

量子力学原理

上册

[苏] Д. И. 布洛欣采夫著

吴伯泽译

人民教育出版社

本书系根据苏联国立高等学校出版社 (Государственное издательство «Высшая школа») 出版的布洛欣采夫 (Д. И. Блохинцев) 所著的“量子力学原理” (Основы квантовой механики) 1963 年版译出的。内容限于讨论非相对论量子力学, 前面叙述量子力学的基础及数学形式, 后面列举非相对论量子力学在各方面的应用, 分上下两册出版, 可供我国有关高等学校参考。

本书曾由叶蕴理、金星南根据原书 1949 年版译出, 于 1956 年由原高教出版社出版, 1965 年又由吴伯泽改译再版, 这次是根据 1965 年版由我社重印。

量子力学原理

上册

[苏] Д. И. 布洛欣采夫著

吴伯泽译

*

人民教育出版社出版
新华书店北京发行所发行
北京印刷一厂印刷
通县满庄装订厂装订

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 11.375 字数 279,000

1965 年 12 月第 1 版 1981 年 9 月第 2 次印刷

印数 2,001—10,700

书号 13012·0572 定价 1.00 元

本书系根据苏联国立高等学校出版社 (Государственное издательство «Высшая школа») 出版的布洛欣采夫 (Д. И. Блохинцев) 所著的“量子力学原理” (Основы квантовой механики) 1963 年版译出的。

内容限于讨论非相对论量子力学, 前面叙述量子力学的基础及数学形式, 后面列举非相对论量子力学在各方面的应用, 分上下两册出版, 可供我国有关高等学校参考。

本书曾由叶蕴理、金星南根据原书1949年版译出, 于1956年由原高教出版社出版, 1966年曾由吴伯泽改译, 但未及付印, 这次是根据1966年版由我社出版。

量子力学原理

下 册

[苏] Д. И. 布洛欣采夫著

吴 伯 泽 译

*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京印刷一厂印刷

通县满庄装订厂装订

*

开本 850×1168 1/32 印张 11.625 字数 282,000

1966年2月第1版 1981年9月第1次印刷

印数 0,001—8,800

书号 13012·0573 定价 1.05元

量子力学原理

下 册

[苏]Д.И. 布洛欣采夫著

吴 伯 泽 译

人 民 教 育 出 版 社

第二版序

这本“量子力学原理”的第二版，就像第一版（1944年出版的“量子力学导论”）一样，基本上也是根据作者在以罗蒙诺索夫命名的国立莫斯科大学物理系多年讲授量子力学课程的讲义编成的。

这本讲义的自然发展促使我在这第二版中做了许多修改和补充。

关于量子力学中的态的概念以及关于测不准关系的讨论的那一章，这次进行了重大的改动，问题讨论得更加清楚了。在新版中，也讨论了量子力学的方法论的问题，并批判了目前国外流行着的量子理论的唯心主义观念。此外，还增加了一些关于近年来量子力学的应用的进一步发展的内容。

如同在第一版中那样，在这一版中，我也力求能使量子力学的初学者对于这门科学的物理基础和数学工具有正确的了解，并且从这门科学的主要应用方面来说明它的成就。

我的同事们提出许多宝贵的意见，使本书得到很多改进，我非常感谢他们，特别是感谢德喇布金娜（С. И. Драбкина）、马尔科夫（М. А. Марков）、索科洛夫（А. А. Соколов）、苏伏罗夫（С. Г. Суворов）、费恩堡（Е. Л. Фейнберг）等人。莫斯科大学的哲学讨论会和苏联科学院物理研究所的理论物理学家们对本书最后一节的讨论，也非常有助于这一节的修订。

我还要向莫斯科大学物理系的同学表示谢意，他们帮助我改正了第一版的印误和其他错误的地方。

第三版序

“量子力学原理”的这次新版是经过重大修改的。在新版中作了一系列的修改和补充。

补充的地方主要是碰撞理论、量子力学在原子核理论方面以及在基本粒子理论方面的应用。

最近几年来,由于原子核物理学的迅速发展,量子力学的这几个部分的发展是如此之大,因此,已经没有必要再说明这些补充是否合理了。此外,在新版中也添入了一些方法论方面的补充,例如,在准经典近似方面、在克累布施-郭尔丹系数的理论方面,以及在现代物理学工作者所需知道的许多别的知识方面,都作了这样的补充。

新版中所作的修改不仅是在于消灭显而易见的晦涩之处,并且还各种表述和原理改得更加确切一些。在后一方面,我要感谢许多把他们的批评和希望告诉我的人。

这本书的主要意图和精神仍旧保持前两版的特色:使量子力学的初学者能够正确地理解量子力学的物理基础和数学工具,并用一些最简单的例子来说明在原子物理学的各个领域(固体理论、原子和分子的物理学、光学、磁学、原子核理论等等)中应用量子力学的方法。

其次,我向来认为正确的方法论具有十分重大的意义:如果不掌握方法论,就是最杰出的天才也会染上小手工业者的色彩。

因此,在这本书中到处都或隐或现地贯穿着唯物主义的方法论。

过去几年中,这本书已被翻译成许多种文字在许多国家中出

版。意识到这本书促进了现代物理学知识及对现代物理学的兴趣在许多民族中传播,我确实感到了最大的快乐。

最后,我对那些帮助我改进这本书的人、对我的同事和学生,表示深深的谢意。我特别感谢马尔科夫和德喇布金娜:马尔科夫看过新版的手稿,并提出了一系列有益的意见和建议;德喇布金娜则非常积极地参加了新版的修改和补充工作。

我也十分感谢“高等学校”出版社的工作人员,他们花费了不少劳动,使这本书得以出版得又好又快。

布洛欣采夫

上册目录

第二版序	vi
第三版序	vii
绪论	1
第一章 量子理论的基础	4
§ 1. 光量子的能量和动量	4
§ 2. 光量子的能量守恒律和动量守恒律的实验验证	8
§ 3. 原子性	13
§ 4. 玻尔理论	21
§ 5. 辐射的初步量子理论	24
§ 6. 黑体辐射	29
§ 7. 德布罗意波·群速度	31
§ 8. 微观粒子的衍射	37
第二章 量子力学的基础	44
§ 9. 德布罗意波的统计解释	44
§ 10. 微观粒子的位置的几率	47
§ 11. 态的迭加原理	50
§ 12. 微观粒子的动量的几率	53
§ 13. 坐标函数和动量函数的平均值	56
§ 14. 量子力学的统计系综	58
§ 15. 测不准关系	63
§ 16. 测不准关系式的说明	70
§ 17. 测量仪器的作用	79
第三章 力学量的算符表示	86
§ 18. 线性自轭算符	86
§ 19. 量的平均值和均方差的一般公式	91
§ 20. 算符的本征值和本征函数以及它们的物理意义·“量子化”	93
§ 21. 本征函数的基本性质	97
§ 22. 测量结果的几率的普遍计算方法	101
§ 23. 一些不同力学量可以同时测量的条件	105
§ 24. 微观粒子的动量算符和坐标算符	107
§ 25. 微观粒子的角动量算符	109

§ 26. 能量算符和哈密頓函数	115
§ 27. 哈密頓量	118
第四章 态随着时间的改变	123
§ 28. 薛定諤方程	123
§ 29. 粒子数的守恒	129
§ 30. 定态	133
第五章 力学量随着时间的改变	136
§ 31. 算符对時間的导数	136
§ 32. 量子力学的运动方程·厄倫費斯特定理	139
§ 33. 运动积分	142
第六章 量子力学与经典力学及光学的关系	146
§ 34. 从量子方程到牛頓方程的变换	146
§ 35. 从薛定諤含时方程到經典的哈密頓-雅可俾方程的变换	151
§ 36. 量子力学与光学	155
§ 37. 准經典近似(溫側-克拉梅尔-布里淵方法)	159
第七章 表象理论的基础	164
§ 38. 量子系統的态的各种表象	164
§ 39. 表示力学量的算符的各种表象·矩陣	166
§ 40. 矩陣及其运算	169
§ 41. 用矩陣形式的算符表示的量子之平均值及值譜的确定	175
§ 42. 用矩陣形式表示的薛定諤方程及算符与時間的关系	178
§ 43. 么正变换	183
§ 44. 从一个时刻到另一时刻的么正变换	186
§ 45. 密度矩陣	189
第八章 微观粒子在势力场中运动的理论	194
§ 46. 引言	194
§ 47. 諧振子	195
§ 48. 能量表象中的振子	203
§ 49. 在有心力場中的运动	206
§ 50. 庫侖場中的运动	215
§ 51. 氢原子的光譜和波函数	221
§ 52. 单价原子中电子的运动	231
§ 53. 原子中的电流·磁子	235
§ 54. 双原子分子的量子能級	238
§ 55. 电子在周期場中的运动	246

第九章 带电的微观粒子在电磁场中的运动·····	258
§ 56. 任意电磁场·····	258
§ 57. 带电的自由粒子在均匀磁场中的运动·····	264
第十章 电子的固有角动量和磁矩(自旋)·····	269
§ 58. 电子自旋的存在的实验证明·····	269
§ 59. 电子的自旋算符·····	273
§ 60. 自旋函数·····	277
§ 61. 泡利方程·····	282
§ 62. 光谱线在磁场中的劈裂·····	285
§ 63. 自旋在交变磁场中的运动·····	291
§ 64. 总角动量的性质·····	295
§ 65. 在计及电子自旋时原子谱项的编号·光谱的多重结构·····	301
第十一章 微扰理论·····	307
§ 66. 问题的提出·····	307
§ 67. 不存在简并化时的微扰·····	310
§ 68. 存在简并化时的微扰·····	315
§ 69. 在二重简并化情况下能级的劈裂·····	321
§ 70. 关于去简并化的几点说明·····	325
第十二章 微扰理论的最简单的应用·····	328
§ 71. 非谐振子·····	328
§ 72. 光谱线在电场中的劈裂·····	331
§ 73. 氢原子的光谱线在电场中的劈裂·····	335
§ 74. 光谱线在弱磁场中的劈裂·····	340
§ 75. 能级在弱磁场中的劈裂的直观解释(矢量模型)·····	346
§ 76. 连续谱的微扰理论·····	348

下册目录

第十三章 碰撞理论	357
§ 77. 在微观粒子碰撞理論中問題的提法	357
§ 78. 用玻恩近似法計算彈性散射	362
§ 79. 原子对高速带电微观粒子的彈性散射	368
§ 80. 精确的散射理論· 散射波的位相与有效截面	376
§ 81. 一般散射情况	383
§ 82. 带电粒子在庫侖場中的散射	389
第十四章 量子跃迁理论	392
§ 83. 問題的提出	392
§ 84. 在与時間有关的微扰影响下的跃迁几率	396
§ 85. 在与時間无关的微扰的影响下的跃迁	402
第十五章 原子系统对光的辐射、吸收和散射	404
§ 86. 引言	404
§ 87. 光的吸收和輻射	406
§ 88. 輻射系数和吸收系数	412
§ 89. 对应原理	415
§ 90. 偶极輻射的选择定則	420
§ 91. 輻射譜中的强度	426
§ 92. 色散	426
§ 93. 联合散射	436
§ 94. 波中电磁場的位相在原子内部的改变的計算· 四极輻射	439
§ 95. 光电效应	445
第十六章 微观粒子对势垒的穿透	455
§ 96. 問題的提出和最簡單的情况	455
§ 97. “隧道效应”的表观佯謬性	462
§ 98. 金屬的冷电子发射	464
§ 99. 三維势垒· 准定态	467
§ 100. α 衰变理論	474
§ 101. 原子在强电場中的电离	479
第十七章 多体问题	483

§ 102. 关于多体问题的概述	483
§ 103. 微观粒子系统的总动量守恒律	488
§ 104. 微观粒子系统的重心的运动	490
§ 105. 微观粒子系统的角动量守恒律	494
§ 106. 系统的角动量算符的本征函数·克累布施-郭尔丹系数	501
§ 107. 各种守恒律与空间及时间的对称性之间的关系	505
第十八章 多体运动理论的一些最简单的应用	511
§ 108. 关于原子核在原子中的运动的考虑	511
§ 109. 进行着小振动的微观粒子系统	514
§ 110. 原子在外场中的运动	519
§ 111. 用外场致偏法测定原子的定态的能量	523
§ 112. 电子与原子的非弹性碰撞·用碰撞方法测定原子定态的能量	529
§ 113. 量子力学中的能量守恒律和时间的特殊作用	536
第十九章 由相同的微观粒子组成的系统	539
§ 114. 微观粒子的全同性原理	539
§ 115. 对称态和反对称态	545
§ 116. 玻色粒子与费米粒子·泡利原理	548
§ 117. 费米粒子系统和玻色粒子系统的波函数	557
第二十章 二次量子化与量子统计法	561
§ 118. 二次量子化	561
§ 119. 量子跃迁理论与二次量子化方法	571
§ 120. 关于碰撞的假说·费米-狄拉克气体与玻色-爱因斯坦气体	573
第二十一章 多电子原子	583
§ 121. 氢原子	583
§ 122. 氢原子的近似定量理论	593
§ 123. 交换能	599
§ 124. 原子的量子力学和门捷列夫的元素周期系统	603
第二十二章 分子的结构	616
§ 125. 氢分子	616
§ 126. 化学力的本性	630
§ 127. 分子间的色散力	634
§ 128. 双原子分子中原子核自旋的作用	638
第二十三章 磁性现象	641
§ 129. 原子的顺磁性和反磁性	641

§ 130. 铁磁性	644
第二十四章 原子核	651
§ 131. 核力·同位旋	651
§ 132. 核子系统的态的分类	655
§ 133. 氘的理论	657
§ 134. 核子的散射	659
§ 135. 具有自旋的粒子在散射时的极化	666
§ 136. 量子力学在基本粒子的分类法上的应用	669
第二十五章 结论	673
§ 137. 量子力学的形式结构	673
§ 138. 量子力学的适用范围	677
§ 139. 几个认识论的问题	681
附录	
I 傅里叶变换	694
II 简并化情况下的本征函数	696
III 连续谱的本征函数的正交性和归一化· δ 函数	697
IV 算符的可对易性的意义	700
V 球函数 $Y_{lm}(\theta, \varphi)$	702
VI 哈密顿方程	706
VII 曲线坐标系中的薛定谔方程和运动方程	709
VIII 对波函数的要求	712
IX 振子方程的解	714
X 均匀磁场中的电子	718
XI 雅可俾坐标	719

緒 論

最近几十年来，关于原子现象的科学不仅构成了现代物理学最重要的一个部分，并且还在现代技术中得到了广泛的应用。

仅仅极其肤浅地看一看原子现象这个奇妙的领域，也就已经能够发现一些新的、与宏观世界有本质上不同的特点了。

我们在微观世界中所碰到的首先是原子性。各种最简单的基本粒子都是由完全固定的特征(电荷、质量、等等)来标记的，并且对于所有同一类粒子来说，这些特征是完全相同的。

这样的原子性在宏观世界中是不存在的。宏观客体是大量基本粒子的集合。宏观现象的规律，就是大量粒子的集合所特有的规律。

这一切都表明，按照宏观物体的形象和相似性去考察微观粒子，就会犯方法论上的错误。即使经典力学的质点也完全不是微观粒子的抽象的、理想化的形象，而仍然是宏观物体的抽象的、理想化的形象，只不过这时的宏观物体的线度比起问题中所牵涉到的距离来小到可以忽略就是了。

微观世界的原子性还不仅在于微观粒子本身的特征是固定的。它还表现在对于机械运动存在着某种绝对量度。普朗克恒量 $h=1.05 \times 10^{-27}$ 尔格秒就是一种这样的量度。它在微观粒子的力学中具有头等重要的意义。在过去一段很长的时间内，物理学家们一直忽视了从量变到质变的规律，而力求仍然在经典的宏观理论的框子里来理解原子现象。普朗克恒量的发现第一次提出严重的警告：把宏观世界的规律机械地搬到微观世界的领域中去的做法是毫无根据的。

本世纪二十年代,发现了一些新的实验事实,这些事实使得物理学家们不得不彻底摒弃上述做法。当时发现,电子显示出波动的性质:如果让电子束通过晶体,那么,粒子在屏上的分布是与具有适当波长的波的强度分布相同的。这里我们所得到的的是与经典力学格格不入的微观粒子衍射现象。后来又证明了,这种现象不仅是电子所特有的,而且是所有微观粒子普遍地具有的。这样,就发现了一种原则上是新的、十分普遍的规律性。

微观粒子的运动在许多方面与其说接近于质点沿轨道的运动,不如说更接近于波的运动。衍射现象是与关于粒子沿轨道运动的假设不相容的。因此,经典力学的原理便不能用来分析微观粒子的运动了,因为轨道这个概念是经典力学的基本概念之一。

“粒子”这个词本身在用到微观世界的个体上去时,常常会在我们的概念中引起与经典力学中的质点的类比,这是与实际情况不相适应的。

因此,在所有情况下,当我们在本书中为简单起见而用“粒子”这个词来代替“微观粒子”时,读者都应该注意到这一点。

经典力学只是一种近似,它只能用来考察大质量物体在变化得相当缓慢的场(宏观场)中的运动。在这些条件下,普朗克恒量是没有意义的:它可以看作小到可以忽略不计。同样,衍射现象也变得不重要了。在小尺度的区域内,即在微观世界的领域内,经典力学便为量子力学所取代了。因此,量子力学的研究对象是微观粒子的运动。

量子力学是一种统计理论。例如,借助于量子力学,可以预言出从晶体反射回来的电子在照相底板上的平均分布是怎样的,但是,关于每一个单个电子射到底板上的地点,则只能作出概率论的判断:“在某处找到这个电子的几率是多大”。

我们在统计力学中碰到的情形也是如此。但是,在量子力学

与经典的统计力学之间,仍然有着深刻的差异。

经典统计力学的基础是牛顿力学,牛顿力学允许我们描述每一个粒子的历史,因此,在原则上有可能给出每一个个别粒子过去的全部经历。

与统计力学相反,现代量子力学不是根据任何个别微观过程的理论建立起来的。量子力学是利用统计集合(系综)来研究微观粒子的个体性质和各个个别的微观过程。这些统计系综是用借自经典宏观物理学的特征(如动量、能量、坐标等等)来确定的。因此,当在量子力学中谈到某一微观现象的再现(譬如说到某同一实验的重复)时,那么,这时所指的是:对于这个微观物理学现象,它的宏观条件再现了,也就是说,实现了同一个统计系综。

因此,量子力学是在微观粒子与宏观测量仪器的关系上来研究微观粒子的性质(统计系综)的,因为只有借助于这些宏观仪器,才能够测定一般所说的“粒子的态”,也就是说,才能够把统计系综确定下来。

在上述问题提法所规定的范围内,量子力学是二十世纪原子物理学的发展中最大的一步。原子物理学目前已经越出物理学的范围,进入一个新的工程技术的领域中去了。

第一章 量子理論的基础

§ 1. 光量子的能量和动量

还在量子力学开始发展之前，就已经有了光的量子理论。上世纪末，在关于光的本性的两种观点(微粒观点和波动观点)的斗争中，波动观点似乎终于以麦克斯韦(Maxwell)理论所赋予的形式取得了胜利。赫兹(Hertz)对电磁波进行的实验、列别捷夫(Лебедев)对光压存在的证明、以及许多实验物理学家用巧妙的办法所得到的其他事实，看来都确凿不移地证明了麦克斯韦的观点的正确性。

然而光的电磁理论也并没有大获全胜。虽然与光的传播有关的一切问题，波动理论都已经成功地解决了，但是还有一系列与光的发射及吸收有关的重要现象，却不肯服服贴贴地纳入波动表象的框子里。例如，尽管理论物理学家们尽了一切努力，在波动理论的基础上推导出的黑体辐射光谱的能量分布规律，仍然不仅与实验显著地不相符合，并且还包含有内在的矛盾。

1901年，普朗克(Planck)表述了一个与实验相符合的、关于处在热平衡状态中的绝对黑体的辐射光谱的能量分布的定律。这个定律是发展量子理论的出发点。这个定律的基础是假设物质对光的发射和吸收具有不连续的特性，即假设光是以一个有限的份量——光量子——一份一份地发射和吸收的。

这样一个光量子的能量 ε 是与光的振动频率 ω 成正比的，它可用如下等式表示：

$$\varepsilon = h\omega. \quad (1.1)$$