

理论物理简明教程

第二卷

量子力学

[苏] Л. Д. 朗道 著
E. M. 栗弗席茨
李复龄 译

高等教育出版社

理论物理简明教程

第二卷

量子力学

[苏] Л. Д. 朗道 著
E. M. 栗弗席茨
李复龄 译

高等教育出版社

内 容 提 要

本书是 Л. Д. 朗道和 Е. М. 栗弗席茨所著的《理论物理简明教程》的第二卷，由李复龄根据珀格蒙出版社 (Pergamon Press) 1974 年英译本译出。

全书共分 16 章，包括非相对论性理论与相对论性理论两部分，精选了作者《理论物理教程》巨著中有关卷目中的核心部分。全书内容精炼，取材得当、数学推导简洁而严格，并配有不少富有启发性的实例和例题，可供我国高等院校物理类专业（包括理论物理、实验及应用性质专业）的教师、研究生、高年级大学生以及相近专业的教师及科研人员参考。

理论物理简明教程

第 二 卷

量 子 力 学

Л. Д. 朗 道 著
【苏】Е. М. 栗弗席茨

李复龄 译

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

国防工业出版社印刷厂印刷

*

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ 印张 10.875 字数 259,000

1990 年 7 月第 1 版 1990 年 7 月第 1 次印刷

印数 00,001—2 130

ISBN 7-04-001950-7/O·709

定价 2.70 元

序 言

本书是朗道(Л. Д. Ландау)原计划的继续。我们在第一卷的序言中曾说过:《简程》是要向当代每一个物理学工作者提供他们应该熟悉的最低限度的理论物理知识,而不管他们从事物理学的哪个分支的工作。

本书第一部分是依照我们的《量子力学》(《理论物理教程》,第三卷)来论述非相对论性量子力学。原书中只有专家们才关心的某些章节,以及理论物理工作者才需要的许多技巧性细节,全部删去。这种相当多的删节,自然意味着原书相当大的部分要重新编写。尽管如此,我还是力图保持原来的论述方式和风格,无论何处都不允许作通俗性的简化(简化只是略去某些细节)。在第一部分中,很少出现“可以证明”这样的话,在给出结果的同时还给出其推导过程。

然而,在第二部分中却不尽如此。这一部分的论述是以贝雷斯基(В. Б. Берестецкий),皮塔耶夫斯基(Л. П. Питаевский)和我本人的《相对论性量子理论》(《教程》,第四卷)为基础的,但对量子电动力学只介绍了基础知识。在此,我还是力图以尽可能清楚的方式来说明理论的物理假设和逻辑结构;但对理论的许多应用只提到它们的结论,因为要解决这方面的一些专门问题需要进行十分复杂的计算。对于第二部分所选择的内容,在某种程度上我仍以朗道于1959—1960年在莫斯科大学所作的量子电动力学讲课内容为指导,借此机会,我向康帕涅兹(А. С. Компанец),布德柯(Н. И. Буд'ко)和坎垂顿柯(Р. С. Kondratenko)表示谢意,因为他们向我提供了讲课的笔记。

最后一章所论述的费因曼图，在风格上略有不同。费因曼图既有高度的复杂性，又更多地侧重于方法而不是物理结果。但是，我觉得至少要向读者提供绘图技巧概念的原始思想和意义，因为它是现代理论物理学必不可少的工具（我并不试图说明这些技巧对解决实际问题的用途）。如果读者愿意，本章可以略去不读，亦不会影响其他章节的学习。

本书的俄文原版恰好出版在1962年1月7日那个不幸日子的十年之后，那一天车祸终断了列夫·达维多维奇·朗道作为科学家和教师的生涯，《简程》的读者谁也无幸再聆听朗道的演讲了！我仅设想，在这些书里能够向读者传输他作为一个教师的某些精神：他力求概念清晰，他努力使复杂问题简单化，从而揭示出自然定律内在的简洁和优美。

E.M. 莱弗席茨

与《理论物理教程》各卷一样，原始参考文献只给出作者的姓名和日期。——出版者注

中 译 者 序

量子力学自形成一种独立的学科以来,已出版了数量繁多的各种文字的教材。其中经久不衰最受人欢迎和推崇的,当首推苏联 Л. Л. 朗道和 E. M. 栗弗席茨所著的“理论物理教程”第三卷《量子力学》(非相对论理论)(1947年出俄文第一版,1973年出俄文第三版,1980年出中译本)和美国 L. I. 席夫著《量子力学》(1949年出英文第一版,1968年出英文第三版,中译本1981年出版)。这两本教程的共同特点是选材得当,结构严谨,数学处理简洁。除其共同点外,还各有其特点。后者配有启发性的应用实例,和大量的习题,且包含有相对论理论。前者没有习题,配有大量的富有启发性的应用实例和例题,不包含相对论性理论。相对论理论则列入“理论物理教程”第四卷《相对论性量子理论》中。

本书是 Л. Л. 朗道和 E. M. 栗弗席茨所著的“理论物理简明教程”第二卷《量子力学》。它所包含的内容是著者从“理论物理教程”第三卷和第四卷中精心挑选的,其中相当大的部分是栗弗席茨重写的。虽系重写,但仍保持朗道的风格,即思维深刻,用词恰当,说理明白,数学推导简洁而严格,特别他善于将繁杂的问题处理得简单而易懂。另外,本书还列专章(第十四章)介绍了费因曼图。费因曼图是现代理论物理学中不可缺少的方法。

本书是著者为苏联大学物理系最后一年的理论物理课程编写的。在苏联还可作为数学系应用数学专业高年级学生的参考书和补充教材。结合我国目前实际情况,本书可供我国高等院校理论物理教师、物理学各个分支学科的研究生、物理系高年级的大学生、数学系应用数学专业的大学生参考,亦可作为高等师范院校物

理系量子力学(二)选修课的教材。

本书是根据派伽蒙出版公司 (Pergamon Press) 1974 年英文版《Quantum Mechanics》译出的。英文版是赛克斯(J. B. Sykes)和贝耳(J. S. Bell)根据俄文版译出的。本书在翻译过程中参阅了“理论物理教程”第三卷《量子力学》中译本和第四卷《相对论性量子理论》1974 年英文版的有关部分。翟林华同志翻译了第 7—10 章初稿。译者对原书中的错漏作了订正和补充。鉴于本书的起点较高,译者作了浅化和说明。这一切都以脚注的形式出现。借此机会,向为本书第二部分作了精心校阅的中国科技大学阮图南教授,以及对我提出严格要求的高等教育出版社物理编辑室的同志们表示衷心感谢!

译者序于芜湖赭山安徽师大

1985 年 3 月 3 日

符 号

Ψ 表示含时波函数

ψ 表示不含时间因子的波函数

算符用非圆符号 $\wedge$ 标记

转置算符用代字符 $\sim$ 标记

厄密共轭算符用上标 $+$ 标记

$f_{mn} = \langle m | f | n \rangle$ 表示物理量 f 的矩阵元

$\hat{H}$ 表示哈密顿算符(量)

E 表示非相对论性能量

$\omega_{nm} = (E_n - E_m)/\hbar$ 表示跃迁频率

ε 表示包含静止能量在内的相对论性粒子的能量。

dq 表示位形空间的体积元

$dV = dx dy dz$ 表示普通空间的体积元

Ω 表示归一化体积

四维矢量指标用希腊字母 $\lambda, \mu, \nu, \dots$, 标记(第二部分), 取值为 0, 1, 2, 3

在第二部分中采用了相对论性单位制, 其定义见 § 76 中第一个脚注。

参考《简程》第一卷《力学与电动力学》

目 录

序言	1
中译者序	3
符号	5
第一部分 非相对论性理论	1
第一章 量子力学的基本性概念	3
§ 1. 测不准原理	3
§ 2. 迭加原理	8
§ 3. 算符	11
§ 4. 算符的加法和乘法	16
§ 5. 连续谱	18
§ 6. 过渡到经典力学的极限情况	21
§ 7. 密度矩阵	23
第二章 量子力学中的守恒定律	25
§ 8. 哈密顿算符	25
§ 9. 算符对时间的微商	26
§ 10. 定态	27
§ 11. 物理量的矩阵	30
§ 12. 动量	34
§ 13. 测不准关系式	37
§ 14. 角动量	39
§ 15. 角动量的本征值	43
§ 16. 角动量的本征函数	47
§ 17. 角动量的加法	49
§ 18. 角动量的选择定则	52
§ 19. 态的字称	56
第三章 薛定谔方程	60
§ 20. 薛定谔方程	60

§ 21. 流密度	62
§ 22. 薛定谔方程解的一般性质	64
§ 23. 时间反演	68
§ 24. 势阱	69
§ 25. 线性振子	73
§ 26. 准经典波函数	77
§ 27. 玻尔-索莫菲量子化规则	80
§ 28. 透射系数	85
§ 29. 势场中的运动	90
§ 30. 球面波	93
§ 31. 库仑场中的运动	98
第四章 微扰论	104
§ 32. 与时间无关的微扰	104
§ 33. 久期方程	108
§ 34. 与时间有关的微扰	110
§ 35. 连续谱中的跃迁	113
§ 36. 居间态	115
§ 37. 能量的测不准关系	116
§ 38. 准定态	118
第五章 自旋	121
§ 39. 自旋	121
§ 40. 自旋算符	124
§ 41. 旋量	126
§ 42. 电子的极化	130
§ 43. 磁场中的粒子	132
§ 44. 在均匀磁场中的运动	134
第六章 粒子的全同性	137
§ 45. 同类粒子的不可分辨性原理	137
§ 46. 交换作用	141
§ 47. 二次量子化·玻色统计情况	143
§ 48. 二次量子化·费密统计情况	149

第七章 原子	151
§ 49. 原子的能级	151
§ 50. 原子中的电子态	153
§ 51. 原子能级的精细结构	156
§ 52. 门捷列夫周期系	159
§ 53. X射线谱项	165
§ 54. 电场中的原子	166
§ 55. 磁场中的原子	170
第八章 双原子分子	175
§ 56. 双原子分子中的电子谱项	175
§ 57. 电子谱项的相交	177
§ 58. 原子价	180
§ 59. 双原子分子中谱项的振动和转动结构	185
§ 60. 仲氢和正氢	188
§ 61. 范得瓦尔斯力	190
第九章 弹性碰撞	193
§ 62. 散射振幅	193
§ 63. 准经典散射条件	196
§ 64. 作为散射振幅极点的分立能级	197
§ 65. 慢粒子散射	199
§ 66. 低能共振散射	202
§ 67. 玻恩公式	204
§ 68. 卢瑟福公式	210
§ 69. 同类粒子的碰撞	212
§ 70. 快电子与原子的弹性碰撞	214
第十章 非弹性碰撞	218
§ 71. 细致平衡原理	218
§ 72. 存在非弹性过程时的弹性散射	221
§ 73. 慢粒子的非弹性散射	223
§ 74. 快粒子与原子的非弹性碰撞	224
第二部分 相对论性理论	229

第十一章 光子	231
§ 75. 相对论性情况下的测不准原理	231
§ 76. 自由电磁场的量子化	235
§ 77. 光子	239
§ 78. 光子的角动量和宇称	241
第十二章 狄喇克方程	244
§ 79. 克莱因-福克方程	244
§ 80. 四维旋量	245
§ 81. 旋量的反演	249
§ 82. 狄喇克方程	251
§ 83. 狄喇克矩阵	253
§ 84. 狄喇克方程中的流密度	257
第十三章 粒子和反粒子	261
§ 85. Ψ 算符	261
§ 86. 粒子和反粒子	263
§ 87. 自旋与统计规律间的关系	267
§ 88. 严格的中性粒子	268
§ 89. 粒子的内禀宇称	271
§ 90. CPT 定理	273
§ 91. 中微子	277
第十四章 外场中的粒子	280
§ 92. 外场中电子的狄喇克方程	280
§ 93. 电子的磁矩	281
§ 94. 自旋-轨道相互作用	284
第十五章 辐射	288
§ 95. 电磁相互作用算符	288
§ 96. 自发发射与受激发射	291
§ 97. 偶极辐射	293
§ 98. 多极辐射	296
§ 99. 原子辐射	297
§ 100. 红外灾变	299

§ 101. 辐射散射.....	302
§ 102. 谱线的自然宽度.....	306
第十六章 费因曼图	309
§ 103. 散射矩阵.....	309
§ 104. 费因曼图.....	313
§ 105. 辐射修正.....	320
§ 106. 原子能级的辐射移位.....	322
索引	325

第 一 部 分

非相对论性理论

第一章 量子力学的基本概念

§1. 测不准原理

每当我们试图用经典力学和经典电动力学去阐释原子现象时,总会得出与实验有明显矛盾的结论。从把通常的电动力学用于电子在经典轨道上绕核运动的原子模型所产生的矛盾来看,这是再明显不过的了。当电子作这种运动时,它和任何带电粒子的加速运动一样,会连续不断地辐射电磁波。由于这种辐射,电子便会丧失能量,最终将使它落入原子核内。因此,根据经典电动力学,原子应是不稳定的,但这与事实完全不符。

理论与实验之间如此深刻的矛盾,表明要建立一种适用于原子现象(即质量极小的一些粒子在极短距离内所发生的现象)的理论,就需要根本改变基本的物理概念和定律。

为方便计,我们以实验上观察到的电子衍射现象^①,作为阐明这种根本改变的出发点。当一均匀电子注穿过一块晶体时,发现出射波呈现一种强弱交替的、完全类似于电磁波衍射中所观测到的衍射图样。由此可见,在一定条件下,质点(在此情况下为电子)的行为中会呈现出属于波动过程的特征。

这种现象与通常的运动观念之间的矛盾,究竟尖锐到什么程度,最好是看一看下面的假想实验,它是晶体的电子衍射实验的一

① 实际上,电子衍射现象发现在量子力学建立之后。但是,我们在讨论中将不拘泥于理论的历史发展顺序,而是尽量采用这样的讲法,使得量子力学的基本原理与实验现象之间的联系表达得最为清楚。

种理想化。我们设想有一块电子不能穿透的屏，屏上刻有两条狭缝。让电子注通过其中的一条狭缝（遮住另一条狭缝），则在置于狭缝后的一块连续屏幕上得到某一强度分布图样；应用同样的方法，揭开第二条狭缝，遮住第一条狭缝，则得到另一个图样。现在让电子注同时通过两条狭缝，根据通常的经典观念，我们一定会设想所得的图样不过是原先两个图样的简单叠合：因为每个电子都沿自己的轨道运动，只通过两条狭缝之一，而不影响正在通过另一狭缝的电子。可是，电子衍射现象表明，由于干涉作用，我们得到的衍射图样，实际上并不等于每条狭缝分别给出的那两个衍射图样之和。很明显，这个结果无法与电子的轨道运动观念相协调。

由此可见，支配原子现象的力学——量子力学或波动力学——必须建立在与经典力学根本不同的运动观念的基础上。量子力学中并不存在粒子轨道之类的概念。这就构成了 W. 海森伯 (W. Heisenberg) 于 1927 年所发现的所谓测不准原理^①，它是量子力学的基本原理之一。

从抛弃经典力学的习常观念这一角度来看，测不准原理的内容也许可以说是消极的。诚然，这个原理本身还不足以作为建立量子力学的基础。这样的一种新理论自然应建立在若干个积极论断的基础上，这将在以后 (§ 2) 讨论。但是，为了能够表述这些论断，我们有必要首先弄清量子力学所面临的问题的提法。为此，我们先来考察一下量子力学和经典力学之间的特殊性质。凡是一个更为普遍的理论，通常可用完整的逻辑形式表述出来，并且独立于那些作为它的极限情况的较窄理论。例如，相对论性力学可以建立在自己的基本原理的基础上，而无需考虑牛顿力学。可是，当我们

① 值得指出的是，在测不准原理发现之前，量子力学的完整的数学表述已由 W. 海森伯和 E. 薛定谔 (E. Schrödinger) 在 1925—1926 年间建立起来。测不准原理体现了这一数学表述的物理内容。