

经典译丛·物理篇

现代量子力学

第2版

Modern Quantum Mechanics Second Edition

[美] 樱井纯 [美] J. 拿波里塔诺 著

丁亦兵 沈彭年 译

世界图书出版公司

现代量子力学

第2版

[美] 樱井纯 著
[美] J. 拿波里塔诺 译
丁亦兵
沈彭年

世界图书出版公司

北京·广州·上海·西安

图书在版编目 (CIP) 数据

现代量子力学: 第2版/ (美) 樱井纯 (Sakurai, J. J.), (美) 拿波里塔诺 (Napolitano, J.) 著; 丁亦兵, 沈彭年译. —北京: 世界图书出版公司北京公司, 2014. 5

书名原文: Modern quantum mechanics 2nd ed.

ISBN 978-7-5100-6099-1

I. ①现… II. ①樱… ②拿… ③丁… ④沈… III. ①量子力学 IV. ①O413.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 090635 号

Authorized translation from the English language edition, entitled MODERN QUANTUM MECHANICS, 2E, by SAKURAI, J. J.; NAPOLITANO, J., published by Pearson Education, Inc Addison-Wesley, Copyright © 1994, 2011 by Addison-Wesley Publishing Company, Inc.

All Rights Reserved. No Part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from Pearson Education, Inc.

CHINESE SIMPLIFIED Language edition published by PEARSON EDUCATION ASIA LTD., and BEIJING WORLD PUBLISHING CORPORATION Copyright © 2016.

著 者: 樱井纯 J. 拿波里塔诺

译 者: 丁亦兵 沈彭年

责任编辑: 刘 慧

装帧设计: 蔡 彬

出版发行: 世界图书出版公司北京公司

地 址: 北京市东城区朝内大街 137 号

邮 编: 100010

电 话: 010-64038355 (发行) 64015580 (客服) 64033507 (总编室)

网 址: <http://www.wpcbj.com.cn>

邮 箱: wpcbjst@vip.163.com

销 售: 新华书店

印 刷: 三河市国英印务有限公司

开 本: 787mm×1092mm 1/16

印 张: 26

字 数: 480 千

版 次: 2016 年 8 月第 1 版 2016 年 8 月第 1 次印刷

版权登记: 01-2011-1089

定 价: 99.00 元

版权所有 翻印必究

(如发现印装质量问题, 请与本公司联系调换)

译者前言

在世界图书出版公司（以下简称世图）北京公司的大力支持下，由樱井纯（J. J. Sakurai）与 J. 拿波里塔诺（J. Napolitano）撰写的《现代量子力学》（第 2 版）中译本终于出版面世。作为该书的译者，我们感到十分欣慰。

在为数众多的量子力学教科书中，该书以新颖的物理内容和独特的叙述风格广受赞誉。据了解，该书作为物理学研究生的高等量子力学教材，在国内外被相当普遍地采用。正因如此，世图北京公司对该书的出版一直十分重视，2005 年影印出版了由美国夏威夷大学段三复（San Fu Tuan）教授整理的 *Modern Quantum Mechanics*（1994 年修订版）；2011 年影印出版了该书第 2 版。在该版中，除了原作者之外的另一位署名作者 J. 拿波里塔诺是执笔改编者，他是美国纽约州伦斯勒理工学院（Rensselaer Polytechnic Institute）物理系教授。相继出版的这两部影印版著作均受到了读者的欢迎，赢得了很好的口碑。为了扩大该书在我国的使用范围，满足高等量子力学教学的需要，使国内更多领域的读者能够更方便地选用和参考，我们受出版社的委托，非常荣幸地承担起将其英文第 2 版翻译成中文的重任。

关于此书的写作背景、各个版本的特色以及内容简介，在几个版本（包括影印版）的序言中均有详细介绍，此处不再赘述。但我们想要指出的是，在英文第 2 版出版后不久，执笔修订者 J. 拿波里塔诺教授就发现了书中的许多错误，相继发布了两份勘误表（可在拿波里塔诺教授的个人主页上查到）。我们在这次翻译中，按照勘误表的内容一一做了修正。需要强调的是，勘误表中有一些内容是对书中习题给出的评注，指出这些题目存在不妥之处，以后应该进行修改。作为译者，我们无权对这些内容做相应的改动，只好建议读者参考勘误表，自行判断。我们还发现了一些没有列入勘误表的明显错误，在翻译时做了更正，并在书中以“译者注”的形式注明。

受到译者英文水平、翻译能力与物理知识水平的局限，译文中的错误与不当之处恐难避免，欢迎热心的专家、读者不吝赐教，以便再版时予以更正。

本书得以出版，与世图北京公司的大力支持是分不开的。特别是编辑高蓉与刘慧的热心指导与帮助对于本书的完成起到了保障作用，译者借此机会对她们表示深深的谢意。

中国科学院大学 教授 丁亦兵
中国科学院高能物理研究所 研究员 沈彭年
2015 年 6 月于北京

第 1 版前言

樱井纯是一位罕见的认为实验事实比只做理论推演甚至更有意义的理论家之一，是欧洲核子研究中心（CERN）广受欢迎的客人。他还以工作在理论物理研究以及教学——他持有强烈观点的领域为乐而著称。尽管如此，他认为很多理论物理的教学面太窄，离应用太远。“……我们看到很多富有经验但缺乏知识的理论家，他们熟知海森伯（Heisenberg）场算符的 LSZ 形式体系，却不知道为什么受激发的原子会辐射，或者他们不知道解释天空是蔚蓝色的瑞利（Rayleigh）定律的量子理论推导。”他坚称学生必须会使用所学过的知识，读了书但不能做习题的读者等于什么也没有学到。

他的杰作《不变性原理与基本粒子》（1964）和《高等量子力学》（1967）充分运用了这些原则。在欧洲核子研究中心的图书馆，这两本书一直被频繁地借用。《现代量子力学》这本新书甚至被一个更大的、欠缺专业知识的群体使用。这本书把广泛的兴趣和详尽的实用性结合在一起。经过持续努力把书读懂，读者就会在这里找到他们想要知道的东西。

樱井纯于 1982 年 11 月 1 日突然去世，留下了这本未完成的书。莱因霍尔德·博德曼（Reinhold Bertlmann）和我帮助樱井纯夫人整理了她丈夫在欧洲核子研究中心的论文。在这些论文中，我们找到了一本有关该书大部分内容未经加工的手稿和大量的习题。尽管只有三章已完全写好，大部分创造性的工作已完成，然而还是明显地留下了许多需要填补空白、斟酌词句和整理手稿的工作。

今天，这本书的完成应归功于樱井法子（Noriko Sakurai）的决心和段三复的奉献。樱井纯去世后，其夫人立即决定不能让樱井纯最后的工作付之东流。她以极大的勇气和威严，克服了所有的困难并设定了一直被保持下来的高标准，成为了这个项目的幕后推动力。段三复欣然付出他的时间和精力，编辑和完成了樱井纯的著作。也许，只有那些与高能理论物理这一令人紧张而且兴奋的领域密切相关的人，才能领悟到其中奉献的价值。

对我个人而言，樱井纯早就不只是一个特别杰出的同事。我感到非常悲哀的是，我们将再也不能一起笑谈物理、物理学家以及日常生活，而他也再看不到他最后工作的成就。但让我感到欣慰的是他的这部作品终成硕果。

J. S. 贝尔（John S. Bell）

欧洲核子研究中心，日内瓦

第 1 版修订版序

1989 年以来, 为了使这本教科书能延用到 21 世纪, 编辑一直致力于出版由他的已故挚友樱井纯撰写的《现代量子力学》的修订版. 为此, 他咨询了多位曾协助第一版出版的樱井纯的朋友, 特别是日本筑波大学的原康夫 (Yasuo Hara) 教授及京都产业大学的樱井明夫 (Akio Sakurai) 教授.

本书是为学过初等或高等量子力学的一年级研究生撰写的, 因此没有为初学者提供量子力学导论内容, 本书要求读者应该具备一定的求解时间相关和时间无关波动方程的能力. 作为求解一维透射-反射问题的必备能力, 读者应熟悉高斯波包在无力场区域随时间演化的知识. 使用本书的学生还应该知道一些能量本征函数和能量本征值的一般性质.

修订版有三处重要的补充或更改, 除此之外的其他部分均保持不变. 这些变更包括: 麻省理工学院 (MIT) 的肯尼思·约翰逊 (Kenneth Johnson) 教授对 5.2 节简并情况下时间无关微扰论部分进行了修改; 印第安纳大学的罗杰·牛顿 (Roger Newton) 教授对斯塔克效应中寿命展宽的细化, 以及对共振态相移、光学定理和不可归一态的补充解释作出了贡献, 并以“编者评注”或“编者按”的形式出现; 约翰霍普金斯大学的托马斯·富尔顿 (Thomas Fulton) 教授重写了他所写的库仑散射贡献, 并以强调物理的、简短的正文出现, 而数学细节则转移到了附录 C 中.

尽管一些补充不是正文的主要内容, 但考虑到 1982 年 11 月 1 日以来量子力学中的那些重要发展, 补充若干这方面的内容是必要的. 为了这个目的, 在本书的末尾加入了两篇补遗. 补遗 I 是关于绝热变化和几何相位的 [1983 年以来, M. V. 贝里 (M. V. Berry) 已将其通俗化], 它是樱井明夫教授为日文版《现代量子力学》(Yoshioka-Shoten Publishing of Kyoto 出版) 撰写的补遗的英文译文. 关于非指数衰变的补遗 II, 由我的同事薛西斯·塔塔 (Xerxes Tata) 教授撰写, 并由得克萨斯大学奥斯汀分校的 E. C. G. 苏达珊 (E. C. G. Sudarshan) 教授仔细核对. 理论上讲, 虽然研究非指数衰变问题已有很长的历史, 但间接检验这类衰变的跃迁速率的实验仅在 1990 年做过. 引入附加材料当然是编辑方的主观决定, 读者可自行判断它的适用性. 感谢樱井明夫教授认真地核对, 他修正了原来版本中的印刷错误. 这次修订自始至终是在我的同事桑迪普·帕克瓦萨 (Sandip Pakvasa) 教授的整体指导和鼓励下进行的.

除了感谢以上几位之外, 我以前的学生李萍 (Li Ping 的音译——译者注)、史小红 (Shi Xiaohong 的音译——译者注) 和铃木安永 (Yasunaga Suzuki), 1992 年春季在夏威夷大学选修量子力学研究生课程时, 为出版修订版出谋划策. 作为课程的学期论文, 铃木安永提供了日文补遗 I 的最初译文. 安迪·阿克 (Andy Acker) 博士帮助我解决了计算机图形问题. 夏威夷大学马诺阿分校的物理学和天文学系, 特别是高能物理组, 再次向我提供了设施和良好的氛围以完成我的编辑任务. 最后, 我希望向爱迪生-韦斯利 (Addison-Wesley) 公司的高级物理编辑 (及赞助) 斯图尔特·约翰逊 (Stuart Johnson) 和他的助

理编辑珍妮弗·杜根 (Jennifer Duggan)，以及高级印制主管艾米·威尔卡特 (Amy Willcutt) 表达我的感激之情，他们的鼓励和乐观精神使修订版最终得以面世。

段三复

夏威夷，檀香山

第 2 版序

量子力学使我着迷。它基于很少的几个假设描述了种类繁多的现象；它始于一个完全不同于经典物理学微分方程的框架，却把经典物理学也包含其中；它对许多物理研究现状提供了量化的预言，这些预言均与实验相吻合。简而言之，如今，量子力学已是我们认识物质世界最根本的依据。

因此，对被邀请撰写樱井纯原著的《现代量子力学》的第 2 个修订版我深感荣幸。我讲授以该书为蓝本的讲义已有几年，其表述方式也与该书非常一致。然而，就像许多其他教师一样，我也发现这本书的某些方面有欠缺。因此，我的混合讲义从其他书籍及我自己的研究成果中引入了一些材料，这为新版本的变更打下了基础。

当然，我原先的建议比起可能实现的结果更为雄心勃勃，即便如此，它所花费的时间仍然远长于我的预期。那么多好的建议通过众多审阅人到了我的手中，我希望我已将它们全部纳入。我对这个结果很满意，我尽力保持了樱井纯原稿的精髓。

第 1 章基本没有变动，更新了一些图，对展示狄拉克 (Dirac) 磁矩相对论起源的第 8 章给出了参考。

第 2 章添加了一些材料。新增关于基础解一节，其中包括三维自由粒子，使用生成函数的薛定谔方程中的简谐振子，以及作为一种引入艾里 (Airy) 函数方法的线性势。线性势的解可供 WKB 近似方法的讨论，其本征值可与“反弹中子”实验的测量相比较。另外，还增加了展示量子力学干涉的中微子振荡的简短讨论。

第 3 章包括中心势场薛定谔方程的解，展示了一般的径向方程，并将其应用于三维自由粒子以及无限深球形势阱，求解了各向同性谐振子，并讨论了它在“核势阱”中的应用。我们还用库仑势进行了求解，并讨论了简并度，强调了一些高级数学技巧。

第 4 章增加了一小节讨论库仑问题的内在对称性，该对称性在经典物理中曾基于楞次 (Lenz) 矢量获知。作为修订版第 3 章中关于连续对称性讨论的扩充，它提供了对 $SO(4)$ 的介绍。

第 5 章有两个补充。首先，5.3 节对动能的相对论修正的范畴内，把微扰论应用于氢原子给出了新的介绍。修改自旋-轨道相互作用内容，有助于将本书末尾的狄拉克方程在氢原子中应用进行比较。

其次，加入了一节有关“极端”时间依赖的哈密顿量的内容。其中包括对瞬变近似的简要讨论和对绝热近似的一段较长讨论。之后，把绝热近似发展到了贝里相位的讨论，其中包括一个自旋 $\frac{1}{2}$ 系统的具体例子（配合实验验证）。

本书的末尾有一些最有意义的修改，包括颠倒了散射和全同粒子这两章的顺序。这样做的部分原因是因为我本人（和几位审阅人）的一种强烈感觉，认为散射的内容需要特别加以注意。再有，根据审阅人的建议，既把二次量子化包括进来作为全同粒子内容的扩充，又新增关于相对论量子力学一章，二者都会把读者更近地带到量子场论的主题。

因此,本版中涵盖量子力学散射的第6章就有了一个几乎完全重写的引言.用时间相关的处理来展示这一主题.与此同时,遵循这一新的思路,关于散射振幅和玻恩(Born)近似的几节都重写了.它包括将曾经是一小节的关于光学定理的内容并入到散射振幅的处理中.然后再转到阐述玻恩近似.随着某些材料的删除,剩余的几节都已被编辑、组合和重新加工过,并力图保留我和审阅者们认为在前一个版本中最重要的物理内容.

第7章有两节是新的,这对已有的全同粒子内容是重要的扩充[关于杨(Young)图一节已被删除].书中用二次量子化方法展开了多粒子态的讨论,并较为详细地给出了两个应用实例.其中之一是在带正电的均匀背景中的电子气问题,另一个是电磁场的正则量子化.

多粒子量子态的论述只是通向量子场论的一条途径,另一条途径牵涉到把狭义相对论引入到量子力学中,这是第8章的主题,并且在只要我认为是合理的地方用克莱因-戈尔登(Klein-Gordon)方程介绍本章主题.书中还以几乎标准的方式,较为详细地论述了狄拉克方程.最后,求解了狄拉克方程的库仑问题,提出了继续学习相对论量子场论的建议.

重新组织了附录.新的关于电磁单位的附录是针对那些特定的学生写的,他们在大学期间用的是国际单位制,而在研究生期间却要面对高斯单位制.

我是一个实验物理学家,因而我尝试着把相关实验结果纳入到我的教学中.我已经找到把其中的一些内容写入这个版本的方法,最常用的方法是借助那些现代出版物中的图.

- 图1.6说明了利用斯特恩-盖拉赫(Stern-Gerlach)仪器分析铯原子束流的极化态.
- 依据 μ 子 $g-2$ 高精度测量的自旋转动如图2.1所示.
- 神岗(KamLAND)合作组观测到的中微子振荡展示在图2.2中.
- 图2.4所示的“反弹中子”量子能级的迷人实验被囊括进来,以强调线性势情况下的精确本征值和WKB本征值的一致性.
- 图2.10展示了出现在前一版中的引力相移.
- 引入一个老标准的图3.6,以强调中心势问题非常适用于真实世界.
- 尽管宇称破坏自发现以来的50多年中已被多次测量,图4.6所示的吴建雄的原始测量仍是最清晰的证明之一.
- 用超冷中子测量的自旋 $\frac{1}{2}$ 粒子的贝里相位展示在图5.6中.
- 图6.6是一个如何使用散射数据解释靶的性质的清楚例子.
- 有时,细心实施的实验会显示出预言中的某些问题,图7.2就展示了交换对称性未被包括时所发生的效应.
- 用开西米尔(Casimir)效应(图7.9)和观测压缩光(图7.10)的数据证明了电磁场的量子化.
- 最后,展示了相对论量子力学需要的某些经典证明.卡尔·安德逊(Carl Anderson)的正电子的原始发现如图8.1所示.氢原子能级细节的现代信息放在了图8.2中.

此外,我还把手边与实验工作相关的许多参考文献收录了进来.

我要感谢诸多帮助我实施这个项目的人.物理方面的同事包括 John Cummings、Stuart Freedman、Joel Giedt、David Hertzog、Barry Holstein、Bob Jaffe、Joe Levinger、

Alan Litke、Kam-Biu Luk、Bob McKeown、Harry Nelson、Joe Paki、Murray Peshkin、Olivier Pfister、Mike Snow、John Townsend、段三复、David Van Baak、Dirk Walecka、Tony Zee，以及那些校读稿件各版清样的审稿人。这项工作从头到尾都得到了爱迪生-韦斯利公司的 Adam Black、Katie Conley、Ashley Eklund、Deb Greco、Dyan Menezes 和 Jim Smith 的指导。我还要感谢 Techsetters 公司 John Rogosich 和 Carol Sawyer 的技术支持和建议。另外，对那些在我撰写这段致谢时遗漏了名字的人深表歉意。

最后，衷心希望这个新版本真实地展示了樱井最初的愿望，不要因为我的介入而被明显地削弱。

J. 拿波里塔诺
纽约，特洛伊

追 思

J. J. 樱井 1933 年出生于东京，1949 年以高中生的身份来到了美国。他就读于哈佛大学和康奈尔大学，并于 1958 年获得博士学位。之后，他获得了芝加哥大学物理学助理教授的职位，并于 1964 年成为正教授。之后，他工作在芝加哥直到 1970 年转至加利福尼亚大学洛杉矶分校，在那里工作直至去世。他一生撰写了 119 篇基本粒子方面的理论文章，以及一些量子理论和粒子理论方面的专著。

理论物理学的主要目标是，要使物理世界具有既简洁又全面的理论描述的公式框架。因为自然是微妙且复杂的，对新发现现象的前沿，理论物理的追求需要有大胆和热烈的冒险精神。在这样的一个领域，樱井以他不可思议的物理洞察力和直觉，以及用启发性的物理术语简单易懂地诠释这些现象的能力占据着权威地位。人们只要读过他的异常清晰的教科书《不变性原理与基本粒子》和《高等量子力学》，或者他的评述，以及听他在学校中的暑期讲座，都会领会到这一点。可以毫不夸张地说，关于粒子物理学，很多我确实弄懂的知识正是来自于这些地方，以及来自他的文章和个别的辅导。

当樱井还是一名研究生时，他就与理查德·费曼 (Richard Feynman)、莫瑞·盖尔曼 (Murray Gell-Mann)、罗伯特·马沙克 (Robert Marshak)、乔治·苏达珊 (George Sudarshan) 分别 (且同时) 提出了当今众所周知的弱相互作用 V-A 理论。1960 年，他在《物理学年鉴》上发表的一篇预言文章，或许是他最重要的一篇单人的论文。其中，首次尝试基于阿贝尔与非-阿贝尔 (Yang-Mills) 规范不变性构建一种强相互作用理论。这一影响深远的工作使得理论家们试图理解规范 (矢量) 场的质量产生机制，即现在公认的希格斯 (Higgs) 机制。尤其是，自从著名的格拉肖-温伯格-萨拉姆 (Glashow-Weinberg-Salam) 的弱力和电磁力统一理论取得圆满成功以来，它激励着人们去寻找一种在规范原理下的力的真实统一。在唯象学方面，樱井追求并积极倡导强子动力学中的矢量介子为主模型。他是讨论 ω 和 ϕ 介子态混合的第一人。事实上，在更广泛的意义上说，他对粒子物理唯象学做出了许多重要的贡献，因为他的心总是与实验活动紧密地联系在一起。

我与 J. J. 樱井相识超过 25 年，而我最钦佩的不仅是他作为理论物理学家的超强能力，还有他的热心和慷慨的精神。尽管 1957 年至 1958 年他自己还是康奈尔大学的研究生，他却从判断自己正在进行的 K-核子色散关系的先驱性研究工作中挤出时间 (通过频繁的通信)，来帮助我在伯克利分校进行相同主题的博士论文研究。桑迪普·帕克瓦萨和我有幸与他合作了他最后的关于重夸克弱耦合论文中的一篇，该论文再次显示了他做物理的感召力和直觉判断。当然，回想起 J. J. 樱井认为这篇文章属于很多他已发表的特别得意作品之一，我们感到非常高兴。

J. J. 樱井的离世使物理学界蒙受了巨大的损失，对此我深感悲痛。因此，我深感荣幸能有机会编辑并出版他的《现代量子力学》手稿。我深信没有比让我通过有意义的服务表达我对 J. J. 樱井的尊重和挚爱更为珍贵的礼物。

段三复

目 录

第 1 章 基本概念	1
1.1 斯特恩-盖拉赫实验	1
1.2 右矢、左矢和算符	8
1.3 基右矢和矩阵表示	13
1.4 测量、可观测量和不确定度关系	17
1.5 基的改变	27
1.6 位置、动量和平移	30
1.7 位置和动量空间中的波函数	37
第 2 章 量子动力学	49
2.1 时间演化和薛定谔方程	49
2.2 薛定谔绘景和海森伯绘景	59
2.3 简谐振子	66
2.4 薛定谔波动方程	71
2.5 薛定谔波动方程的基本解	76
2.6 传播子和费曼路径积分	85
2.7 位势和规范变换	95
第 3 章 角动量理论	115
3.1 转动与角动量对易关系	115
3.2 自旋 $\frac{1}{2}$ 系统和有限转动	119
3.3 $SO(3)$ 、 $SU(2)$ 和欧拉转动	127
3.4 密度算符和纯系综与混合系综	131
3.5 角动量的本征值和本征态	140
3.6 轨道角动量	146
3.7 中心势的薛定谔方程	152
3.8 角动量的加法	160
3.9 角动量的施温格振子模型	171
3.10 自旋关联测量和贝尔不等式	175
3.11 张量算符	181
第 4 章 量子力学中的对称性	193
4.1 对称性、守恒定律和简并	193
4.2 分立对称性、宇称或空间反射	198
4.3 晶格平移作为一种分立对称性	206
4.4 时间反演分立对称性	209

第5章 近似方法	223
5.1 时间无关的微扰论:非简并情况	223
5.2 时间无关的微扰论:简并情况	231
5.3 类氢原子:精细结构和塞曼效应	235
5.4 变分法	244
5.5 时间相关的势:相互作用绘景	246
5.6 具有极端时间依赖性的哈密顿量	252
5.7 时间相关的微扰论	260
5.8 与经典辐射场相互作用的应用	267
5.9 能量移动和衰变宽度	271
第6章 散射理论	281
6.1 作为时间相关微扰的散射	281
6.2 散射振幅	285
6.3 玻恩近似	290
6.4 相移和分波	294
6.5 程函近似	303
6.6 低能散射和束缚态	307
6.7 共振散射	312
6.8 散射中对称性的考虑	315
6.9 电子-原子非弹性散射	317
第7章 全同粒子	325
7.1 置换对称性	325
7.2 对称化假定	328
7.3 双电子系统	329
7.4 氦原子	331
7.5 多粒子态	334
7.6 电磁场的量子化	343
第8章 相对论量子力学	355
8.1 通向相对论量子力学之路	355
8.2 狄拉克方程	361
8.3 狄拉克方程的对称性	366
8.4 求解中心势问题	370
8.5 相对论量子场论	376
附录A 电磁单位	381
A.1 库仑定律、电荷和电流	381
A.2 制式间的转换	382
附录B 薛定谔波动方程基本解的简要概述	385
B.1 自由粒子($V=0$)	385
B.2 一维分段常数势	385
B.3 透射-反射问题	386

B. 4 简谐振子	387
B. 5 中心力问题[球对称势 $V=V(r)$]	388
B. 6 氢原子	391
附录 C 方程(3. 8. 38)给出的角动量加法规则的证明	393
第 2 版新增参考书目	394
以前版本中的参考书目	395

第 1 章 基本概念

在 20 世纪的前 27 年中，我们对微观现象的理解发生了革命性的变化，这是自然科学史上前所未有的。我们不仅目睹了对经典物理学有效范围的严格限制，而且还发现取代经典物理学理论的替代理论是涵盖范围更广泛、应用领域更丰富的一种理论。

初学量子力学的最传统方法是遵循历史的发展——普朗克 (Planck) 的辐射定律、爱因斯坦-德拜 (Einstein-Debye) 的比热理论、波尔 (Bohr) 的原子、德布罗意 (de Broglie) 的物质波等——连同对一些关键实验的仔细分析，诸如康普顿 (Compton) 效应、富兰克-赫兹 (Franck-Hertz) 实验和戴维逊-革末-汤普森 (Davisson-Germer-Thompson) 实验。这样，我们才能领会到在 20 世纪最初的 25 年中物理学家们怎样被迫一点一点地放弃曾经钟爱的经典物理学概念，以及那些了不起的大师们，诸如他们中的海森伯，薛定谔和狄拉克等，除去他们在早期的一些不正确的起始点和错误的转折点外，最终怎样成功地阐明了我们今天所熟知的量子力学。

然而，在本书中我们没有遵循这种历史的方法。作为替代，我们从一个实例开始，这个实例也许能比其他例子更清楚地以一种基本的方式阐明经典物理学的缺陷。我们希望，一开始让读者接受“轰击处理”将会使他们在初始阶段就与我们所谓的“量子力学思考方式”合拍。

这种不同的处理方法不仅仅是一种纯学术的做法。我们关于物理世界的知识来自于：做一些关于自然界的假设，把这些假设表述为一些基本原理，从这些基本原理导出一些预言，以及对照实验检验这些预言。如果实验和预言不一致，那时，这些原始的假设很可能是不正确的。我们的方法强调我们所做的关于自然界的基本假设，在这些假设的基础上我们逐步建立起所有的物理定律，而且这些假设的目标是一开始就最大限度地容纳量子力学的观测数据。

1.1 斯特恩-盖拉赫实验

在这一节我们将集中关注的例子是斯特恩-盖拉赫实验，它最初是由 O. 斯特恩于 1921 年构想的，而后于 1922 年他与 W. 盖拉赫合作在法兰克福完成的。^{*} 这个实验以激动人心的方式阐明彻底偏离经典力学概念的必要性。在随后的几节中，我们将以多少有点公理化的方式阐述量子力学的基本形式，但是始终把斯特恩-盖拉赫实验的例子放在心里。在某种意义上，斯特恩-盖拉赫类型的双态系统是最少经典力学而最多量子力学的系统。对涉及双态系统问题的坚实理解将对任何认真学习量子力学的学生都是有益的。正是由于这个理由，我们在本书中自始至终都会反复提到双态问题。

^{*} 斯特恩-盖拉赫实验历史的精彩讨论可参见 Bretislav Friedrich 和 Dudley Herschbach 发表于 *Physics Today* (December, 2003) 的 *Stern and Gerlach: How a Bad Cigar Helped Reorient Atomic Physics*

实验的描述

现在我们来简要地讨论斯特恩-盖拉赫实验, 几乎每一本现代物理的书都要讨论它.* 首先, 银原子在一个炉子中被加热, 炉子有一个小洞, 一些银原子可以穿过它跑出来, 如图 1.1 所示, 束流穿过准直器后进入到一个非均匀磁场, 该磁场由一对磁极产生, 其中的一个磁极有着非常尖锐的边沿.

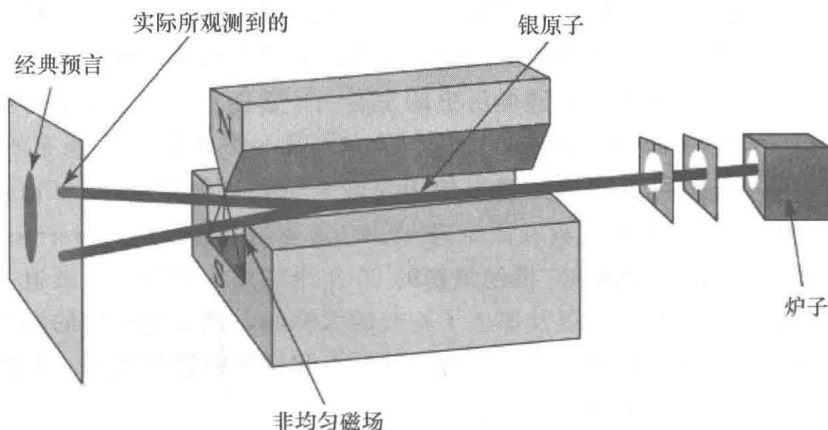


图 1.1 斯特恩-盖拉赫实验

现在我们必须弄清磁场对于银原子的影响. 就我们的目的而言, 下列极为简化的银原子模型就足够了. 银原子由一个原子核与 47 个电子组成, 这 47 个电子中的 46 个可以看作形成一个净角动量为零的、球对称的电子云. 如果忽略与讨论没有关系的原子核自旋, 可以看到, 原子作为一个整体确实具有一个角动量, 它仅仅来自于单独的第 47 个 (5s) 电子的自旋 (是内禀的而非轨道的) 角动量. 这 47 个电子束缚于约比电子重 2×10^5 倍的原子核上; 结果这个重原子作为一个整体具有一个磁矩, 它等于第 47 个电子的自旋磁矩. 换句话说, 原子的磁矩 μ 正比于电子的自旋 S

$$\mu \propto S, \quad (1.1.1)$$

在大约 0.2% 的精度上, 其精确的比例因子为 $e/m_e c$ (在本书中 $e < 0$).

由于磁矩与磁场的相互作用能正好是 $-\mu \cdot \mathbf{B}$, 所以原子所受力的 z 分量由下式给出

$$F_z = \frac{\partial}{\partial z}(\mu \cdot \mathbf{B}) \simeq \mu_z \frac{\partial B_z}{\partial z}, \quad (1.1.2)$$

在那里我们已经忽略了 $\mathbf{B}$ 在不同于 z 方向上的分量. 由于原子作为一个整体非常重, 我们预期经典的轨道概念可以合理地应用, 这一点可以利用稍后导出的海森伯不确定性原理证明是正确的. 按照图 1.1 所示的装置, $\mu_z < 0$ ($S_z > 0$) 的原子受到一个向上的力, 而 $\mu_z > 0$ ($S_z < 0$) 的原子受到一个向下的力. 于是可以预期束流会依据 μ_z 的取值劈裂. 换句话说, SG (Stern-Gerlach) 仪器可“测量”出 μ 的 z 分量, 或者等价地, 最多只差一个比例因子下的 S 的 z 分量.

原子在炉子中是随机取向的, μ 的取向不存在更为偏好的方向. 假如电子就像一个经

* 一个初等的但有启发性的斯特恩-盖拉赫实验的讨论请参见: French and Taylor (1978), 432~438 页.

典的自转物体，我们预期 μ_z 可在 $|\mu|$ 和 $-|\mu|$ 之间任意取值。这将导致我们预期有一束连续的束流从 SG 仪器飞出来，正如图 1.1 中所标明的，或多或少均匀地弥散在预期的区域。实际并非如此，我们实验观测到的更像是图 1.1 中所显示的那种情况，即观测到两个“斑点”，对应于一个“上”和一个“下”两种取向。换句话说，SG 仪器把来自炉子的银原子束流劈裂成两个不同的分量，这是在量子论早期的一种被称为“空间量子化”的现象。在可把 μ 看作是只差一个比例因子的电子自旋 S 的范围内，观测到 S 的 z 分量只有两个可能的取值： S_z 朝上和 S_z 朝下，我们分别称之为 S_z+ 和 S_z- 。 S_z 的这两个可能值都是某个角动量基本单位的倍数；其数值结果是 $S_z = \hbar/2$ 和 $S_z = -\hbar/2$ ，其中

$$\begin{aligned}\hbar &= 1.0546 \times 10^{-27} \text{ erg-s} \\ &= 6.5822 \times 10^{-16} \text{ eV-s},\end{aligned}\quad (1.1.3)$$

电子自旋角动量*的这种“量子化”是我们从斯特恩-盖拉赫实验导出的第一个重要的特征。

图 1.2a 显示了人们预期的从实验得到的结果。依据经典物理学，对应于磁矩取向的（连续）区域，束流本身应弥散在一段竖直的距离上。与此相反，人们观测到了图 1.2b，它与经典物理完全不符。束流本身神奇地劈裂成两部分，一个对应于自旋“向上”，而另一个对应于自旋“向下”。

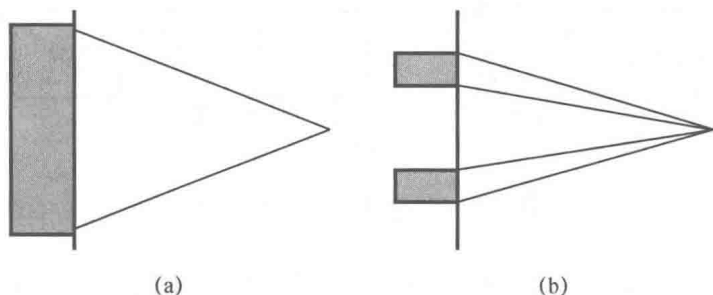


图 1.2 (a) 对于斯特恩-盖拉赫实验结果的经典物理预言，束流应当按照磁矩乘以方向角余弦的数值的范围，沿竖直方向散开一段距离。然而斯特恩-盖拉赫观测到的是 (b) 的结果，即只有磁矩的两种取向独自显示出来。这两种取向并没有布满整个预期的范围。

当然，这个上-下方向或 z 轴绝非神圣不可侵犯。我们也不妨把非均匀磁场加在水平方向，比如 x 方向，而让束流沿 y 方向运动。这样一来我们就能把从炉子中出来的束流分离成一个 S_x+ 分量和一个 S_x- 分量。

序列斯特恩-盖拉赫实验

现在让我们考虑一个序列斯特恩-盖拉赫实验。这里，我们指的是让原子束流依次通过两个或多个 SG 仪器。我们考虑的第一种配置是相对简单的。让炉子中出来的束流经由图 1.3a 所示的装置，在那里，像往常一样， SG_z 是一个非均匀磁场沿 z 方向的装置。然后我们遮挡住来自第一个 SG_z 装置的 S_z- 分量，而让余下的 S_z+ 分量经由另一个 SG_z 装置。这时只有一个束流分量——只是 S_z+ 分量从第二个装置中出来。这或许并非那么令人吃惊，毕竟，如果原子的自旋都向上，则人们预期它们会保持向上，因为在第一个和第二

* 对这一量子化根源的一种理解归之于把相对论应用于量子力学。请见本书 8.2 节的讨论。