



费恩曼 物理学讲义

The Feynman

LECTURES ON PHYSICS

(第2卷) [美] 费恩曼 (R.P.Feynman) 莱顿 (R.B.Leighton) 桑兹 (M.Sands) 著
李洪芳 王子辅 钟万蘅 译

上海科学技术出版社



The Feynman Lectures on Physics (Volume II)

费恩曼物理学讲义

第 2 卷

[美] 费恩曼 (R. P. Feynman)

莱顿 (R. B. Leighton) 著

桑兹 (M. Sands)

李洪芳 王子辅 钟万蘅 译

上海科学技术出版社

图书在版编目 (C I P) 数据

费恩曼物理学讲义. 第2卷 / (美) 费恩曼, (美) 莱顿, (美) 桑兹著; 李洪芳, 王子辅, 钟万衡译.

上海: 上海科学技术出版社, 2005.6

ISBN 7-5323-7874-8

I. 费... II. ①费...②莱...③桑...④李...⑤王...
⑥钟... III. ①普通物理学-教材②电磁学-教材
IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 134241 号

世纪出版集团 出版、发行
上海科学技术出版社

(上海瑞金二路 450 号 邮政编码 200020)

新华书店上海发行所经销

上海新华印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 39.25

字数 931 000

2005 年 6 月第 1 版

2005 年 6 月第 1 次印刷

印数 1—3 500

定价: 85.00 元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题,
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数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》.本讲义共分三卷,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,此外还有弹性、流体的流动及弯曲空间等内容,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——相对论和量子力学做了系统的介绍,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做出深刻的叙述.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,它在一定程度上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,避免运用高深烦琐的数学方程,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.为此我们特将此书译成中文,以飨读者.

原书第一版发行后,深受广大读者欢迎.1989年,为了纪念费恩曼教授逝世一周年,编者重新出版了本书,并加了新的序言及介绍费恩曼生平的短文.本卷在课程内容上则增加了弯曲空间一章,使得《费恩曼物理学讲义》这套书的内容更为完整.我们按照新版的原本进行了翻译.

本书中的费恩曼自序由郑永令在吴子仪译稿的基础上重译,前言由李洪芳翻译,潘笃武校阅,关于费恩曼和《费恩曼物理学讲义》另序由潘笃武翻译.本卷正文由李洪芳、钟万衡在王子辅译稿的基础上重新翻译,第42章由郑永令校阅.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
2004年11月

关于费恩曼

费恩曼 1918 年生于布鲁克林区,1942 年在普林斯顿获得博士学位. 第二次世界大战期间在洛斯阿拉莫斯, 尽管当时他还很年轻, 但已在曼哈顿计划中发挥了重要作用. 此后, 他在康奈尔大学和加利福尼亚理工学院任教. 1965 年, 因他在量子电动力学方面的工作和朝永振一郎及施温格(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. 他也创立了说明液氦中超流动性现象的数学理论. 此后, 他和盖尔曼(M. Gell-Mann)在 β 衰变等弱相互作用领域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, 提出了他的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. 在他获得的许多奖项中, 他对 1972 年获得的奥斯特(Oersted)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“咬不动但富于营养并且津津有味. 25 年后它仍是教师和最好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.

费恩曼是一位活跃的公众人物. 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, 那是一个优美的实验, 除了一杯冰水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, 他在会上抨击了教材的平庸.

仅仅罗列费恩曼的科学和教育成就并没有恰当地抓住这个人物的本质. 即使是他的最最技术性的出版物读者都知道, 费恩曼活跃的多面性格在他所有的工作中都闪闪发光. 除了作为物理学家, 在各种不同的场合下他变成不同的人物, 有时是无线电修理工, 有时是锁具收藏家、艺术家、舞蹈家、邦戈(bongo)鼓手, 甚至玛雅象形文字的解释者. 对他的世界人们永远好奇, 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.

《费恩曼物理学讲义》另序

费恩曼的名声到他生命终结的时候,业已超出了科学界的圈子.作为调查“挑战者”号航天飞机灾难的委员会成员,他的贡献使他频繁地露面;同样,关于他的流浪冒险的一本畅销书使他成为几乎可与爱因斯坦相媲美的民间英雄.但即使回溯到1961年,在他获诺贝尔奖而增加他在公众中的知名度以前,费恩曼已经不只是科学界的名人——他还是一位传奇人物.毋庸置疑,他在教学方面的非凡能力也为费恩曼的传奇增添了色彩.

他是一位真正伟大的教师,或许是我们这个时代的最伟大的一位.对于费恩曼来说,讲堂就是戏院,演讲者就是演员,他有责任演出有趣的戏剧,并且也要提供事实与图像.他在教室前面来回走动,挥舞着手臂,“理论物理学家和马戏场门口招揽观众的吆喝者的不可思议的组合,他会运用全身运动和声音的效果”,《纽约时报》这样描绘他.无论他演讲的听众是学生、同事或一般公众,对这些人来说能亲自聆听费恩曼的演讲是极大的幸运,这种经验通常是极不寻常的,并且也总是不会被忘记的,就像对他本人的印象一样.

他是令人感动的戏剧大师,善于吸引演讲厅中每个听众的注意.许多年以前,他教授高等量子力学课程,在一个很大的教室里坐满了少数注册的研究生和大部分加州理工学院的物理教师.在一堂课上,费恩曼开始讲解怎样用图解来表示某些复杂的积分:时间在这个轴上,空间在那个轴上,绕这条直线摆动的曲线,等等.讲完了从费恩曼图可以知道物理世界的什么东西后,他转过身来面向听众诡谲地大笑:“这就是我们所说的图解!”费恩曼讲完了,已经到达戏剧性的结局,演讲厅里爆发出自发的欢呼.

在讲了形成本书的课程以后许多年,费恩曼有时也还常常担任加利福尼亚理工学院一年级学生的客座讲师.很自然,他的出现事先都必须保密,以保证注册的学生在演讲厅里都有位子.有一次演讲的主题是弯曲的时空,费恩曼的讲课总是个性鲜明.不能忘却的时刻是在讲课开始的时候.当时1987年的超新星刚刚发现,费恩曼对此感到非常兴奋.他说:“第谷·布拉赫有他的超新星,开普勒也有他的超新星.在以后400年中没有发现任何超新星.但是现在我也有了我的超新星.”演讲厅内一点声音也没有,费恩曼继续说:“银河系中有 10^{11} 颗恒星.这在以前曾被看作是一个极大的数目,但它只不过是一千亿,它比国家财政赤字还小!我们以前总是把它称为天文数字,现在我们该说它们是经济数字.”演讲厅里爆发出一阵大笑,费恩曼吸引了他的听众,再继续讲他的课.

撇开吸引听众的窍门不谈,费恩曼的教学技术是很简单的.他的教学哲学的总结可以在加利福尼亚理工学院档案馆内他的论文中找到,1952年他在巴西时为他自己草写的笔记中写道:

“首先要搞清你为什么要学生学习这个题目以及你要他们知道什么,方法多少是常识判断的结果.”

“常识”给费恩曼的常常是能完全抓住他的论点本质的充满才华的新花样.有一次,在一

个对公众的演讲中,他试图解释为什么不能使用一开始就用来暗示某一思想的同样的数据来证明这个思想.费恩曼看来离开了主题,开始谈到汽车牌照:“你们可知道今天晚上我遇到的最不可思议的事是什么?当我到这儿来演讲的时候,我穿过停车场走进来.你们不会相信我遇到了什么.我看见一辆牌照是 ARW357 的汽车.你想象得到吗?在这个州的几百万汽车牌照里面我在今天晚上恰巧看到这一张牌照的机会是多大?真是不可思议!”甚至许多科学家都不能把握的一点是,费恩曼能用像他那样的非凡的“常识”把问题说清楚.

在加利福尼亚理工学院的 35 年(1952—1987)中,费恩曼被列在讲授过 34 门课程的教师名单中,其中 25 门课是高级的研究生课程,严格限于研究生,本科生除非得到允许才准参加(常常有本科生参加听课,他们差不多总是得到批准).其余的主要是研究生的基础课.费恩曼只有一次纯粹为本科生讲授课程,那是在 1961—1962 年和 1962—1963 年两个学年中的重大事件.在 1964 年他又简单地重复讲授了一遍.他讲完这门课后,他的讲课录音就被整理成了《费恩曼物理学讲义》这本书.

当时在加利福尼亚理工学院有一种普遍情况,一年级和二年级大学生都逃避而不是积极选修必修的两年物理课.为了补救这种情况,学校要求费恩曼设计一系列讲座作为学生两年的课程,先是给一年级学生,然后是对同一班升到二年级的学生.当他同意的时候就立即决定这些演讲要记录下来出版.但后来发现这项任务之困难远远超出任何人的想象.写成可以出版的书籍需要他的同事以及对每一章作最后定稿的费恩曼本人都付出极大的劳动.

开设一门课程的基本条件都必须准备好.由于费恩曼只有他要讨论的题目的不明确的大纲,这一任务大大地复杂化了.这就是说,直到费恩曼站到坐满学生的讲堂前面开讲之前没有人知道他要讲些什么.协助他的加利福尼亚理工学院教授们尽最大努力仓促地处理必要的琐碎工作,例如编出家庭作业习题之类.

为什么费恩曼会花两年多的时间来从事一年级物理课教学的改革?我们只能推测,可能三个基本原因.一个是他喜爱有人听他演讲,这可为他提供比他习惯的研究生课程更大的讲堂.第二个原因是他真诚地关心学生,他只是认为教一年级大学生是应该做的重要事情.第三个或许也是最重要的理由是按照他的理解重新编排物理学体系的严峻挑战,通过讲课可以将它介绍给年轻学生.这是他的性格,也是他判断是不是真正懂得某件事情的标准.有一次加利福尼亚理工学院一位教师请他解释为什么自旋为 $1/2$ 的粒子服从费米-狄拉克统计.他正确地估价他的听课者后说:“我要准备一堂有关这类问题的大学一年级学生的课程.”但几天之后他又回来说:“你要知道我做不到.我无法将它归纳为一年级学生的水平.这意味着我们对它确实还不明白.”

将深奥的思想变成简单的、容易懂得的语言这一特性在整个《费恩曼物理学讲义》中处处都很明显地表现出来,但没有地方比他对量子力学的处理更加突出.对于狂热的爱好者来说,他所做的工作十分清楚.他向开始学习的学生介绍路径积分方法,这方法是他自己提出的,并使他解决了物理学中一些最深刻的问题.和其他成就一起,他那用路径积分的工作导致他和施温格及朝永振一郎共享 1965 年诺贝尔物理学奖.

穿过遥远记忆的帷幕,曾参加听课的学生和教师都认为,听费恩曼的两年物理课是一生中难忘的经历.但当时情况看来并非如此.许多学生害怕这课程,在课程进行过程中,注册的学生的出席率惊人地下降.但同时越来越多的教师和研究生开始参加听课.教室仍然满座,

费恩曼可能一点也不知道他已失去了他预期的一些听众. 但即使在费恩曼自己看来, 他的教育努力也不成功. 他在 1963 年的《讲义》的序言中写道: “我并不认为我对学生做得很出色.” 人们在重读这本书时, 有时会注意到费恩曼关注的不是他的年轻听众, 而是他的同事, “看着这里! 看我是怎样略施小计来解决这个问题的! 是不是清楚了?” 但即使他以为他正在浅易地给一年级和二年级大学生讲解, 但从他所说的内容获得最大收获的实际上并不是这些学生, 而是和他同样的人——科学家、物理学家和教授们——他们才是他的伟大成就的受益人. 这项成就不是别的, 就是通过费恩曼的新鲜而有活力的眼光观察物理学.

费恩曼不仅是一位伟大的教师, 他的天赋才能在于他是教师们的优秀教师. 假如认为《费恩曼物理学讲义》的目标是给济济一堂的本科大学生解物理习题用的, 他不能说已经获得了较好的成绩. 进而言之, 如果这本书的目的是作为引导性的大学教科书, 他不能说达到了他的目的. 然而, 这本书已译成 10 种不同语言并且还有四种双语版. 费恩曼本人认为, 他对物理学最重要的贡献不是量子电动力学, 或超流理论, 或极化子, 或部分子. 他的首要贡献是这三本书: 《费恩曼物理学讲义》. 这一信念完全证明了这套著名的图书的纪念版的意义.

D. L. 古德斯坦

G. 诺伊格鲍尔

加利福尼亚理工学院

1989 年 4 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，而是或多或少地经过编辑加工的。我们的课堂讲授只是整个课程的一个部分。180个学生每周两次聚集在大教室里听课，然后分成10到20人的小组由助教进行复习辅导。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——相对论、量子力学以及其他的新概念是如何有趣以及如何引人入胜。但是，一旦他们学完我们两年以前的那种课程后，许多人就泄气了，因为教给他们的很少是意义重大、新颖和现代的物理概念。他们所学习的只是斜面、静电学以及诸如此类的内容，两年过去，不免相当失望。因此，问题在于，我们是否能够设置一门课程来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不意味着仅仅介绍一些概况，而是需要极其认真对待的。我想这些课程是对班级中最聪明的学生讲的，并且可能的话，如果在主要内容之外再从各方面提出有关概念的应用，那么甚至最聪明的学生也无法完全消化讲课中的所有内容。不过，为了这个缘故，我试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整体中占有什么地位，以及随着学习的深入，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结论，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。

在开始讲授时，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。而且我看不出有任何理由要按一定的次序——也就是说在准备详细讨论某些内容之前，不得不提到这些内容——来讲授。在讲授中，我曾提到过许多内容，而没有进行充分讨论。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两个例子，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，我也希望照顾到另一些学生，对他们来说，所有这些外加的概念和附带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，我希望至少会有一个他们能学到手的中心内容或主要材料。即使他们中间的一位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，只要求他理解最核心和最直接的特征。当然，他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,哪些则是需要进一步发挥的枝节问题和应用,后者只有在以后他才会理解。

在讲课中出现的一个严重困难是:讲授的效果究竟如何?缺乏来自学生的任何反应.这的确是一个很严重的困难,我不知道讲课的实际效果有多大.整个事件实质上是一种尝试.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,第一年的情形还是不错的!

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处理方法.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讲一些物性方面的内容,主要讨论基本模式、扩散方程的解、振动系统、正交函数等等,并且阐述通常称为《数理方法》的初等部分内容.回顾起来,我想如果再讲一次的话,就必然要回到原来的想法上去,但由于没有要我再讲一次这种课程的打算,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再学量子力学.但是,另一方面,有一种说法认为许多听课的学生只是把学习物理作为他们学习其他专业的基础;而通常处理量子力学的方式使得大多数学生几乎无法利用这门学科,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,整个微分方程的处理方法实际上是用不到的.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,由于在讲课中会明了的种种理由,试图按照这种颠倒的方式来介绍量子力学也是一件有趣的事.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、概率幅的空间相倚性等这类问题).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.或许总有一天我还会有机会来讲授这部分内容,到那时我将尽量讲好它.

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,在转动系统后面还讲过一次惯性导航,遗憾的是在这里也略去了.第五讲和第六讲实际上是桑兹(M. Sands)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这样看.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第一流的物理基础,他们毕竟是我想要培养的学生.但是,这一点正如吉本斯(Gibbons)所指出的“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.”

或许我曾经把一些学生丢在一边,但是,我并不希望使任何一个学生完全落在后面.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批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.

然而,我认为要解决这个教育问题就要认识到只有当学生和优秀的教师之间建立起个人的直接联系,这时学生可以讨论概念、考虑问题、谈论问题,才能教好学好,除此之外,别无他法. 仅仅坐着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,也许他们乐于彻底思考讲授内容,或者乐于进一步发展其中的一些想法.

R. P. 费恩曼
1963年6月

前 言

近 40 年来,费恩曼一直把他的好奇心集中在物理世界产生的奥秘上,而把他的聪明才智全部用于探寻物理世界的混乱中的秩序.现在,他花了两年的心血和精力为低年级的学生讲授物理课.为了他们,他把自己知识的精华提取出来,并创造条件使他们有望在听课期间能够了解物理学家关于宇宙的图像.他把他卓越而清晰的思想、独创性和生气勃勃的思想方法以及演讲中富有感染力的热情都带到了他的讲授中.看到这些非同寻常之处是令人高兴的.

第一年的讲授构成了这套书第 1 卷的基础.在这第 2 卷中我们尽力对第二年讲授的部分录音做了整理加工,这部分内容是供 1962—1963 学年中大学二年级学生用的.第二学年讲授的其余部分将编辑成第 3 卷.

在第二年的讲授中,前面三分之二的的内容致力于对物理学中的电学和磁学部分做相当完整的处理.讲授的这种形式想要达到两个目的.首先,我们希望就这个物理学中极为重要的章节——从富兰克林的早期摸索,到贯穿麦克斯韦的伟大综合;从关于物质性质的洛伦兹电子论,到最后仍不能解决的电磁自能的两难处境问题——给学生一个完整的观念.其次,我们希望通过一开始引进矢量场的微分运算,从而为场论数学提供一个坚实的导论.为了强调数学方法普遍的统一性,有时把物理学其他部分的内容与它在电学中相类似的内容放在一起进行分析.我们不断设法把数学的普遍性讲透彻(相同的方程具有相同的解).同时,通过本课程所提供的各类练习和测验来加强这个观点.

继电磁学之后是弹性和流体的流动*,这两部分各有两章.每个部分的前面一章处理基本而实际方面的情况,后一章试图对这部分内容所涉及现象的整个范围给出一个概述.这四章完全可以略去不讲而不会有严重的损失,因为它们对第 3 卷来说并不全是必备的.

第二学年后大约四分之一的内容用于介绍量子力学.这些材料已经编入第 3 卷.

我们期望在编写这本费恩曼讲义中所记录的内容,要比仅仅提供他谈话录音做得更好一些.我们希望使得这个编写本尽可能清楚地阐述原始讲授中的根本思想.对于讲授的某些内容,可能仅对原始录音中的措辞做了较小的校正;对另外一些讲授内容,则需要对有关的材料做较大的改编和重新安排.有时感到为了使保留的内容变得更清晰和协调,应该添加一些新材料.在整个过程中,费恩曼教授不断地帮助和建议使我们受益良多.

在很紧的日程内要将一百多万字的口头语言转化成相互协调的课文,是一个非常艰巨的任务,尤其是随着新课程的采用,带来了其他繁重的负担——备课、会见和指导学生、设计练习和考试题目等等.许多人都被卷入到这个工作中来了.我相信,我们在某些场合已经能够描绘出原始作者费恩曼的真实形象——稍微修饰的肖像画;在另外的场合,还远没有达到这个理想情形.我们的成就应归功于所有帮助过我们的人.对于不足之处,我们表示抱歉.

* 在本书新版中,电磁学后面除弹性和流动的流体外,新增加了一章——弯曲空间.——译者

正如在第1卷编者的话中所详细说明的那样,这套讲义仅是加州理工学院课程改革委员会的莱顿(R. B. Leighton)主席、内尔(H. V. Neher)及桑兹(M. Sands)拟订和支持的教学大纲的一个方面,这个大纲得到福特基金会的财政资助。另外,对第2卷正文材料准备工作的不同方面提供帮助的有下列人员:考伊(T. K. Caughey)、克莱顿(M. L. Clayton)、柯西奥(J. B. Curcio)、哈特尔(J. B. Hartle)、哈维(T. W. H. Marvey)、伊斯雷尔(M. S. Israel)、卡泽斯(W. J. Karzas)、卡瓦诺(R. W. Kavanagh)、R. B. 莱顿、马修斯(J. Mathews)、普莱西特(M. S. Plesset)、沃伦(F. L. Warren)、惠林(W. Whaling)、威尔茨(C. H. Wilts)及齐默尔曼(B. Zimmerman)。由于他们的工作而对本课程做出间接贡献的其他人员有:布卢(J. Blue)、查普林(G. F. Chapline)、克劳泽(M. J. Clauser)、多伦(R. Dolen)、希尔(H. H. Hill)及蒂特勒(A. M. Title)。诺伊格鲍尔(G. Neugebauer)教授以他的勤奋、热心和极端负责为我们这个任务的各个方面做出了贡献。

然而,要不是费恩曼的非凡才能和勤奋,物理学上的这个故事就不存在了。

M. 莱顿
1964年3月

目 录

第 1 章 电磁学	1	§ 4-4 $E = -\nabla\phi$	46
§ 1-1 电力	1	§ 4-5 E 的通量	48
§ 1-2 电场和磁场	3	§ 4-6 高斯定理; E 的散度	51
§ 1-3 矢量场的特征	4	§ 4-7 带电球体的场	52
§ 1-4 电磁学定律	6	§ 4-8 场线; 等势面	52
§ 1-5 场是什么	10	第 5 章 高斯定律的应用	55
§ 1-6 科学技术中的电磁学	12	§ 5-1 静电学就是高斯定律加	55
第 2 章 矢量场的微分运算	13	55
§ 2-1 对物理学的理解	13	§ 5-2 静电场中的平衡	55
§ 2-2 标量场和矢量场—— T 与 h	14	§ 5-3 有导体时的平衡	56
§ 2-3 场的微商——梯度	16	§ 5-4 原子的稳定性	57
§ 2-4 算符 ∇	19	§ 5-5 线电荷的场	57
§ 2-5 ∇ 的运算	20	§ 5-6 面电荷; 平行板	58
§ 2-6 热流的微分方程	21	§ 5-7 带电球体; 球壳	60
§ 2-7 矢量场的二阶微商	22	§ 5-8 点电荷的场是否恰好 为 $1/r^2$	60
§ 2-8 陷阱	25	§ 5-9 孤立导体的场	63
第 3 章 矢量积分运算	27	§ 5-10 导体空腔内的场	64
§ 3-1 矢量积分; $\nabla\psi$ 的线积分	27	第 6 章 在各种情况下的电场	66
§ 3-2 矢量场的通量	29	§ 6-1 静电势的方程组	66
§ 3-3 来自小立方体的通量; 高斯定理	31	§ 6-2 电偶极子	67
§ 3-4 热传导; 扩散方程	33	§ 6-3 矢量方程述评	69
§ 3-5 矢量场的环流	35	§ 6-4 偶极子势的梯度表示	70
§ 3-6 围绕一正方形的环流; 斯托克斯定理	36	§ 6-5 任意电荷分布的偶极子近似	72
§ 3-7 无旋度场与无散度场	38	§ 6-6 带电导体的场	74
§ 3-8 总结	39	§ 6-7 镜像法	74
第 4 章 静电学	41	§ 6-8 导电平面附近的点电荷	75
§ 4-1 静电	41	§ 6-9 导电球体附近的点电荷	77
§ 4-2 库仑定律; 叠加原理	42	§ 6-10 电容器与平行极板	78
§ 4-3 电势	44	§ 6-11 高(电)压击穿	80
		§ 6-12 场致发射显微镜	81

第7章 在各种情况下的电场(续) 83	§ 12-1 相同的方程组具有相同的解..... 145
§ 7-1 求静电场的各种方法..... 83	§ 12-2 热流;无限大平面边界附近的点源..... 146
§ 7-2 二维场;复变函数..... 84	§ 12-3 绷紧的薄膜..... 149
§ 7-3 等离子体振荡..... 88	§ 12-4 中子扩散;均匀媒质中的均匀球形源..... 151
§ 7-4 电解质内的胶态粒子..... 90	§ 12-5 无旋流体的流动;从球旁经过的流动..... 154
§ 7-5 栅极的静电场..... 93	§ 12-6 照度;对平面的均匀照明..... 156
第8章 静电能 95	§ 12-7 自然界的“基本统一性”... 157
§ 8-1 电荷的静电能;均匀带电球..... 95	第13章 静磁学 159
§ 8-2 电容器的能量;作用于带电导体上的力..... 96	§ 13-1 磁场..... 159
§ 8-3 离子晶体的静电能..... 99	§ 13-2 电流;电荷守恒..... 159
§ 8-4 核内的静电能..... 101	§ 13-3 作用于电流上的磁力..... 161
§ 8-5 静电场中的能量..... 104	§ 13-4 恒定电流的磁场;安培定律..... 162
§ 8-6 点电荷的能量..... 107	§ 13-5 直导线与螺线管的磁场;原子电流..... 163
第9章 大气中的带电体 109	§ 13-6 磁场与电场的相对性..... 165
§ 9-1 大气的电势梯度..... 109	§ 13-7 电流与电荷的变换..... 170
§ 9-2 大气中的电流..... 110	§ 13-8 叠加原理;右手定则..... 171
§ 9-3 大气电流的来源..... 112	第14章 在各种不同情况下的磁场 173
§ 9-4 雷暴雨..... 113	§ 14-1 矢势..... 173
§ 9-5 电荷分离的机制..... 116	§ 14-2 已知电流的矢势..... 176
§ 9-6 闪电..... 119	§ 14-3 直导线..... 177
第10章 电介质 122	§ 14-4 长螺线管..... 178
§ 10-1 介电常量..... 122	§ 14-5 一个小电流回路的场;磁偶极子..... 180
§ 10-2 极化矢量 \mathbf{P} 124	§ 14-6 电路的矢势..... 182
§ 10-3 极化电荷..... 124	§ 14-7 毕奥-萨伐尔定律..... 182
§ 10-4 有电介质时的静电方程组..... 127	第15章 矢势 184
§ 10-5 有电介质时的场和力..... 129	§ 15-1 作用于—电流回路上的力;偶极子能量..... 184
第11章 在电介质内部 132	§ 15-2 机械能与电能..... 186
§ 11-1 分子偶极子..... 132	§ 15-3 恒定电流的能量..... 189
§ 11-2 电子极化强度..... 132	§ 15-4 \mathbf{B} 与 \mathbf{A} 的对比..... 190
§ 11-3 极性分子;取向极化..... 135	
§ 11-4 电介质空腔里的电场..... 137	
§ 11-5 液体的介电常数;克劳修斯-莫索提方程..... 139	
§ 11-6 固态电介质..... 140	
§ 11-7 铁电现象; BaTiO_3 141	
第12章 静电模拟 145	

§ 15-5	矢势与量子力学	192	§ 21-3	麦克斯韦方程组的通解	278
§ 15-6	对静态是对的而对动态 将是错的	198	§ 21-4	振荡偶极子的场	280
第 16 章	感生电流	201	§ 21-5	运动电荷的势;李纳和 维谢尔通解	284
§ 16-1	电动机与发电机	201	§ 21-6	匀速运动电荷的势;洛伦 兹公式	287
§ 16-2	变压器与电感	204	第 22 章	交流电路	290
§ 16-3	作用于感生电流上的力	206	§ 22-1	阻抗	290
§ 16-4	电工技术	210	§ 22-2	发电机	294
第 17 章	感应定律	213	§ 22-3	理想元件网络;基尔霍夫 法则	297
§ 17-1	感应的物理过程	213	§ 22-4	等效电路	300
§ 17-2	“通量法则”的一些例外	215	§ 22-5	能量	302
§ 17-3	感生电场使粒子加速;电子 感应加速器	216	§ 22-6	梯形网络	303
§ 17-4	一个佯谬	218	§ 22-7	滤波器	305
§ 17-5	交流发电机	219	§ 22-8	其他电路元件	308
§ 17-6	互感	222	第 23 章	空腔共振器	312
§ 17-7	自感	224	§ 23-1	实际电路元件	312
§ 17-8	电感与磁能	225	§ 23-2	在高频时的电容器	314
第 18 章	麦克斯韦方程组	230	§ 23-3	共振空腔	318
§ 18-1	麦克斯韦方程组	230	§ 23-4	腔模	321
§ 18-2	新的项是如何起作用的	232	§ 23-5	空腔与共振电路	323
§ 18-3	全部经典物理学	234	第 24 章	波导	326
§ 18-4	行移场	235	§ 24-1	传输线	326
§ 18-5	光速	238	§ 24-2	矩形波导	329
§ 18-6	求解麦克斯韦方程组;势和 波动方程	239	§ 24-3	截止频率	331
第 19 章	最小作用原理(专题演讲)	243	§ 24-4	导波的速率	333
第 20 章	麦克斯韦方程组在自由空间 中的解	259	§ 24-5	导波的观测	334
§ 20-1	自由空间中的波;平面波	259	§ 24-6	波导管	334
§ 20-2	三维波	266	§ 24-7	波导模式	337
§ 20-3	科学的想象	268	§ 24-8	另一种看待导波的方法	337
§ 20-4	球面波	270	第 25 章	用相对论符号表示的电动力学	341
第 21 章	有电流和电荷时麦克斯韦 方程组的解	275	§ 25-1	四维矢量	341
§ 21-1	光与电磁波	275	§ 25-2	标积	343
§ 21-2	由点源产生的球面波	276	§ 25-3	四维梯度	346
			§ 25-4	用四维符号表示的电动 力学	349
			§ 25-5	运动电荷的四维势	350

§ 25-6 电动力学方程组的不变性 351	§ 30-2 晶体中的化学键 407
第 26 章 场的洛伦兹变换 353	§ 30-3 晶体生长 407
§ 26-1 运动电荷的四维势 353	§ 30-4 晶格 408
§ 26-2 匀速点电荷的场 355	§ 30-5 二维对称性 409
§ 26-3 场的相对论变换 358	§ 30-6 三维对称性 412
§ 26-4 用相对论符号表示的 运动方程 364	§ 30-7 金属强度 414
第 27 章 场的能量和场的动量 368	§ 30-8 位错与晶体生长 415
§ 27-1 局域守恒 368	§ 30-9 布拉格-奈晶体模型..... 416
§ 27-2 能量守恒与电磁学 369	第 31 章 张量 417
§ 27-3 电磁场中的能量密度和 能流 370	§ 31-1 极化张量 417
§ 27-4 场能的不确定性 373	§ 31-2 张量分量的变换 419
§ 27-5 能流实例 374	§ 31-3 能量椭球 420
§ 27-6 场的动量 377	§ 31-4 其他张量;惯量张量..... 423
第 28 章 电磁质量 381	§ 31-5 叉积 425
§ 28-1 点电荷场的能量 381	§ 31-6 应力张量 426
§ 28-2 运动电荷场的动量 382	§ 31-7 高阶张量 429
§ 28-3 电磁质量 383	§ 31-8 电磁动量的四维张量 430
§ 28-4 电子作用于其自身上的力 384	第 32 章 稠密材料的折射率 433
§ 28-5 改进麦克斯韦理论的尝试 387	§ 32-1 物质的极化 433
§ 28-6 核力场 393	§ 32-2 在电介质中的麦克斯韦 方程组 435
第 29 章 电荷在电场和磁场中的运动 395	§ 32-3 电介质中的波 437
§ 29-1 在匀强电场或匀强磁场中 的运动 395	§ 32-4 复折射率 440
§ 29-2 动量分析 395	§ 32-5 混合物的折射率 441
§ 29-3 静电透镜 397	§ 32-6 金属中的波 442
§ 29-4 磁透镜 398	§ 32-7 低频近似与高频近似;趋肤 深度与等离子体频率 444
§ 29-5 电子显微镜 398	第 33 章 表面反射 448
§ 29-6 加速器中的导向场 399	§ 33-1 光的反射与折射 448
§ 29-7 交变梯度聚焦法 402	§ 33-2 稠密材料中的波 449
§ 29-8 在交叉的电场和磁场中的 运动 404	§ 33-3 边界条件 452
第 30 章 晶体的内禀几何 405	§ 33-4 反射波与透射波 455
§ 30-1 晶体的内禀几何 405	§ 33-5 金属上的反射 460
	§ 33-6 全内反射 461
	第 34 章 物质的磁性 464
	§ 34-1 抗磁性和顺磁性 464
	§ 34-2 磁矩与角动量 466
	§ 34-3 原子磁体的进动 467
	§ 34-4 抗磁性 468