

费恩曼 物理学讲义

The Feynman

LECTURES ON PHYSICS

(第3卷) [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

The Feynman Lectures on Physics (Volume III)

费恩曼物理学讲义

第 3 卷

[美] 费恩曼 (R. P. Feynman)

莱顿 (R. B. Leighton) 著

桑兹 (M. Sands)

潘笃武 李洪芳 译

上海科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

费恩曼物理学讲义. 第3卷 / (美) 费恩曼, (美) 莱顿, (美) 桑兹著; 潘笃武, 李洪芳译.
上海: 上海科学技术出版社, 2005.6
ISBN 7-5323-7875-6

I. 费... II. ①费...②莱...③桑...④潘...⑤李...
III. 普通物理学-教材 IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 134238 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 23.75

字数 558 000

2005 年 6 月第 1 版

2005 年 6 月第 1 次印刷

印数 1—3 500

定价: 60.00 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 月特请诺贝尔物理学奖获得者、著名物理学家理查德·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 卷主要是量子力学.全书内容十分丰富,在深度和广度上都超过了传统的物理教材.

当时美国大学物理教学改革试图解决的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介绍,对于量子力学,费恩曼教授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.

1989 年,为纪念费恩曼逝世一周年,原书编者重新出版本书,并增加了新的序言及费恩曼生平的短文.我们按照新版的原本进行了翻译.

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.

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 10 月

关于费恩曼

费恩曼(R. P. Feynman)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. 以后,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,善于吸引讲演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.有一次讲演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的开始的时候.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.”全课堂一点声音也没有,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.”课堂里爆发出一阵大笑,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他的论文中找到,在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能用像费恩曼一样的非凡的“常识”把问题说清楚.

在加利福尼亚理工学院的 35 年(从 1952 到 1987 年)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 和 1962—1963 两个学年中的重大事件.在 1964 年中又简单地重复了一遍,他讲完这门课后就形成了《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.但是发现这项任务之困难远远超出任何人的想象.后来发现写成可以出版的书,需要他的同事以及对每一章作最后定稿的费恩曼本人都要付出极大的劳动.

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并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于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,通过讲课可以把它介绍给年轻学生.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 $1/2$ 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,他自己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从他的肩膀上不是看到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 4 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 3 本红书:《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 15 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也不意味着仅仅介绍一些概况,而是需要极其认真对待的。我设想这些课程是对班级中最聪明的学生而讲的,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

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. 我们到现在一般还只在物理学课程中给我们的学生安排量子力学介绍性的课程(对有些学生来说还是最后的). 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这次实验是成功的. 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.

在从 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、两年连续的费恩曼物理教程中, 正当需要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, 在讲座接近结束的时候, 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. 一些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, 这两章重印在本卷的附录中.

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. 第一次讲课就正面讨论概率振幅、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, 概念是在对某一特定例子详细讨论过程中引进的——为使物理概念尽可能地实在. 接着讨论依赖于时间的状态, 包括确定能量的状态, 这些概念立即被应用于研究双态系统. 氢微波激射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、它的微分方程以及它对氢原子的解为结束.

在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, 期望给学生打开有关他们正在学习的内容与普

遍物理文明的关系的宽阔的视野. 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, 这是当我们懂得了在他的真实的物理学讲座中阐明的概念时所体验到的, 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	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	5	§ 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 量子力学的基本原理	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	18	§ 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 振幅对时间的依存关系	89
第 3 章 概率振幅	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	30	§ 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 光子的吸收和发射	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
§ 5-1 用施特恩-格拉赫装置过滤		§ 9-2 静电场中的分子	122

§ 9-3 在随时间变化的场中的 跃迁	126	§ 13-7 被晶格的不完整性陷获 ...	206
§ 9-4 共振跃迁	129	§ 13-8 散射振幅和束缚态	207
§ 9-5 偏离共振的跃迁	131	第 14 章 半导体	209
§ 9-6 光的吸收	132	§ 14-1 半导体中的电子和空穴 ...	209
第 10 章 其他双态系统	134	§ 14-2 掺杂的半导体	212
§ 10-1 氢离子	134	§ 14-3 霍尔效应	215
§ 10-2 核力	139	§ 14-4 半导体结	216
§ 10-3 氢分子	141	§ 14-5 半导体结的整流	218
§ 10-4 苯分子	144	§ 14-6 晶体管	220
§ 10-5 染料	146	第 15 章 独立粒子近似	222
§ 10-6 磁场中自旋 $1/2$ 粒子的 哈密顿函数	146	§ 15-1 自旋波	222
§ 10-7 磁场中自旋的电子	149	§ 15-2 双自旋波	225
第 11 章 再论双态系统	152	§ 15-3 独立粒子	227
§ 11-1 泡利自旋矩阵	152	§ 15-4 苯分子	228
§ 11-2 作为算符的自旋矩阵	157	§ 15-5 其他有机化学分子	232
§ 11-3 双态方程的解	160	§ 15-6 近似方法的其他应用	235
§ 11-4 光子的偏振态	161	第 16 章 振幅对位置的依存关系	237
§ 11-5 中性 K 介子	165	§ 16-1 一维情形的振幅	237
§ 11-6 对 N 态系统的推广	173	§ 16-2 波函数	240
第 12 章 氢的超精细分裂	177	§ 16-3 具有确定动量的态	243
§ 12-1 由两个自旋 $1/2$ 粒子组 成的系统的基础态	177	§ 16-4 对 x 的态的归一化	245
§ 12-2 氢基态的哈密顿算符	179	§ 16-5 薛定谔方程	247
§ 12-3 能级	183	§ 16-6 量子化能级	250
§ 12-4 塞曼分裂	185	第 17 章 对称性和守恒定律	254
§ 12-5 在磁场中的态	189	§ 17-1 对称性	254
§ 12-6 自旋 1 粒子的投影 矩阵	192	§ 17-2 对称与守恒	257
第 13 章 在晶格中的传播	195	§ 17-3 守恒定律	261
§ 13-1 电子在一维晶格中的 状态	195	§ 17-4 偏振光	263
§ 13-2 确定能量的状态	197	§ 17-5 Λ^0 的衰变	265
§ 13-3 与时间有关的状态	200	§ 17-6 转动矩阵摘要	270
§ 13-4 三维晶格中的电子	202	第 18 章 角动量	272
§ 13-5 晶格中的其他状态	203	§ 18-1 电偶极子	272
§ 13-6 在不完整的晶格上的 散射	204	§ 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 核自旋的测量	285
		§ 18-6 角动量的合成	286
		附注 1: 转动矩阵的推导	293
		附注 2: 光子发射中的宇称守恒	295

第 19 章 氢原子与周期表	296	§ 20-7 平均值随时间的变化	330
§ 19-1 氢原子的薛定谔方程	296	第 21 章 经典情况下的薛定谔方程： 关于超导电性的讨论会	334
§ 19-2 球对称解	297	§ 21-1 磁场中的薛定谔方程	334
§ 19-3 具有角度依赖关系的 状态	302	§ 21-2 概率的连续性方程	336
§ 19-4 氢原子的一般解	305	§ 21-3 两类动量	337
§ 19-5 氢原子波函数	308	§ 21-4 波函数的意义	339
§ 19-6 周期表	310	§ 21-5 超导电性	340
第 20 章 算符	315	§ 21-6 迈斯纳效应	341
§ 20-1 操作与算符	315	§ 21-7 通量的量子化	343
§ 20-2 平均能量	317	§ 21-8 超导动力学	346
§ 20-3 原子的平均能量	320	§ 21-9 约瑟夫森结	348
§ 20-4 位置算符	322	费恩曼的结束语	353
§ 20-5 动量算符	324	索 引	354
§ 20-6 角动量	329	附 录	357

第 1 章 量子行为

§ 1-1 原子力学

“量子力学”描述物质和光的行为的各方面细节,特别是发生在原子尺度上的事件.在微小的尺度下事物的行为与我们有着直接经验的任何事物都不相同.它们既不像波动,又不像粒子,也不像云雾,或弹子球,或悬挂在弹簧上的重物,总之不像我们曾经见过的任何东西.

牛顿认为,光是由微粒构成的,但是,之后发现光的行为像波动.然而,后来(在 20 世纪初叶)人们发现,光的行为有时确实又像粒子.又譬如,在历史上,电子起先被认为像粒子,后来发现它在许多方面的性质像波.所以,实际上它表现得两者都不像.现在我们不再说它是粒子或说它是波动,我们说:“它两者都不像.”

然而,有一点是幸运的:电子的行为很像光.原子客体(电子、质子、中子、光子等等)的量子行为都是相同的,它们都是“粒子波”,或者随便什么你愿意称呼的名称.所以,我们所学的关于电子(我们将用它作为例子)的性质也可应用到所有的“粒子”,包括光子上.

在 20 世纪的前 25 年中,人们逐渐积累了有关原子与其他小尺度粒子行为的知识,知道了微小物体是如何活动的一些线索,由此也引起了越来越多的混乱,到 1926 和 1927 年,薛定谔、海森伯与玻恩终于解决了这些问题.他们最后对微小尺度物质的行为作出了协调一致的描述.本章中我们将开始研究这种描述的主要特点.

因为原子的行为与我们的日常经验不同,所以很难令人习惯,而且对每个人——不管是新手,还是有经验的物理学家——都显得奇特而神秘.甚至专家们也不能以他们所希望的方式去理解原子的行为,而且这是完全有道理的,因为一切人类的直接经验和所有的人类的直觉都只适用于大的物体.我们知道大物体的行为将是如何,但是在小尺度下事物的行为却并非如此.所以我们必须用一种抽象的或想象的方式,而不是把它与我们的直接经验联系起来的方式来学习它.

在本章中,我们将直接讨论以最陌生的方式出现的神秘行为的基本特征.我们选择用来考察的现象不可能以任何经典方式来解释——绝对不可能——但它却包含了量子力学的核心.事实上,它包含着独一无二的奥秘.我们不能通过“说明”它如何作用来消除这个奥秘.我们只是告诉你,它是怎样起作用的.在告诉你它怎样起作用的同时,我们也将告诉你所有量子力学的基本特色.

§ 1-2 子弹的实验

为了试图理解电子的量子行为,我们将在一个特制的实验装置中,把它们的行为和我们较为熟悉的子弹那样的粒子的行为以及如水波那样的波的行为作一比较和对照.首先考虑子弹