

量子力学原理及其应用

A.A.索科洛夫 IO.M.罗斯库托夫 И.М.捷尔诺夫 王祖望译

上海科学技术出版社

量子力学原理及其应用

A. A. 索科洛夫 IO. M. 罗斯库托夫 И. M. 捷尔诺夫

王祖望译

上海科学技术出版社

КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА

А. А. СОКОЛОВ Ю. М. ЛОСКУТОВ И. М. ТЕРНОВ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ПРОСВЕЩЕНИЕ», 1965

量子力学原理及其应用

А. А. 索科洛夫 Ю. М. 罗斯库托夫 И. М. 捷尔诺夫

王祖望译

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

本书在上海发行所发行 上海群众印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 22 插页 1 字数 436,000

1983 年 6 月第 1 版 1983 年 6 月第 1 次印刷

印数 1—10,000

统一书号: 13119·1021 定价: (科四) 2.05 元

内 容 提 要

本书系统地阐述了量子力学原理，即原子粒子的运动理论。

本书的第一部分讨论了薛定谔的非相对论性的量子力学，其中除了标准的应用(谐振子，转子，氢原子等)外还探讨了量子理论的其它应用，例如固体理论原理，色散理论等等。

在第二部分讨论中不仅考虑到相对论效应，而且还考虑到自旋效应的狄拉克理论，以及多电子原子理论和最简单的分子理论。

最后，第三部分讲述了原子核理论和基本粒子的某些一般性问题，以及作为量子力学进一步发展的二次量子化方法的某些原理。

本书内容所讨论的方法是以这样的精神进行的，即不仅要帮助读者弄清楚量子力学的物理原理，而且还要使他们掌握量子力学的数学工具。

本书可作为大专院校物理系师生的教学参考书，也可供理论物理研究所有关人员及自修量子力学的读者阅读。

GF44/04

译者序

本书第一版于1963年出版,作者考虑到量子力学在近年中的发展,对第一版作了重要的修改和补充。全书共分三大部分:第一部分为非相对论性量子力学,包括光的量子理论、玻尔的量子理论、粒子的波动性、定态薛定谔方程等。第二部分为相对论性量子力学,包括克拉因-高登相对论标量波动方程、电子在磁场中运动的理论、电子的自旋等。第三部分为核物理学原理及基本粒子理论,包括核理论的某些问题、粒子的弹性散射等。

书中作者对量子力学的看法阐述了“决不能将量子力学看作绝对正确地反映微观世界全部规律性的理论;对微观粒子的认识永远也不会完结”等重要的观点。

本书另一特点是将量子力学原理应用到解决具体问题,占了很大篇幅。考虑到原书名容易与国内已有的译本的书名混淆,故改为《量子力学原理及其应用》。

在一些章节中特别是最后一节(§ 81),由于在1974年丁肇中小组发现了 J 粒子,从而这方面有了新的进展,译者相应地作了适当的补注。

1981年10月

序 言

本书阐述量子力学原理及其应用，而主要是研究原子粒子的运动。

摆在我们面前的任务是艰巨的。我们认为有必要在一本书内阐明有关原子学说的基本原理，即薛定谔的非相对论性理论(第一部分)，狄拉克的相对论性理论和复杂原子的理论(第二部分)，以及量子力学在固体物理 (§ 6)，原子核物理和基本粒子中的主要应用(第三部分)。

除了阐明某些一般性的理论问题外，我们也想教会学生运用量子力学的数学工具来分析与原子结构有关的具体问题。同时为了不过分地增加本书的篇幅，我们扼要地叙述某些带有狭隘性质的专题。在此情况下，一般地说，我们将介绍读者去寻找有关的文献(在苏联出版的专著和论文)。

如果在教科书中应用薛定谔方程能够比较好地深入研究具体问题的解(此时以利用特殊函数，首先是厄米，勒让德，拉盖尔多项式的二阶微分方程作为基本数学工具)，并可以用严密的形式来阐述，则在应用狄拉克理论来研究具体问题(例如氢原子)时，通常要进行非常繁复的计算(对这些计算所得到的解答很难看出其物理意义)，或者要运用某些物理上的考虑，所以实际上得到的是没有结论的结果，最多不过是在表面上得到了证明。因此为了在狄拉克理论范围内解决氢原子中电子运动的问题，我们采用了狄拉克方程的近似形式 (§ 19)，利用它不仅可以得到带有所要求近似的能级分裂公式，而且

也求得了选择定则 (§ 18, 20). 此外, 我们以一些简化形式来分析原子结构和原子核结构领域内某些最新的发现: 由电子-正电子真空所决定的兰姆(Lamb)能级的移动 (§ 22), β 衰变的费米理论 (§ 30), 以及核的壳层模型(见 § 28) 等等.

我们认为甚至只定性地描述某些在原子物理和原子核理论领域内的最近成就也是适当的. 这些成就即是分子(量子的)振荡器, 穆斯保尔(Mössbauer)效应及其应用 (§ 29), 宇称不守恒问题 (§ 30), 基本粒子的分类法 (§ 31) 等等.

因为目前已出版了较多内容很好的量子力学学习题集, 因此我们只研究某些特殊的习题, 它们有时能给一般理论以说明和补充^①.

这一本量子力学教程是以我在莫斯科州师范学院(从 1945 到 1948 年)以及在以罗蒙诺索夫命名的国立莫斯科大学(1945 年开始)给物理系学生讲学时的讲义为基础而编写的.

除了改正我们在第一版中所发现的某些错字和错误以及更明确地说明了某些数学结论之外, 我们认为放进许多补充习题是适当的, 其中考虑了下列的问题: 矩阵表象中的谐振子习题(参阅习题 10.8), 用 BKB 方法^②来确定谐振子的波函数(参阅习题 10.2). 我们列入了阐述 OPT-变换, 自旋的广义三维单位矢量, 以及将狄拉克方程应用于描述中微子, 即自旋为 $1/2$ 、静止质量为零的粒子的三个习题(参阅习题 18.6,

① 据我们看来, 由 И. И. 高德曼和 В. Л. 克里夫钦可夫所编的《量子力学学习题集》(1957)是最成功的一本, 它是编者在莫斯科大学进行量子力学课堂讨论课的基础上编写而成的. 作为此书较好的补充读物有由 И. Е. 伊罗多夫编的《原子物理习题集》(1959).

② 即 W. K. B. 近似法. ——译者注

18.7 和 18.8), 这些习题在建立宇称不守恒理论时可以找到它们的应用. 我们增加了铁磁性的量子理论和范德瓦耳斯力的量子理论这样的新篇幅来补充 § 27. 完全一样, 在 § 27 中述及量子振荡器的部分经过了重要的修改. 我们更明确地说明了与量子力学哲学论据有关的某些原则性问题. 其中, 在习题 31.3 里分析了测不准关系作为真空对点状荷电粒子影响的结果的新尝试(当然还远不能验证).

本书的第一部分是由我和 Ю. М. 罗斯库托夫共同编写的, 第二部分是与 И. М. 捷尔诺夫一起编写的. 在编写本书时, М. М. 柯列斯尼柯娃曾给予很大的帮助, 她编写了本书的提纲. 此外, 她在准备原稿付印时也给予了重大的帮助, 并且还准备了本书第二版的内容索引.

原稿的个别章节, 即 § 25 和 § 28, 曾由 Н. Н. 柯列斯尼柯夫认真地看过, 他提出了许多重要的意见. 我也想指出, С. И. 拉林曾为校订第一版原稿付出了巨大而极有成效的劳动.

А. А. 索科洛夫

1964 年 3 月

目 录

译者序

序言

引言.....1

第一部分 非相对论性量子力学

§ 1. 光的量子理论	11
1. 电子论的基本原理	11
2. 平衡辐射的经典理论	15
3. 普朗克公式	21
4. 爱因斯坦的光子理论	25
§ 2. 玻尔的量子理论	31
1. 关于原子性质的基本知识	31
2. 原子的经典模型	33
3. 卢瑟福实验、卢瑟福的原子结构	35
4. 玻尔理论	42
§ 3. 粒子的波动性质	54
1. 德布罗意波	54
2. 粒子波动性质在实验上的发现	56
3. 波包、群速度和相速度	61
§ 4. 定态薛定谔方程	75
1. 定态薛定谔方程的获得	76
2. 附加在波函数上的条件、本征值和本征函数	77
3. 势阱中的粒子	81
4. 粒子的自由运动、在连续谱情况下波函数的归一化	85

5. δ 函数的基本性质, 连续谱归一化为 δ 函数	89
§ 5. 薛定谔完全方程	93
1. 向薛定谔完全方程的过渡	93
2. 电荷密度和电流密度, 量子系综	96
3. 薛定谔理论和哈密顿-雅可比经典方程之间的关系	100
4. 温采尔-克拉梅斯-布里渊近似法 (W. K. B. 方法)	104
§ 6. 导电性的量子理论原理	120
1. 粒子贯穿势垒(隧道效应)	120
2. 隧道效应作为波动性的表现	124
3. 金属中电子的运动	127
4. 电子从金属中的逸出, 冷发射	133
5. 接触电势差	136
6. 电子在周期性电场中的运动(克洛尼克-潘尼一维模型)	137
7. 晶体导电性的电子论原理	141
§ 7. 量子力学的统计解释	147
1. 线性算符理论的某些知识	147
2. 表象理论基础	149
3. 算符的平均值	151
4. 波函数的统计解释	155
§ 8. 算符的平均值, 物理量随时间的变化	160
1. 测不准关系的推导	160
2. 经典泊松括号和量子泊松括号	164
3. 艾伦菲斯特定理	168
4. 从量子运动方程过渡到经典运动方程	169
§ 9. 辐射的基本理论	178
1. 自发跃迁和被迫跃迁	178
2. 自发跃迁几率和被迫跃迁几率的确定	181
§ 10. 线性谐振子	187

1. 玻尔的谐振子理论	188
2. 能量本征函数和能量本征值	190
3. 谐振子的零点能量和测不准关系	198
4. 选择定则, 辐射强度	200
§ 11. 粒子在有心对称场中运动的一般理论	209
1. 球面坐标中的薛定谔方程	210
2. 分离变量, 本征函数	212
3. 量子数 l 和 m 的物理意义, 角动量	221
4. 所得结果的分析	225
§ 12. 转子	229
1. 转子的本征函数	229
2. 选择定则	233
3. 双原子分子光谱	236
4. 单原子和双原子物质热容量的基本理论	246
§ 13. 类氢原子理论(开卜勒问题)	255
1. 能量本征函数和能量本征值	255
2. 类氢原子量子力学理论基本结果的半经典解释	265
3. 选择定则, 类氢原子的发射光谱	268
4. 在连续谱的场合下粒子在库仑场中的运动	271
5. 核运动的考虑	279
§ 14. 定态微扰理论	286
1. 根据微扰理论解问题的基本概念	286
2. 微扰理论的基本方程	287
3. 非简并情况	289
4. 简并情况	292
5. 斯塔克效应	294
6. 色散的经典理论原理	301
7. 色散的量子理论	304
8. 光的联合散射	309

第二部分 相对论性量子力学

§ 15. 克拉因-高登相对论标量波动方程	314
1. 经典相对论力学和克拉因-高登方程, 相对论不变性	314
2. 电荷密度和电流密度	315
3. 氢原子的相对论性理论(不考虑电子的自旋)	317
§ 16. 电子在磁场中运动的理论. 电子的自旋	323
1. 塞曼效应的经典理论	324
2. 非相对论薛定谔理论的塞曼效应	327
3. 电子自旋在实验上的发现	330
4. 泡利方程	335
§ 17. 狄拉克相对论性波动方程	342
1. 能量算符的“线性化”, 狄拉克矩阵, 狄拉克矩阵与泡利 矩阵的关系	342
2. 狄拉克方程, 电荷密度和电流密度	346
3. 波函数在洛伦兹变换下和在空间转动下的变换性质	350
§ 18. 电子在有心力场中运动的狄拉克理论	352
1. 轨道角动量, 自旋角动量和总角动量, 守恒定律	352
2. 总角动量算符的性质, 总角动量的量子化, 矢量模型	353
3. 在有心力场的运动中考虑自旋效应, 转子理论	360
4. 态的字称	363
5. 自由粒子狄拉克方程的解	365
§ 19. 狄拉克方程的近似形式	375
§ 20. 类氢原子光谱的精细结构	383
1. 问题的提出	383
2. 相对论效应和自旋效应的考虑	384
3. 在狄拉克理论中精细结构的研究	389
4. 精细结构理论的实验验证	392
5. 反常塞曼效应	395

6. 强磁场情况. 帕邢-巴克效应	400
§ 21. 核结构对原子光谱的影响	406
1. 问题的提出	406
2. 核的有限大小的考虑	407
3. 介原子	409
4. 描述中子和质子运动的狄拉克方程的适用性	414
5. 中子和质子磁矩的实验测定	415
6. 氢原子光谱的超精细结构	419
§ 22. 关于电子-正电子真空和电磁场真空的概念	422
1. “空穴”的狄拉克理论. 正电子的发现	422
2. 原子中电子能级的兰姆移动	427
3. 电子-正电子真空	431
4. 关于规则化方法的概念	434
§ 23. 不考虑自旋态的氢原子理论	436
1. 多电子原子理论的基本原理	436
2. 用微扰理论方法解氢原子问题	437
3. 电子的库仑相互作用	444
4. 变分法	446
5. 用变分法来获得薛定谔方程	450
6. 哈特里-福克自洽场方法	451
7. 交换能的研究	455
§ 24. 考虑到自旋态的多电子原子基本理论	458
1. 对称态和反对称态	458
2. 费米-狄拉克和玻色-爱因斯坦统计法. 泡利原理	460
3. 角动量耦合. 来赛尔-桑德斯耦合. 克来布希-高登系数	462
4. 考虑到自旋的氢原子波函数	466
5. 仲氦和正氦	473
6. 氢原子的能谱	474

§ 25. 碱金属光谱	479
1. 关于复杂原子结构的一般知识	479
2. 托玛斯-费米统计法	482
3. 用黎兹变分法解托玛斯-费米问题	487
4. 碱金属原子的能级	490
5. 基线系	497
6. 光谱线的多重结构	500
§ 26. 门捷列夫元素周期系	504
1. 原子的伦琴光谱	504
2. 原子的特征光谱和它们的内壳层结构	506
3. 伦琴光谱的多重结构	510
4. 门捷列夫周期律的发现	513
5. 电子壳层的填充	515
6. 托玛斯-费米方法对元素周期系理论的应用	519
7. 元素性质的周期性	522
§ 27. 最简单的分子理论	525
1. 化学键的基本类型	525
2. 极性分子	526
3. 氢分子离子	531
4. 同极性原子的分子	541
5. 自旋和态的对称性	544
6. 化合价理论	548
7. 铁磁性	551
8. 范德瓦耳斯力	553
9. 关于量子放大器和量子振荡器概念	555

第三部分 核物理学原理及基本粒子理论

§ 28. 核理论的某些问题	564
1. 关于原子核的基本知识	564

2. 核力的一般性质	571
3. 核力的介子理论概念	572
4. 氘核的基本理论	579
5. 核的稳定性	587
6. α 衰变	591
7. 核的液滴模型	598
8. 核的壳层模型	605
§ 29. 粒子的弹性散射	612
1. 非定态微扰理论	612
2. 弹性散射的有效截面	615
3. 在汤川力心中的散射	620
§ 30. 二次量子化概念	628
1. 薛定谔方程的二次量子化	628
2. 麦克斯韦方程的量子化	633
3. 自发辐射	634
4. β 衰变	637
5. 粒子衰变时宇称的不守恒	642
6. γ 辐射, 穆斯保尔效应	646
7. 穆斯保尔效应的应用	648
§ 31. 基本粒子	650
1. 基本粒子的一般特性	650
2. 基本粒子的基本特征和分类法	656
3. 粒子的自发衰变	666

引 言

量子力学——现代理论物理学的最重要部分之一，是迟至本世纪二十年代才建立起来的。它的基本任务是研究微观粒子的行为，例如原子中电子的运动。

量子力学实质上是经典力学、电动力学(包括电子论和相对论)、物质的动力理论以及理论物理的其它部分的继续发展。

在理论物理学每一部门的发展史中，应该分为两个基本阶段：第一阶段是积累实验事实，发现个别半经验规律以及建立初步的假设和理论；第二阶段是发现能以统一观点来认识许多现象总和的普遍规律性，例如力学发展的第一(牛顿以前的)阶段系与个别彼此间似乎没有什么关系的定律的发现相联系，这些定律就是惯性定律、自由落体定律和决定行星运动的开卜勒定律等。

必须指出，这些定律中每一个的发现，通常总伴随着许多科学家在数十年内有时甚至在成百年内细致和耐心的工作。例如在开卜勒定律发现以前，曾对行星运动进行了无数次天文观察。我们记得，哥白尼、布鲁诺、伽利略等人为了证实太阳位于我们行星系统的中心，而不是地球(它本身象火星、金星或木星一样是一个行星)位于我们行星系统的中心，曾付出多大的劳动。也只有在第谷·德布拉赫观察行星运动时获得了极有价值的实验资料的基础上，由于开卜勒用了十五年时间整理这些实验资料，才终于能够发现行星围绕太阳运动的

正确的(虽然是半经验的)定律。同样也只有在这样的初步阶段之后,牛顿才能成功地对这些原来似乎没有联系的定律奠定统一的基础。从那时起,在牛顿的三个运动定律和万有引力定律的基础上,理论力学的发展进入了新阶段。在力学的牛顿定律基础上,开卜勒定律得到了解释,而理论天文学也开始迅速地发展起来。法国科学家赖维里根据木星运动的摄动所预言的新行星——海王星,是牛顿力学发展的胜利,按照赖维里的计算这个行星立刻被天文学家发现了。

完全一样,在建立麦克斯韦电动力学以前(在18世纪和19世纪上半叶)曾发现了电和磁现象的各种经验定律。还发现了与牛顿引力定律类似的电荷和磁极的库仑定律^①,以及电流定律和电流与磁极的相互作用定律(毕奥-萨瓦定律)等等。所有这些现象都是以超距作用的观点来解释的,按照这种观点,一个电荷与另一个电荷是通过把它们隔开的全部空间而直接作用着的。

大致从牛顿时代起,光学——关于光的科学^②就与研究电的和磁的现象完全无关地迅速发展起来。虽然比较快地查明了光是横波,它以有限的速度 $c \approx 3 \cdot 10^{10}$ 厘米/秒传播着,但是在长时期内光的本性却仍然没有弄清楚。

所有这些初步的研究,可以归入电动力学发展的第一个

① 因为暂时还不能找到自由磁极,故应用磁偶极子来直接检验磁学中的库仑定律。

② 光的波动理论曾由惠更斯在十七世纪末提出。牛顿接受了波动理论后,主要又发展了光的微粒理论,即将光看作是最小的粒子流(流逝理论)。由于大量的实验事实,特别是在费涅尔的工作之后的实验事实(十九世纪初叶),基本上都属于波动理论的范畴,牛顿的微粒理论实质上是被忘却的。只是在二十世纪初期,此时出现了导致发现量子理论的新的实验事实,科学家不得不重新又回过头来(但已在新的基础上)建立光的波粒理论。