

新概念物理教程

量子物理

(第二版)

赵凯华 罗蔚茵

面向 21 世纪课程教材

新概念物理教程



高等教育出版社



“十二五”普

级规划教材

面向 21 世纪课程教材

新概念物理教程

量子物理

(第二版)

赵凯华 罗蔚茵



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容简介

本书是教育部“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”的研究成果,是面向 21 世纪课程教材和“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。从教学顺序上看,本书是《新概念物理教程》中的第五本,全丛书各本的编写和改革思路是一脉相承的,但根据内容的特点,本卷更加强调用普通物理课的风格讲述量子物理。本书取材覆盖所有量子物理的各个重要方面和前沿课题,远超出传统普通物理教材中的“原子物理”部分;本书也不是“量子力学”教材,因书中只介绍量子力学的基本概念和理论框架,而不涉及量子力学中较深的数学和许多重要的计算方法。本书只要求读者学过普通物理的光学部分、微积分和线性代数。本书共分实验基础与基本原理,双态系统,从一维系统到凝聚态物质,原子、分子,原子核、粒子,量子力学的新进展等六章和线性代数、高斯函数与高斯积分、物理常量等三个附录。

本书可作为高等学校物理类专业、电子信息专业的教科书或参考书,特别适合物理学基础人才培养基地选用。对于其他理工科专业,本书也是教师备课时很好的参考书和优秀学生的辅助读物。

图书在版编目(CIP)数据

新概念物理教程.量子物理 / 赵凯华, 罗蔚茵. —2 版. —北京: 高等教育出版社, 2008.1 (2016.5 重印)

ISBN 978-7-04-022637-9

I. 新… II. ①赵…②罗… III. 量子论—高等学校—教材 IV. O413

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第161529号

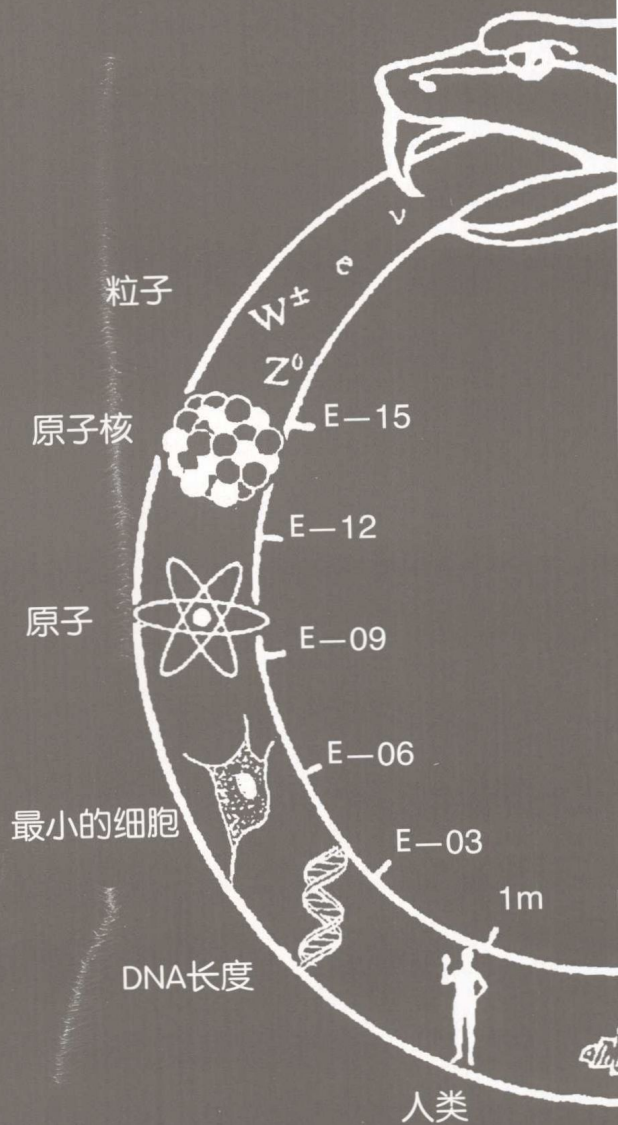
策划编辑 高建 责任编辑 王文颖 封面设计 张志
版式设计 王艳红 责任印制 韩刚

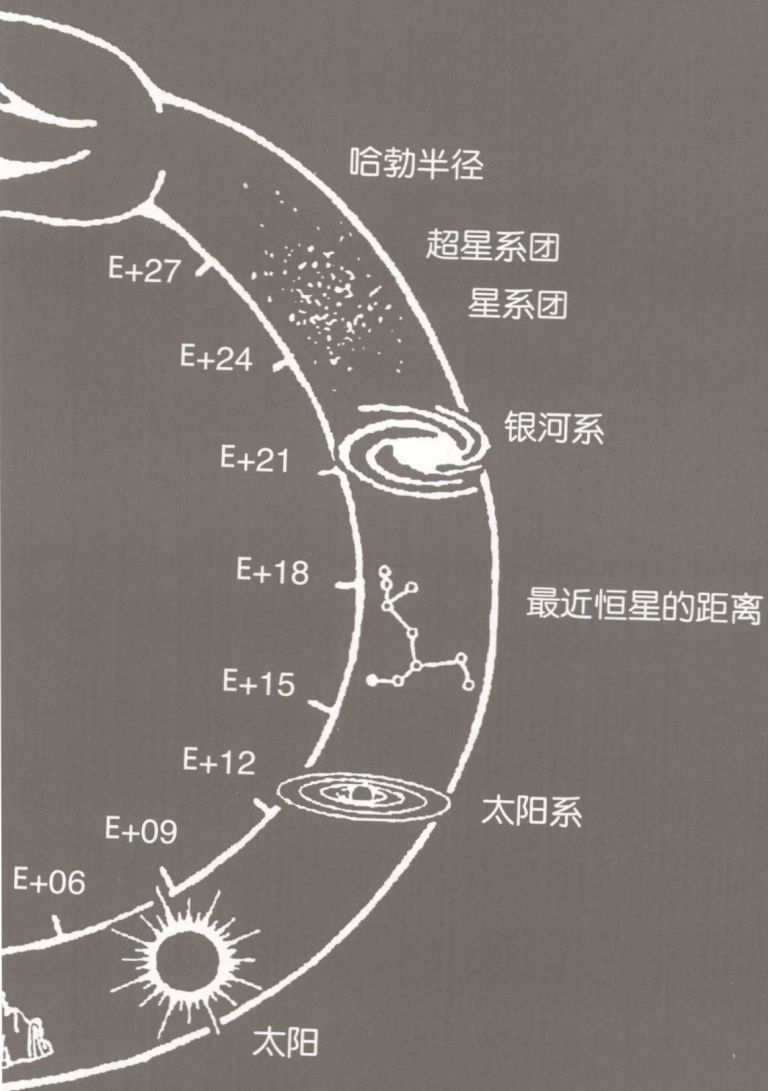
出版发行	高等教育出版社	网 址	http://www.hep.edu.cn
社 址	北京市西城区德外大街 4 号		http://www.hep.com.cn
邮政编码	100120	网上订购	http://www.landaco.com
印 刷	涿州市星河印刷有限公司		http://www.landaco.com.cn
开 本	787×960 1/16	版 次	2003 年 12 月第 1 版
印 张	29.75		2008 年 1 月第 2 版
字 数	510 000	印 次	2016 年 5 月第 10 次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	43.00 元
咨询电话	400-810-0598		

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物料号 22637-00





第二版序^①

本书第一版出版到现在已有六年。本次改版,我们对第二章的量子共振部分作了较大的改动和补充,第四章的精细结构部分也重新组织过了。第六章补充了关于量子纠缠态的一些新进展。原书附录 C 里的同位素数据表有许多错误,这次不仅改正了,还按 2003 年的最新文献作了全面更新。最后,书中增补了习题答案。

北京师范大学胡镜寰教授在本次修订中给予了很大的帮助,华南师范大学王笑君教授是本书最积极的使用者,提供了本书第一版的勘误表,我们对此深表谢忱。

作者

2007 年 5 月

① 本书的修改得到“国家基础科学人才培养资助”J0630311。

序

从教学顺序上看,本书是《新概念物理教程》中的第五卷,全书各卷的编写和改革思路是一脉相承的,但根据内容的特点,本卷更加强调用普通物理课的风格讲述量子物理。

本书不是“量子力学”教材。本书由实验事实出发,从特殊到一般引入一些概念,较多地注重形象化和直观性,不追求逻辑上的严格性和理论上的完整性和系统性。在数学工具上,本书几乎从头起就运用狄拉克符号和矩阵来表示,采用了与通常量子力学中以偏微分方程为基础所不同的甚至颠倒了的讲述体系。书中只介绍量子力学的基本概念和架构,不涉及量子力学中许多基本而重要的计算方法。所以,物理专业的学生在学习了本卷教材之后,必须再学习作为理论物理课的“量子力学”。在制订物理专业的教学计划时,我们往往遇到一个困难,即有些重要课程,如固体物理、原子核物理等,需要等待量子力学课先行而不得不排得相当靠后。我们相信,在学生读了本卷教材之后,上述课程就不必等量子力学之后再开设了,这将给教学计划的制订带来相当大的灵活性。此外,本卷教材的学习,也对物理类专业的学生做近代物理实验大有帮助。

传统上普通物理课的第五部分是“原子物理”,本书与原子物理教材也大有区别。本书一改国内多年来原子物理教材以原子光谱和玻尔旧量子论为主线的模式,而是从头起就用量子力学的基本概念和语言,较全面地介绍了当代量子物理的方方面面,除原子物理课程传统内容外,还介绍了诸如量子共振、势垒隧穿、能带、半导体、声子与元激发、超导体、AB效应、约瑟夫森结、分子轨函及其杂化等,并作为窗口,简单介绍了量子态交缠、薛定谔猫态的实验实现、贝尔不等式实验检验、量子超空间传态与量子计算等近年来量子物理的最新进展。但是从课程的衔接来说,本书只要求读者学过普通物理的光学部分、微积分和线性代数。对学时的要求和原子物理课程大致相仿。

20世纪是科学技术空前迅猛发展的世纪,在此世纪内,人类社会在科技进步上经历了一个又一个划时代的变革。继19世纪的物理学把人类社会带进“电气化时代”以后,20世纪40年代物理学又使人类掌握了核能的奥秘,把人类社会带进“原子时代”。今天核技术的应用远不止于为社会提供长久可靠的能源,放射性与核磁共振在医学上的诊断与治疗作用,已几乎家喻户晓。20世纪五六十年代物理学家又发明了激光,现在激光已广泛应

用于尖端科学研究、工业、农业、医学、通讯、计算、军事和家庭生活。20 世纪科学技术给人类社会所带来的最大冲击,莫过于以现代计算机为基础发展起来的电子信息技术。号称“信息时代”的到来被誉为“第三次产业革命”。的确,计算机给人类社会带来如此深刻的变化,是二三十年前任何有远见的科学家都不可能预见到的。现代计算机的硬件基础是半导体集成电路,PN 结是核心。1947 年晶体管的发明,标志着信息时代的发端。所有上述一切,无不建立在量子物理的基础上,或是在量子物理的概念中衍生出来的。此外,众多交叉学科的领域,像量子化学、量子生物学、量子宇宙学,也都立足于量子物理这块奠基石上。我们可以毫不夸大地说,没有量子物理,就没有我们今天的生活方式。

今年是普朗克的量子论诞生 100 周年,从 1925 年或 1926 年算起量子力学的建立也近 3/4 个世纪了。然而时至今日,我们的基础物理课中量子物理的内容在许多地方只一带而过,即使在“原子物理”部分,如何处理旧量子论与真正的量子力学之争,迄今未尝休止。人们说“近代物理”早已不“近代”了。像量子物理这样重要的内容,在基础物理课程中应占有适当的地位。这个问题之所以迟迟不能解决,是因为以偏微分方程为基础的那套量子力学理论体系,对学生预备知识的要求实在太高了。固然准备学物理的学生可以等到高年级再学量子力学,但是对于大多数非物理专业的学生来说,基础物理课是他们的最后一门物理课。科学家预言,在 21 世纪中,对于我们的孩子和孩子的孩子来说,量子力学的概念将成为一种常识。若上述情况长此以往,那怎么可能? 话又说回来,考入大学物理系的学生,许多是中学里的佼佼者,他们对物理,特别是近代物理的各种激动人心的成就,满怀激情和兴趣。如果进得大学大门来,两年之内尽和一些滑轮、斜面和经典电路之类的东西打交道,他们会不会感到失望? 兴趣是最好的老师,如果量子物理课程能激发和保持学生的兴趣,将有助于他们克服学习量子力学的困难。

对于多数需要懂点量子物理的人(包括实验物理工作者、电子学工程师和化学家)来说,需要的只是量子力学的基本概念和架构,而那套用微分方程处理问题的方法并不真正用得着。能否绕过传统的那套以偏微分方程为主线的量子力学教学体系,使量子力学的基本概念和架构能为低年级学生所接受? 20 世纪 60 年代物理大师费曼迈出了第一步,^①《费曼物理学讲

① 应该说,狄拉克的《量子力学》(1930 年第一版,1956 第四版)是用符号方法代替偏微分方程来阐述量子力学原理的第一本教材。不过那本书不是为初学者写的,但我们还是从中吸取了不少营养。

义》第三卷成了我们编写此书时的启蒙课本。

费曼胆识过人之处,在于他敢于把传统的量子力学教学顺序倒过来。他一开头就介绍量子力学最基本、最普遍的特征,从概率幅和量子态的概念切入,讲它们的叠加、分解和干涉,并用非常普遍但有点抽象的狄拉克符号来描述它们。他从矩阵代数入手,代替通常的微分方程体系。对于从中学出来不久的学生来说,矩阵运算比偏微分方程容易多了。这样一来,自旋的概念就可以从通常排在较后的地方提到前面,为进一步讨论双态系统提供重要的实例。我们认为,费曼的书最精彩的地方是他引用了大量的双态系统。从微分方程的体系看,最简单的量子系统是一维系统,但双态系统却是更简单的量子系统。处理这类系统用不着微分方程,但要用矩阵代数。从氨分子翻转分裂到苯分子的共振能和染料分子的共轭双键,从氨分子钟到核磁共振,费曼能够为双态系统找到那么多有趣而富有实际意义的例子,颇令我们惊叹和折服。并非自然界本来就有许多现成的双态系统,而是费曼一反量子力学教学顺序的常规。通常在量子力学中讲原子能级的顺序是从主量子数到角量子数,再到磁量子数(塞曼分裂),从能级的精细结构到超精细结构;讲分子能级的顺序是从电子能级到振动能级,然后再到转动能级。费曼却从级差最小的能级(如氨分子特定的转动能级,或氢原子的塞曼分裂能级和超精细结构能级)开始,然后再在以后章节里逐渐扩展到大级差的基本能级。由于能级钜细有多个数量级之差,把一对级差细微的能级孤立出来研究就成为可能。这便是费曼书中双态系统的由来。我们体会,从双态系统入手,一方面可以使学生较早地建立起态矢空间和表象变换等概念,这些量子力学的基本架构本来是很抽象的,在微分方程的体系中只能放在课程中比较靠后的地方讲,有些量子力学的简明教程甚至略去不讲。但对于双态系统来说,希尔伯特空间约化成二维,无论态基的变换还是本征值、本征矢的求得,在数学上都没有什么困难。另一方面,从双态系统入手,可使学生在本课程中尽早地接触到量子物理里激动人心的最新成果,有助于激发学生学习的热情。

费曼的书远非完美无瑕。费曼坦率地承认,对于教本科生基础课,他是没有经验的,他在加州理工学院唯一的这次为大学本科二年级学生的讲授并不理想。我们也感到,他这本书中许多地方教学上的处理大有可斟酌之处。不仅如此,在我们较深入地钻研了他这本教材之后,发现其中科学性的欠妥和失误之处,并不是个别的。总起来看,当然是瑕不掩瑜。但如果我们东施效颦,就会弄巧成拙,到头来自己吃苦头。所以我们为编写自己的这本教材,在借用费曼光辉思想的同时,花了很大的工夫进行了一番艰苦的再创造。

造,其中还包含了与同行们认真切磋的成果。

在《新概念物理教程》已完成的力学卷、热学卷和本卷中,作者自认为改革的力度一卷大过一卷,这卷量子物理是峰值,编写的难度也是最大的。以后将完成的电磁学和光学两卷,内容比较成熟,预计不再会有这样大幅度的变革了。本卷整体由赵凯华构思,分工罗蔚茵执笔写第二章,中经多次研讨,反复修改,正式出版前在清华大学试用一遍后定稿。这本《量子物理》涉及的知识面很广,写作过程中作者常常自惭浅陋。好在我们有很好的学术环境,同辈的学友和往日的学生中各方面的专家大有人在。写作时每有不详之处,拿起电话就可请教。在此我们向所有给过我们指教的同仁,表示由衷的谢意。作者要特别感谢喀兴林教授。由于全书在体系上的重大变化,最难写的是第一章。作者对该章垦殖经年,四易其稿。喀先生每次都悉心披阅,直言不讳地指出其中的谬误,为保证本书基本上站得住脚,起了关键的作用。

作者

2000年烟花三月

目 录

第一章 实验基础与基本原理	1
§ 1. 热辐射与普朗克的量子假说	1
1.1 一般特征与辐射场的定量描述	1
1.2 基尔霍夫热辐射定律	4
1.3 绝对黑体和黑体辐射	5
1.4 斯特藩-玻耳兹曼定律和维恩位移定律	7
1.5 维恩公式和瑞利-金斯公式	8
1.6 辐射场的态密度和能均分定理	9
1.7 普朗克公式与能量子假说	11
§ 2. 光的粒子性和电子的波动性	12
2.1 光电效应	12
2.2 爱因斯坦的光子假说与光电效应的解释	14
2.3 康普顿效应	16
2.4 德布罗意波	19
§ 3. 电子干涉实验 概率幅及其叠加	21
3.1 电子的双缝干涉实验	21
3.2 追踪电子	25
3.3 用概率幅来描述	27
§ 4. 海森伯不确定度关系 动力学变量算符	28
4.1 海森伯不确定性原理	28
4.2 动量的平均值与动量算符	29
4.3 算符的本征值	32
4.4 动量与位置算符的对易关系	32
§ 5. 轨道角动量	33
5.1 轨道角动量算符	33
5.2 轨道角动量的对易关系	35
5.3 轨道角动量的本征值与本征态的简并度	36
§ 6. 空间操作算符 薛定谔方程	38
6.1 动量与空间平移算符	38
6.2 角动量与空间转动算符	39
6.3 薛定谔方程	39
6.4 定 态	40
§ 7. 态矢和态矢空间	41
7.1 从光子线偏振态的分解说起	41

7.2 圆偏振态的分解	42
7.3 态矢和态矢空间	43
7.4 基矢变换	45
7.5 算符的本征矢和本征值	46
7.6 动力学变量的测量与平均值	47
7.7 守恒量	48
7.8 对易算符的共同本征态与动力学变量完全集问题	49
§ 8. 电子的自旋	50
8.1 角动量和磁矩的关系	50
8.2 施特恩-格拉赫实验	51
8.3 原子的磁矩	51
8.4 电子自旋 泡利矩阵	52
§ 9. 光子的角动量	55
9.1 光子自旋角动量	55
9.2 电偶极辐射和磁偶极辐射	56
9.3 电偶极辐射光子的角动量矩阵	57
§ 10. 光子的发射与吸收	58
10.1 爱因斯坦的受激辐射理论	58
10.2 光子的产生算符和消灭算符	61
§ 11. 量子力学基本原理小结	63
11.1 基本概念	64
11.2 基本公设	65
本章提要	65
思考题	67
习 题	72
第二章 双态系统	76
§ 1. 等价双态系统	76
1.1 能级离散系统中薛定谔方程的矩阵形式	76
1.2 氨分子概率幅的振荡与能级的分裂	78
1.3 苯分子的“共振能”	80
1.4 染料分子的共轭双键	82
1.5 氢分子离子	83
§ 2. 量子共振	86
2.1 问题的提出	86
2.2 拉比严格解	88
2.3 共振与失谐	89

2.4 弱场近似	89
2.5 考虑衰减时的情形	90
§3. 受激发射理论中的爱因斯坦 A 、 B 系数	91
3.1 问题的提出	91
3.2 外场对原子系统的微扰	91
3.3 爱因斯坦 A 、 B 系数	93
§4 氨分子微波激射	95
4.1 静电场中的氨分子	95
4.2 微波场中的氨分子	96
4.3 氨分子频标	97
§5. 拉莫尔进动与磁共振	99
5.1 拉莫尔进动的经典模型	99
5.2 布洛赫方程	100
5.3 拉莫尔进动的量子描述	101
5.4 核磁共振的量子描述	103
5.5 核磁共振的应用	104
§6. 氢原子基态的超精细分裂	107
6.1 两个自旋 $1/2$ 粒子态矢空间的直积	107
6.2 总自旋角动量算符的本征态	109
6.3 氢原子基态的超精细结构	112
6.4 超精细塞曼分裂	115
6.5 氢原子激射器	117
6.6 量子频标综述	118
本章提要	120
思考题	122
习 题	123
第三章 从一维系统到凝聚态物质	126
§1. 散射态	126
1.1 直角势垒和直角势阱的散射态	126
1.2 量子隧穿效应的实例	131
§2. 束缚态	135
2.1 束缚态能级的量子化	135
2.2 直角势阱	138
2.3 量子围栏——实现波函数的测量	141
2.4 谐振子	143
§3. 一维晶格中的电子	148

3.1 能带	148
3.2 电子在有缺陷晶格上的散射	151
3.3 电子被晶格的不完整性俘陷	152
§ 4. 半导体	153
4.1 导体、绝缘体和半导体的区别	153
4.2 内禀半导体中载流子的统计分布和浓度	154
4.3 掺杂	155
4.4 电子和空穴的有效质量	157
4.5 非平衡载流子的扩散与复合	158
4.6 PN 结及其整流作用	159
4.7 晶体管	162
§ 5. 声子	164
5.1 一维晶格中纵波的简正表示	164
5.2 格波的量子化	167
5.3 晶格的热导	169
5.4 金属的电导	171
5.5 元激发的概念	172
§ 6. 超导电现象和唯象理论	174
6.1 零电阻 临界温度	174
6.2 临界电流密度和临界磁场	175
6.3 迈斯纳效应与磁通量子化	176
6.4 二流体模型	178
6.5 伦敦方程	179
6.6 唯象理论对超导现象的解释	180
6.7 用磁矢势表示伦敦方程	181
§ 7. 超导微观理论	181
7.1 同位素效应	181
7.2 电声子相互作用	182
7.3 库珀对	184
7.4 BCS 理论	185
§ 8. 磁场中的带电粒子	187
8.1 磁场中的动量算符	187
8.2 磁场中波函数的相因子	188
8.3 AB 效应	188
8.4 对超导体磁性能的微观理论解释	189
8.5 AB 效应和磁通量子化的实验验证	190
§ 9. 超导隧穿与量子干涉效应	193

9.1 约瑟夫森效应	193
9.2 约瑟夫森结电路的力学类比	195
9.3 超导量子干涉器件	197
9.4 介观物理概念简介	200
本章提要	201
思考题	207
习 题	209
第四章 原子 分子	211
§ 1. 前量子论时代的原子	211
1.1 化学家的原子	211
1.2 原子光谱及其规律	211
1.3 电子的发现	213
1.4 布丁模型和有核模型	214
1.5 原子结构经典理论的困难	215
1.6 玻尔理论	216
§ 2. 类氢离子	219
2.1 能级与量子态	219
2.2 隆格-楞茨矢量与 l 简并性	221
2.3 波函数	223
2.4 波函数的实数表示	231
§ 3. 原子的壳层结构与周期表	234
3.1 原子实的屏蔽作用与 l 简并的解除	234
3.2 L 壳层与 M 壳层的电子组态	237
3.3 所有元素单电子态填充次序和电子组态	238
3.4 自旋对单电子态填充的影响	241
3.5 元素周期表	241
§ 4. 能级的精细结构	246
4.1 自旋与相对论效应对原子能级的影响	246
4.2 原子态符号	248
4.3 氢原子能级的精细结构	249
4.4 兰姆移位	250
4.5 碱金属原子能级的精细结构	252
4.6 多价原子能级的精细结构	254
4.7 LS 耦合制式	254
4.8 泡利原理对同科电子组态的影响	256
4.9 洪德定则	257