伊弗和戈特里勃不厌其烦地校对了所有 $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ 文本和方程式以及所有重画的插图,并必要时作了改正。纳特·博德和我代表加州理工学院对课文、方程式和图曾作过抽样调查,值得注意的是,我们没有发现错误。普法伊弗和戈特里勃是惊人的细心和精确。戈特里勃和普法伊弗为约翰·沙利文(John Sullivan)在亨丁顿实验室安排了将费恩曼在1962—1964年黑板照相数字化,以及乔治·布卢迪·奥迪欧(George Blood Audio)将讲课录音磁带数字化——从加州理工学院教授卡弗·米德(Carver Mead)获得财政资助和鼓励,从加州理工学院档案保管员谢利·欧文(Shelly Erwin)处得到后勤支持,并从柯奇伦处得到法律支持。

法律问题是严肃的。20世纪60年代,加州理工学院特许艾迪生·卫斯利发表印刷版的权利,20世纪90年代,给予分发费恩曼讲课录音和各种电子版的权利。在21世纪初,由于先后取得这些特许证,印刷物的权利转让给了培生(Pearson)出版集团,而录音和电子版转让给珀修斯(Perseus)出版集团。柯奇伦在一位专长于出版的律师艾克·威廉姆斯(Ike Williams)的协助下,成功将所有这些权利和珀修斯结合在一起,使这一新千年版成为可能。

鸣 谢

我代表加州理工学院感谢这许多使这一新千年版成为可能的人们。特别是,我感谢上面提到的关键人物:拉尔夫·莱顿,迈克尔·戈特里勃,汤姆·汤勃列罗,迈克尔·哈特尔,鲁道夫·普法伊弗,亨宁·海因策,亚当·柯奇伦,卡弗·米德,纳特·博德,谢利·欧文,安德鲁·兰格,汤姆·索伊弗,艾克·威廉姆斯以及提交错误的 50 位人士(在 www.feynmanlectures.info 中列出)。我也要感谢迈克尔·费恩曼(Michelle Feynman,理查德·费恩曼的女儿)始终不断的支持和建议,加州理工学院的艾伦·赖斯(Alan Rice)的幕后帮助和建议,斯蒂芬·普奇吉(Stephan Puchegger)和卡尔文·杰克逊(Calvin Jackson)给普法伊弗从《费恩曼物理学讲义》转为 $\text{\LaTeX}$ 的帮助和建议。迈克尔·菲格尔(Michael Figl)、曼弗雷德·斯莫利克(Manfred Smolik)和安德列斯·斯坦格尔(Andreas Stangl)关于改错的讨论,以及珀修斯的工作人员和(以前版本)艾迪生·卫斯利的工作人员。

基普·S·桑尼(Kip S. Thorne)

荣休理论物理费恩曼教授

加州理工学院

2010 年 10 月

费恩曼自序



这是我前年与去年在加利福尼亚理工学院对一二年级学生讲授物理学的讲义。当然,这本讲义并不是课堂讲授的逐字逐句记录,而是已经经过了编辑加工,有的地方多一些,有的地方少一些。我们的课堂讲授只是整个课程的一部分。全班 180 个学生每周两次聚集在大教室里听课,然后分成 15 到 20 人的小组在助教辅导下进行复习巩固。此外,每周还有一次实验课。

在这些讲授中,我们想要抓住的特殊问题是,要使充满热情而又相当聪明的中学毕业生进入加利福尼亚理工学院后仍旧保持他们的兴趣。他们在进入学院前就听说过不少关于物理学是如何有趣以及如何引人入胜——相对论、量子力学以及其他的新概念。但是,一旦他们学完两年我们以前的那种课程后,许多人就泄气了,因为教给他们意义重大、新颖的现代的物理概念实在太少。他们被安排去学习像斜面、静电学以及诸如此类的内容,两年过去,没什么收获。问题在于,我们是否有可能设置一门课程能够顾全那些比较优秀的、兴致勃勃的学生,使其保持求知热情。

我们所讲授的课程丝毫也不意味着是一门概况性的课程,而是极其严肃的。我想这些课程是对班级中最聪明的学生而讲的,并且可以肯定,这可能是对的,甚至最聪明的学生也无法完全消化讲课中的所有内容——其中加入了除主要讨论的内容之外的有关思想和概念多方面应用的建议。不过,为了这个缘故,我力图使所有的陈述尽可能准确,并在每种场合都指明有关的方程式和概念在物理学的主体中占有什么地位,以及——随着他们学习深入——应怎样作出修正。我还感到,重要的是要向这样的学生指出,他们应能理解——如果他们够聪明的话——哪些是从已学过的内容中推演出来的,哪些是作为新的概念而引进的。当出现新的概念时,假若这些概念是可推演的,我就尽量把它们推演出来,否则就直接说明这是一个新的概念,它根本不能用已学过的东西来阐明,也不可能予以证明,因而是直接引进的。

在讲授开始时,我假定学生们在中学已学过一些内容,如几何光学、简单的化学概念,等等。我也看不出有任何理由要按一定的次序来讲授。就是说没有详细讨论某些内容之前,不可以提到这些内容。在讲授中,有许多当时还没有充分讨论过的内容出现。这些内容比较完整的讨论要到以后学生的预备知识更齐全时再进行。电感和能级的概念就是例子,起先,只是以非常定性的方式引入这些概念,后来再进行较全面的讨论。

在针对那些较积极的学生的同时,我也要照顾到另一些学生,对他们来说,这些外加的五彩缤纷的内容和不重要的应用只会使其感到头痛,也根本不能要求他们掌握讲授中的大部分内容。对这些学生而言,我要求他们至少能学到中心内容或材料的脉络。即使他不理解一堂课中的所有内容,我希望他也不要紧张不安。我并不要求他理解所有的内容,只要求他理解核心的和最确切的面貌。当然,对他来说也应当具有一定的理解能力,来领会哪些是主要定理和主要概念,哪些则是更高深的枝节问题 and 应用,这些要过几年他才会理解。

在讲课过程中有一个严重困难:在课程的讲授过程中一点也没有学生给教师的反馈来指示讲授的效果究竟如何。这的确是一个很严重的困难,我不知道讲课的实际效果的好坏。整个事件实质上是一种实验。假如要再讲一次的话,我将不会按同样的方式去讲——我希望我不会再来一次!然而,我想就物理内容来说,第一年的情形看来还是十分满意的。

但在第二年,我就不那么满意了。课程的第一部分涉及电学和磁学,我想不出什么真正独特的或不同的处理方法,也想不出什么比通常的讲授方式格外引人入胜的方法。因此在讲授电磁学时,我并不认为自己做了很多事情。在第二年末,我原来打算在电磁学后再多讲一些物性方面的内容,主要讨论这样一些内容如基本模式、扩散方程的解、振动系统、正交函数等等,并且阐述通常称为“数学物理方法”的初等部分内容。回顾起来,我想假如再讲一次的话,我会回到原来的想法上去,但由于没有要我再讲这些课程的打算,有人就建议介绍一些量子力学——就是你们将在第3卷中见到的——或许是有益的。

显然,主修物理学的学生们可以等到第三年学量子力学。但是,另一方面,有一种说法认为许多听我们课的学生是把学习物理作为他们对其他领域的主要兴趣的背景;而通常处理量子力学的方式对大多数学生来说这些内容几乎是无用的,因为他们必须花费相当长的时间来学习它。然而,在量子力学的实际应用中——特别是较复杂的应用中,如电机工程和化学领域内——微分方程处理方法的全部工具实际上是用不到的。所以,我试图这样来描述量子力学的原理,即不要求学生首先掌握有关偏微分方程的数学。我想,即使对一个物理学家来说,我想试着这样做——按照这种颠倒的方式来介绍量子力学——是一件有趣的事,由于种种理由,这从讲课本身或许会明白。不过我认为,在量子力学方面的尝试不是很成功,这主要是因为到最后我实际上已没有足够的时间(例如,我应该再多讲三四次来比较完整地讨论能带、概率幅的空间的依赖关系等这类问题)。而且,我过去从未以这种方式讲授过这部分课程,因此缺乏来自学生的反馈就尤其严重了。我现在相信,还是应当迟一些讲授量子力学。或许有一天我会有机会再来讲授这部分内容,到那时我将会讲好它。

在这本讲义中没有列入有关解题的内容,这是因为另有辅导课。虽然在第一年中,我的确讲授过三次关于怎样解题的内容,但没有将它们收在这里。此外,还讲过一次惯性导航,应该在转动系统后面,遗憾的是在这里也略去了。第五讲和第六讲实际上是桑兹讲授的,那时我正外出。

当然,问题在于我们这个尝试的效果究竟如何。我个人的看法是悲观的,虽然与学生接触的大部分教师似乎并不都有这种看法。我并不认为自己在对待学生方面做得很出色。当我看到大多数学生在考试中采取的处理问题的方法时,我认为这种方式是失败了。当然,朋友们提醒我,也有一二十个学生——非常出人意外地——几乎理解讲授的全部内容,并且非常积极地攻读有关材料,兴奋地、感兴趣地钻研许多问题。我相信,这些学生现在已具备了一流的物理基础,他们毕竟是我想要培养的学生。但是,“教育之力量鲜见成效,除非施之于天资敏悟者,然若此又实为多余。”[吉本(Gibbon)*]

但是,我并不想使任何一个学生完全落在后面,或许我曾经这样做的。我想,我们能够更好地帮助学生的一个办法是,多花一些精力去编纂一套能够阐明讲课中的某些概念的习题。习题能够充实课堂讲授,使讲过的概念更加实际,更加完整和更加易于牢记。

* Edward Gibbon (1737—1794), 英国历史学家。——译者注

然而,我认为要解决这个教育问题就要认识到最佳的教学只有当学生和优秀的教师之间建立起个人的直接关系,在这种情况下,学生可以讨论概念、考虑问题、谈论问题,除此之外,别无他法。仅仅坐在课堂里听课或者只做指定的习题是不可能学到许多东西的。但是,现在我们有这么多学生要教育,因此我们必须尽量找出一种代替理想情况的办法。或许,我的讲义可以作出一些贡献;也许在某些小地方有个别教师和学生会从讲义中受到一些启示或获得某些观念,当他们彻底思考讲授内容,或者进一步发展其中的一些想法时,他们或许会得到乐趣。

R. P. 费恩曼

1963 年 6 月

前言

20 世纪物理学的伟大成就,量子力学理论,现在已经近 40 岁了。我们到现在一般还一直在物理学课程中给我们的学生安排物理学引论的课程(对有些学生来说还是最后的物理课)。对我们物理世界知识的这一中心部分充其量只是简单地提一提。我们应当比这做得更好一些。我的意图是在这些讲课中希望以学生能理解的方式提供给他们量子力学的基本的和最重要的概念。你们将发现这里的方法是新型的,特别是对二年级学生课程的水平来说是新的,并且我们更多地是把它当作一次实验。然而,在看到一些学生是如何容易地接受它以后,我相信实验是成功的。当然,还有需要改进的地方,这将在有更多的课堂经验以后会得到。你们在这里看到的是这第一次实验的记录。

从 1961 年 9 月到 1963 年 5 月在加州理工学院作为物理学引论课程,连续两年的费恩曼物理教程中,正当需要靠它来理解所描写的现象的时候,量子物理学的概念就被引入了。此外,第二学年的最后 12 讲全部用来更有条理地介绍一些量子力学概念。然而,在讲座接近尾声的时候,才搞清楚已没有足够的时间留给量子力学了。在准备材料的时候,不断地发现其他一些重要和有兴趣的题目可以用已经发展的基本工具来处理。也担心第 12 章中薛定谔函数的过分简单的处理不能为学生在可能会去研读的许多书籍中更加传统的处理方法间架起足够的桥梁。因此决定扩展另外一组 7 次讲座;他们是在 1964 年 5 月给二年级学生讲的。这些讲演进一步解释并扩展了在前几章中已有的某些材料。

在这一卷中,我们将两年中的演讲汇集在一起,并将次序作了一些调整。此外,原来是给一年级讲的两次介绍量子物理学的演讲全部从第 1 卷中(在那里是第 37 和 38 章)移过来放在本卷中作为第 1、2 章——使这一卷成为独立的单位,相对独立于前面两卷。几个关于角动量量子化的概念(包括施特恩-格拉赫实验的讨论)已经在第 2 卷的第 34 和 35 章中介绍过了,我们假定对它们已经熟悉了;〔为那些手头没有第 2 卷的读者的方便起见,这两章重印在本卷中作为附录。〕

这一系列讲座从一开始就试图阐明量子力学的最基本、最普遍的特征。第一次讲课一上来就讨论概率振幅、振幅干涉、状态的抽象符号、叠加以及状态的分解等概念——并且从一开始就使用狄拉克符号。在每一情况中,概念是和对某些特定例子详细讨论一同引进的——为使物理概念尽可能地实在。接着讨论包括确定能量状态在内的状态对时间的依赖,这些概念立即被应用于研究双态系统。氨微波激光器的详细讨论提供了引进辐射吸收及感应跃迁的框架。讲演接着进一步考虑更复杂的系统,直到讨论电子在晶体中的传播,以及对更复杂的角动量的量子力学处理。我们对量子力学的介绍在第 20 章中讨论到薛定谔波函数、它的微分方程以及对氢原子的解为结束。

这一卷的最后一章并不打算作为“课程”的一部分。它是关于超导的“专题讨论”,是按

照前两卷中某些兴趣性的讲演的精神作的,期望给学生开启有关他们正在学习的内容与普遍物理文化的关系的宽阔视野。费恩曼的“结束语”是这3卷书的句号。

正如在第1卷前言中所说的,这些演讲是在物理课程修订委员会[莱顿、内尔(V. Neher)和桑兹]指导下,加利福尼亚理工学院所做的发展新的引论课程计划的一个方面。在福特基金会的资助下计划得以进行。许多人帮助准备了这一卷的技术细节:克雷顿(M. Clayton)、库乔(J. Curcio)、哈特尔(J. Hartle)、哈尔维(T. Harvey)、伊斯雷尔(M. Israel)、普里乌斯(P. Preuss)、沃伦(F. Warren)和齐莫曼(B. Zimmerman)、诺伊格鲍尔(G. Neugebauer)教授和威尔兹(C. Wilts)仔细审阅了大部分手稿,使材料更加准确和清楚。

不过,你将在这里发现的量子力学故事是属于费恩曼的。如果我们只要能够给其他人带来一些智力的激动,这是当我们领会到在他的现实的物理学讲座中展开的思想时所体验到的,我们的劳动就没有白费。

M. 桑兹

1964年12月

目 录

第 1 章 量子行为	1	§ 5-1 用施特恩-格拉赫装置过滤 原子	54
§ 1-1 原子力学	1	§ 5-2 过滤原子的实验	59
§ 1-2 子弹的实验	1	§ 5-3 串联施特恩-格拉赫过 滤器	60
§ 1-3 波的实验	3	§ 5-4 基础态	62
§ 1-4 电子的实验	4	§ 5-5 干涉的振幅	64
§ 1-5 电子波的干涉	6	§ 5-6 量子力学的处理方法	67
§ 1-6 监视电子	7	§ 5-7 变换到不同的基	69
§ 1-7 量子力学的第一原理	10	§ 5-8 其他情况	71
§ 1-8 不确定性原理	11	第 6 章 自旋 $1/2$	73
第 2 章 波动观点与粒子观点的 关系	13	§ 6-1 变换振幅	73
§ 2-1 概率波振幅	13	§ 6-2 变换到转动坐标系	75
§ 2-2 位置与动量的测量	14	§ 6-3 绕 z 轴的转动	78
§ 2-3 晶体衍射	17	§ 6-4 绕 y 轴转动 180° 和 90°	81
§ 2-4 原子的大小	19	§ 6-5 绕 x 轴的转动	84
§ 2-5 能级	20	§ 6-6 任意的旋转	86
§ 2-6 哲学含义	21	第 7 章 振幅对时间的依赖关系	89
第 3 章 概率幅	24	§ 7-1 静止的原子;定态	89
§ 3-1 振幅组合定律	24	§ 7-2 匀速运动	91
§ 3-2 双缝干涉图样	28	§ 7-3 势能;能量守恒	94
§ 3-3 在晶体上的散射	31	§ 7-4 力;经典极限	97
§ 3-4 全同粒子	33	§ 7-5 自旋 $1/2$ 粒子的“进动”	99
第 4 章 全同粒子	37	第 8 章 哈密顿矩阵	103
§ 4-1 玻色子和费米子	37	§ 8-1 振幅与矢量	103
§ 4-2 两个玻色子的状态	39	§ 8-2 态矢量的分解	105
§ 4-3 n 个玻色子的状态	42	§ 8-3 世界的基础态是什么?	107
§ 4-4 光子的发射和吸收	44	§ 8-4 状态怎样随时间而变	109
§ 4-5 黑体光谱	45	§ 8-5 哈密顿矩阵	112
§ 4-6 液氦	49	§ 8-6 氨分子	113
§ 4-7 不相容原理	50	第 9 章 氨微波激光器	118
第 5 章 自旋 1	54		

§ 9-1	氨分子的状态	118	§ 13-6	在不完整的晶格上的 散射	204
§ 9-2	静电场中的分子	122	§ 13-7	被晶格的不完整性陷阱 ...	206
§ 9-3	在随时间变化的场中的 跃迁	126	§ 13-8	散射振幅和束缚态	207
§ 9-4	共振跃迁	129	第 14 章	半导体	209
§ 9-5	偏离共振的跃迁	131	§ 14-1	半导体中的电子和空穴 ...	209
§ 9-6	光的吸收	132	§ 14-2	掺杂的半导体	212
第 10 章	其他双态系统	134	§ 14-3	霍尔效应	215
§ 10-1	氢分子离子	134	§ 14-4	半导体结	216
§ 10-2	核力	139	§ 14-5	半导体结的整流	218
§ 10-3	氢分子	141	§ 14-6	晶体管	220
§ 10-4	苯分子	144	第 15 章	独立粒子近似	222
§ 10-5	染料	146	§ 15-1	自旋波	222
§ 10-6	磁场中自旋 $1/2$ 粒子的 哈密顿	146	§ 15-2	双自旋波	225
§ 10-7	磁场中自旋的电子	149	§ 15-3	独立粒子	227
第 11 章	再论双态系统	152	§ 15-4	苯分子	228
§ 11-1	泡利自旋矩阵	152	§ 15-5	其他有机化学分子	232
§ 11-2	作为算符的自旋矩阵	157	§ 15-6	近似方法的其他应用	235
§ 11-3	双态方程的解	160	第 16 章	振幅对位置的依赖关系	237
§ 11-4	光子的偏振态	161	§ 16-1	一维情形的振幅	237
§ 11-5	中性 K 介子	165	§ 16-2	波函数	240
§ 11-6	对 N 态系统的推广	173	§ 16-3	具有确定动量的态	243
第 12 章	氢的超精细分裂	177	§ 16-4	对 x 的态的归一化	245
§ 12-1	由两个自旋 $1/2$ 粒子组 成的系统的基础态	177	§ 16-5	薛定谔方程	247
§ 12-2	氢原子基态的哈密顿	179	§ 16-6	量子化能级	250
§ 12-3	能级	183	第 17 章	对称性和守恒定律	254
§ 12-4	塞曼分裂	185	§ 17-1	对称性	254
§ 12-5	在磁场中的态	189	§ 17-2	对称与守恒	257
§ 12-6	自旋 1 粒子的投影 矩阵	192	§ 17-3	守恒定律	261
第 13 章	在晶格中的传播	195	§ 17-4	偏振光	263
§ 13-1	电子在一维晶格中的 状态	195	§ 17-5	Δ^0 的衰变	265
§ 13-2	确定能量的状态	197	§ 17-6	转动矩阵概要	270
§ 13-3	与时间有关的状态	200	第 18 章	角动量	272
§ 13-4	三维晶格中的电子	202	§ 18-1	电偶极辐射	272
§ 13-5	晶格中的其他状态	203	§ 18-2	光散射	274
			§ 18-3	电子偶素的湮没	276
			§ 18-4	任意自旋的转动矩阵	281
			§ 18-5	测量核自旋	285
			§ 18-6	角动量的合成	286