

高等学校教学用书

量子力学原理

上册

Д. И. 布洛欣采夫著

人民教育出版社

高等学校教学用书



量子力学原理

上册

Д. И. 布洛欣采夫著
叶蘊理 金星南译

人民教育出版社

高等学校教学用书



量子力学原理

下册

Д. И. 布洛欣采夫著
叶蕴理 金星南译

高等教育出版社

本書系根据苏联國立科學技術理論書籍出版社(Гостехиздат)出版的布洛欣采夫(Д. И. Блохинцев)所著的量子力學原理(Основы квантовой механики) 1949 年版譯出的。原書經苏联高等教育部審定为大學參考書。

本書限於討論非相对論量子力學, 前面敘述量子力學的基礎及數學形式, 后面列舉非相对論量子力學在各方面的应用, 由叶蘊理、金星南二位同志合譯, 分上下兩冊出版。

本書原由高等教育出版社出版。自 1960 年 4 月 1 日起, 高等教育出版社奉命与人民教育出版社合并, 統称“人民教育出版社”。因此本書今后用人民教育出版社名義繼續印行。

量 子 力 学 原 理

上 册

Д. И. 布洛欣采夫著

叶蘊理 金星南譯

人民教育出版社出版 高等学校教材編輯部
北京宣武門內承恩寺 7 号
(北京市書刊出版業營業許可證出字第 2 号)

商 务 印 书 馆 上 海 厂 印 刷
新 华 书 店 上 海 发 行 所 发 行
各 地 新 华 书 店 經 售

統一書号 13010·669 开本 850×1168 1/32 印張 89/16
字數 230,000 印數 26,501—30,500 定价 (4) 洋 0.85
1956 年 5 月第 1 版 1960 年 6 月上海第 7 次印刷

本書系根据苏联国立技术理論書籍出版社 (Гостехиздат) 出版的布洛欣采夫 (Д. И. Блохинцев) 所著的“量子力学原理”(ОСНОВЫ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ) 1949 年版譯出的。原書經苏联高等教育部审定为大学参考書。

本書由叶蘊理、金星南二位同志譯出,分上下两册出版。

下册包括微扰理論及其应用、量子跃迁理論、势壘、原子結構、分子結構、等等。

本書原由商务印書館出版,自 1959 年 6 月改由本社出版。

量 子 力 学 原 理

下 册

Д. И. 布洛欣采夫著

叶蘊理 金星南譯

高等教育出版社出版 北京宣武門內承恩寺 7 号
(北京市书刊出版业营业許可証出字第 054 号)

上海大东集成联合印刷厂印刷 新华书店发行

统一书号 13010·509 开本 850×1168 1/32 印张 11 2/16
字数 295,000 印数 1—12,000 定价 (4) 1.30
1959 年 6 月第 1 版 1959 年 6 月上海第 1 次印刷

第二版导言

这本“量子力学原理”的第二版，正如第一版（在 1944 年出版的“量子力学导论”），基本上是根据著者在以罗蒙诺索夫命名的国立莫斯科大学物理系多年授课的讲义而编成的。

这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。

关于在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曾经做了主要的修改，在这一版里说得更加清楚了。在这新版中也讨论了量子力学的方法论的问题，并批判了现在国外流行着的量子理论的唯心观念。此外，还增加了一些关于近年来量子力学应用的进一步发展的内容。

有如在第一版中一样，在这书中我企图使初学量子力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。

和我在一起工作的同志们所提出的许多宝贵意见，使本书有很多改进，我向他们致十二分的谢意；我特别要向德拉平娜（С. И. Драбина）、马尔科夫（М. А. Марков）、苏科洛夫（А. А. Соколов）、苏伏洛夫（С. Г. Суворов）、费恩贝格（Е. А. Фейнберг）致谢。莫斯科大学哲学讨论会上的讨论和苏联科学院理论物理研究所内的讨论，使本书最后一章的完成，得到很大的帮助。

我还要向莫斯科大学物理系学生们致谢，他们曾协助修正第一版的误刊和其他错误的地方。

上册目录

第二版导言

緒論	1
----	---

第一章 量子理論的基础	4
-------------	---

§ 1. 光量子的能量和动量	4
§ 2. 光量子的能量守恒定律和动量守恒定律在实验上的証明	7
§ 3. 原子性	12
§ 4. 波尔理論	17
§ 5. 輻射的初步量子理論	19
§ 6. 黑体輻射	24
§ 7. 德波洛利波. 群速度	25
§ 8. 电子、原子、分子的繞射	31

第二章 量子力学的基础	36
-------------	----

§ 9. 德波洛利波的統計解釋	36
§ 10. 微觀粒子的位置的几率	39
§ 11. 态的迭加原理	41
§ 12. 微觀粒子的动量的几率	42
§ 13. 坐标的函数和动量的函数的平均值	46
§ 14. 量子力学的統計系統	47
§ 15. 測不准关系	52
§ 16. 对于測不准关系的引証	59
§ 17. 測量仪器的作用	66

第三章 力学量用算符的表示	73
---------------	----

§ 18. 綫型自輻算符	73
§ 19. 数量的平均值和平均平方差的普遍公式	78
§ 20. 算符的本征值和本征函数以及它們的物理意义。“量子化”	79
§ 21. 本征函数的基本性质	83
§ 22. 測量結果的几率的普遍計算法	87

§ 23. 各种力学量可以同时测量的条件	91
§ 24. 微观粒子的坐标算符和动量算符	92
§ 25. 微观粒子的角动量算符	94
§ 26. 能量算符与哈密顿函数	99
§ 27. 哈密顿算符	101
第四章 态在时间上的改变	106
§ 28. 薛定格方程	106
§ 29. 粒子数目的守恒	111
§ 30. 定态	115
第五章 力学量在时间上的改变	118
§ 31. 算符对于时间的导数	118
§ 32. 量子力学中的运动方程。恩费斯脱定理	121
§ 33. 运动积分	124
第六章 量子力学对古典力学和光学的关系	127
§ 34. 从量子方程到牛顿方程	127
§ 35. 从含有时空间的薛定格方程到古典的哈密顿-雅可俾方程	132
§ 36. 量子力学与光学	136
第七章 表象的基本理论	141
§ 37. 量子体系的态的各种表象	141
§ 38. 表明力学量的算符的各种表象。矩阵	143
§ 39. 矩阵和对于它们的演算	146
§ 40. 在矩阵形式下的算符所表示的数量的平均值和谱的定义	151
§ 41. 在矩阵形式下的薛定格方程和算符对于时间的关系	154
§ 42. 么正变换	158
§ 43. 从一时间到另一时间的么正变换	160
§ 44. 密度矩阵	162
第八章 在势能场中微观粒子的运动理论	166
§ 45. 前言	166
§ 46. 谐振子	167
§ 47. 在能量表象中的振子	174
§ 48. 在有心力场中的运动	177
§ 49. 在库仑场中的运动	185

§ 50. 氢原子的光谱和波函数	191
§ 51. 在单价原子中电子的运动	200
§ 52. 原子中的电流。磁子	204
§ 53. 二原子分子的量子能级	206
§ 54. 在周期场中电子的运动	214
第九章 带电微观粒子在电磁场中的运动	225
§ 55. 任意电磁场	225
§ 56. 在均匀磁场中带电自由粒子的运动	231
第十章 电子的本征力学角动量和磁矩(自旋)	235
§ 57. 实验证明电子自旋的存在	235
§ 58. 电子的自旋算符	238
§ 59. 自旋函数	242
§ 60. 泡利方程	246
§ 61. 光谱线在磁场中的分裂	249
§ 62. 在可变磁场中的自旋运动	254
§ 63. 总角动量的性质	258
§ 64. 考虑电子自旋时原子光谱项的编序。光谱的多重结构	263

下 册 目 录

第十一章 微扰理論	269
§ 65. 問題的提出	269
§ 66. 退化不存在时的微扰	272
§ 67. 退化存在时的微扰	276
§ 68. 在二重退化下能級的分裂	282
§ 69. 关于除去退化的几点注意	285
第十二章 微扰理論的簡單应用	289
§ 70. 非諧振子	289
§ 71. 在电場中光譜綫的分裂	291
§ 72. 在电場中氢原子的光譜綫的分裂	296
§ 73. 在弱磁場中光譜綫的分裂	300
§ 74. 用圖解法來說明能級在弱磁場中的分裂(向量模型)	306
第十三章 对于連續譜的微扰理論和碰撞理論	309
§ 75. 連續譜的微扰理論	309
§ 76. 在微觀粒子碰撞理論中所提出的問題	316
§ 77. 用波恩近似法計算彈性散射	321
§ 78. 高速带电微觀粒子对原子的彈性散射	326
§ 79. 准确的散射理論。 散射波的周相与有效截面	333
§ 80. 氦的基本理論	339
第十四章 量子跃迁理論	343
§ 81. 問題的提出	343
§ 82. 在与時間有关的微扰影响下的跃迁几率	347
§ 83. 在与時間无关的微扰影响下的跃迁过程	352
第十五章 原子体系对于光的輻射、吸收、散射	353
§ 84. 导論	353
§ 85. 光的吸收和輻射	355
§ 86. 輻射系数和吸收系数	360
§ 87. 对应原理	364
§ 88. 偶極輻射的选择法則	367

§ 89. 在輻射譜中的強度	372
§ 90. 色散	373
§ 91. 組合散射	381
§ 92. 在原子內部波的电磁場的周相改变的計算。四極輻射	384
§ 93. 光电效应	389
第十六章 微觀粒子对势壘的穿透	398
§ 94. 問題的提出和最簡單的情况	398
§ 95. 从表面看“隧道效应”的伴護性	404
§ 96. 金屬电子的冷輻射	406
§ 97. 三維空間的势壘。似穩态	409
§ 98. α 蛻变理論	415
§ 99. 在强电场中原子的电离	420
第十七章 多体問題	423
§ 100. 关于多体問題的一般主要点	423
§ 101. 微觀粒子体系的总动量守恒定律	428
§ 102. 微觀粒子体系的重心运动	430
§ 103. 微觀粒子体系的动量矩守恒定律	433
第十八章 多体运动理論的簡單应用	440
§ 104. 原子中計及原子核的运动	440
§ 105. 做微小振动的微觀粒子体系	443
§ 106. 原子在外場中的运动	448
§ 107. 由外場引起偏离的方法来决定原子的定态的能量	451
§ 108. 电子对原子的非彈性碰撞。用碰撞方法决定原子的定态的能量	457
§ 109. 在量子力学中的能量守恒定律	463
第十九章 由同样的微觀粒子所組成的体系	466
§ 110. 微觀粒子全同性原理	466
§ 111. 对称态与反对称态	471
§ 112. 博色粒子与費米粒子。泡利原理	475
§ 113. 費米粒子体系与博色粒子体系的波函数	483
第二十章 二次量子化与量子統計	487
§ 114. 二次量子化	487
§ 115. 量子跃迁理論与二次量子化方法	496
§ 116. 关于碰撞的假設。費米-狄喇克气体与博色-爱因斯坦气体	498
第二十一章 多电子原子	507
§ 117. 氫原子	507

§ 118. 氦原子的近似定量理論	513
§ 119. 交換能量	522
§ 120. 原子的量子力学和門捷列夫的元素周期系統	526
第二十二章 分子的組成	537
§ 121. 氫分子	537
§ 122. 化学力的性質	550
§ 123. 分子間的色散力	554
§ 124. 在二原子分子中原子核自旋的作用	558
第二十三章 磁性現象	561
§ 125. 原子的順磁性和反磁性	561
§ 126. 鉄磁性	564
第二十四章 結論	569
§ 127. 量子力学的公式化方式	569
§ 128. 量子力学适用的範圍	573
§ 129. 几个認識論的問題	577
附录	588
I 傅立叶变换	588
II 退化情况下的本征函数	590
III 連續譜的本征函数的正交性和归一化。 δ 函数	592
IV 算符对易性的意义	595
V 球面函数 $Y_{lm}(\theta, \varphi)$	597
VI 哈密頓方程	601
VII 在曲綫坐标系中的薛定格方程和运动方程	605
VIII 波函数的条件	608
IX 振子方程的解	610
X 在均匀磁場中的电子	614
XI 雅可傳坐标	615

緒 論

近数十年来，原子現象的科学不但在近代物理学中成为重要的一章，并且在近代技术中也获得广泛的应用。

就最表面地来看这特別的原子現象的領域，已經可以发现新的特点，这种特点和在宏观世界領域內所看到的特点有本质上的区别。

我們首先在微观世界中所碰到的是原子性。简单的基本粒子完全由一定的特征（如电荷、质量等）标记着，凡是同样的粒子所有的这些特征都是相同的。

象这样的原子性在宏观世界中是不存在的。宏观物体是许许多多基本粒子的集合。宏观現象的規律也就是许许多多粒子的集合所特有的規律。

这些都指明假使用研究宏观物体的类似方式来研究微观粒子，那就要犯方法論的錯誤。在古典力学中的物质点是具有抽象的、理想的形态，这完全不是微观粒子，而是宏观物体，它的大小与在問題中所涉及的距离来比要小得多。

微观世界的原子性不仅在于微观粒子有一定的特征，它同时也由力学运动的某种绝对度量的存在表现出来。这种度量就是普朗克常数 $h = 1.05 \times 10^{-27}$ 尔格-秒。这常数在微观粒子的力学中具有头等重要的意义。物理学家久已疏忽了由量变到质变的規律，并且企图把原子現象的观念保留在古典宏观理論的范畴中。普朗克常数的发现是第一次严重地警告說：把宏观領域中的定律机械地搬到微观領域中去是没有根据的。

在本世紀的二十年代发现了許多新奇的实验事实，这些事实迫得

人們徹底放棄了這條路徑。曾經指明的是電子表現着波動特性：如果電子束通過晶体，於是這些粒子在屏上面的分布好象具有適當波長的波的強度的分布。我們得到在古典力學中所沒有的微觀粒子的繞射^①現象。後來又証明了這種現象不但為電子所具有，而普遍地為其他一切粒子所具有。這樣，就發現了一種原則上新穎的并十分普遍的規律。

微觀粒子的運動在很多方面看起來與波的運動較近，而與質點沿軌道的運動較遠。繞射現象和粒子沿軌道運動的假定是根本不相容的。在古典力學中軌道概念是基本觀念之一；所以用古典力學的原理來分析微觀粒子的運動是不適當的。

對於微觀世界的個體應用“粒子”這名詞時，使我們要聯想到這種粒子與古典力學的物質點之間的相似性，但要知道實際上它們之間是差得很遠的。

在本書中許多地方，我們為簡單起見用“粒子”來代替“微觀粒子”，那時必須注意上面的說明。

古典力學只是某種近似，它適于研究質量大的物體在變化很小的場（宏觀場）中的運動。在這些條件下，普朗克常數沒有重要性：可以認為它是小得可以忽去。繞射現象也變成不主要。在尺度小的領域內（在微觀世界的領域內），量子力學代替古典力學。這樣，微觀粒子的運動是量子力學所研究的對象。

量子力學是統計的理論。例如利用量子力學可以預言從晶体反射到照相板上的電子平均地是怎樣分布的，但是對於每一個個別電子所射到的位置，則只能給出几率性的判斷：“某處發現這電子的几率若干？”

這和我們在統計力學中所碰到的情況相似。但是量子力學和古典統計力學之間還有深刻的差別。

① “繞射”也叫作“衍射”。

古典統計力學是建立在牛頓力學基礎上的。牛頓力學可以描述每一顆粒子的歷史，以致原則上可以給出每一個個別樣品的歷程。

和統計力學相反，近代量子力學不是建立在任何個體的微觀過程的理論上的。它一開始就和統計集合——系綜——打交道。這些統計系綜是用宏觀的古典物理學的特徵（如動量、能量、坐標等）來確定的。所以在量子力學中說到微觀現象再發生，例如同一實驗的重複，那就指微觀物理現象的宏觀條件的再產生，即指同樣的統計系綜的實現。

因此量子力學是在微觀粒子對於宏觀測量儀器的關係上來研究微觀粒子的統計系綜。用這些宏觀測量儀器可以確定所謂“粒子的態”，即固定統計系綜。

在上述所提的問題的範圍內，量子力學是在二十世紀原子物理學發展中的巨大成就；現在原子物理學已經超出物理學的界限而蹈進新的工程技術的領域內了。

第一章 量子理論的基础

§1. 光量子的能量和动量

光的量子理論的产生是先于量子力学的发展。在上世紀末,对于光的本质发生了两种观点的爭論:微粒观点和波动观点的爭論,最后波动观点在麦克斯韦(Maxwell)理論所赋予的形式下获得了胜利。关于电磁波的赫茲(Hertz)实验,列別捷夫(Лебедев)的光压存在的証明,以及由于实验物理学家的实验所得到的其他事实,显然无可爭辯地証明了麦克斯韦观点的正确性。

但是光的电磁理論的成就并不是沒有缺点的。虽然所有关于光的傳播的問題可用波动理論成功地解决了,但是关于光的发射和吸收的一系列重要現象,則不能在波动观念的范围內直接說明。例如,虽然经过許多理論物理学家的努力,在波动理論的基础上所推得的黑体輻射譜的能量分布規律,不但結果和实验显著地不符合,并且还有內在矛盾。

在1901年普朗克(Plank)找得了与实验相符合的絕對黑体輻射譜在热平衡下的能量分布規律。这个規律是量子理論发展的出发点。这規律的基础是假定物质发出光和吸收光具有不連續的特性,并且假定光成为一个一个有限部分——光量子——发出或吸收。

这种光量子的能量 ε 是和光的振動頻率 ω 成正比的,并且可用下列等式表示:

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

这里 $h = 1.05 \times 10^{-27}$ 尔格-秒是大家所知道的普朗克常数^①。

① 在旧的文献中所用的普朗克常数 h 常比这值大 2π 倍,即 6.61×10^{-27} 尔格-秒,并且用頻率 $\nu = \frac{1}{T}$ 来代替旋轉頻率 $\omega = \frac{2\pi}{T}$ (T —振動周期)。这里的常数在旧文献中是用 h 来表示的。

当爱因斯坦 (Einstein) 指出了描述光量子除了用能量 ε 外必需还要用动量 $p = \frac{\varepsilon}{c}$ (这动量的方向和光的传播方向相符合) 后, 光量子的表示才得到完善的形式。

如果引入波矢量 $\mathbf{k}$, 它的分量等于:

$$k_x = \frac{2\pi}{\lambda} \cos \alpha, \quad k_y = \frac{2\pi}{\lambda} \cos \beta, \quad k_z = \frac{2\pi}{\lambda} \cos \gamma,$$

式中 λ 是波长, 而 $\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma$ 是光波的法线的方向余弦, 于是光量子的动量的公式可以写为矢量形式:

$$\mathbf{p} = \hbar \mathbf{k}. \quad (1.2)$$

公式 (1.1) 和 (1.2) 是光的量子理论的基本方程, 这二个方程把光量子的能量 ε 和动量 $\mathbf{p}$ 同单色平面波的频率 ω 和波长 λ 联系起来, 而这单色平面波的传播方向是由矢量 $\mathbf{k}$ 决定的^①。

光的量子理论的深刻意义不是在于我们把光当做由具有能量 $\hbar\omega$ 和动量 $\hbar\mathbf{k}$ 的粒子所组成的气体 (这种表示由于它的明显性来说是有用的, 但是片面的), 而是在于微观体系 (电子、原子、分子等等) 和光之间的能量交换与动量交换是由一种光量子的产生与另一种光量子的消灭的方式进行的。

在对于光 (正确地說, 一般对于任何电磁辐射) 作用的任何体系上应用能量与动量守恒定律时, 这种看法得到正确的表现。为了明确起见, 我们将更具体地称为“碰撞”来代替相互作用。

我们用 E 和 $\mathbf{P}$ 表示某体系在“碰撞”前的能量和动量, 又用 E' 和 $\mathbf{P}'$ 表示这体系在“碰撞”后的能量和动量; 其次用 $\hbar\omega$ 和 $\hbar\mathbf{k}$ 表示光量子在“碰撞”前的能量和动量, 用 $\hbar\omega'$ 和 $\hbar\mathbf{k}'$ 表示光量子在“碰撞”后的能量和动量。

这里“碰撞”这个名词的正确意义是这样的: 在相互作用的结果下,

① 公式 (1.1) 与 (1.2) 是假定对于任何频率 ω 都适合的; 它们对于可见光和 γ 射线都是同样适合的。所以现在对于光量子, γ 射线量子等等都简称为“光子”。