

Mc
Graw
Hill
Education

Berkeley Physics Course (In SI Units)

第4卷 英文影印版

量子物理学

Quantum Physics

[美] E. H. 威切曼 (Eyvind H. Wichmann) 著
University of California, Berkeley

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



伯克利物理学教程(SI版)



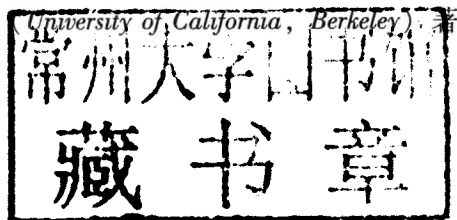
伯克利物理学教程 (SI 版)
Berkeley Physics Course

第 4 卷

量子物理学 (英文影印版)

Quantum Physics

[美] E. H. 威切曼 (Eyvind H. Wichmann)



机械工业出版社

本书阐述了量子物理学的基本原理和概念。全书共包括 9 章：导论、量子物理学中物理量的量值、能级、光子、实物粒子、测不准原理和测量理论、薛定谔波动力学、定态理论、基本粒子及其相互作用。作者在书中用了许多实验事实来说明量子物理学理论的根据，并特别着重于澄清对量子物理学的一些误解。书中还简要叙述了量子物理学在原子物理、分子物理、核物理和基本粒子等领域中的应用。

本书可作为高等院校物理学、应用物理学专业或其他理工科专业的教材或参考书，也可供相关科技人员参考。

Eyvind H. Wichmann

Quantum Physics, Berkeley Physics Course-Volume 4

[ISBN 978-0-07-004861-4]

Copyright © 2011 by McGraw-Hill Education.

All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including without limitation photocopying, recording, taping, or any database, information or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

This authorized English reprint edition is jointly published by McGraw-Hill Education (Asia) and China Machine Press. This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only, excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan.

Copyright © 2014 by The McGraw-Hill Asia Holdings (Singapore) PTE. LTD and China Machine Press.

版权所有。未经出版人事先书面许可，对本出版物的任何部分不得以任何方式或途径复制或传播，包括但不限于复印、录制、录音，或通过任何数据库、信息或可检索的系统。

本授权英文影印版由麦格劳-希尔（亚洲）教育出版公司和机械工业出版社合作出版。此版本经授权仅限在中华人民共和国境内（不包括香港特别行政区、澳门特别行政区和台湾）销售。

版权©2014 由麦格劳-希尔（亚洲）教育出版公司与机械工业出版社所有。

本书封面贴有 McGraw-Hill Education 公司防伪标签，无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记号：01-2013-6386

《伯克利物理学教程》序

赵凯华 陆 果

20 世纪是科学技术空前迅猛发展的世纪，人类社会的科技进步上经历了一个又一个划时代的变革。继 19 世纪的物理学把人类社会带进“电气化时代”以后，20 世纪 40 年代物理学又使人类掌握了核能的奥秘，把人类社会带进“原子时代”。今天核技术的应用远不止于为社会提供长久可靠的能源，放射性与核磁共振在医学上的诊断和治疗作用，已几乎家喻户晓。20 世纪五六十年代物理学家又发明了激光，现在激光已广泛应用于尖端科学研究、工业、农业、医学、通信、计算、军事和家庭生活。20 世纪科学技术给人类社会所带来最大的冲击，莫过于以现代计算机为基础发展起来的电子信息技术。号称“信息时代”的到来被誉为“第三次产业革命”。的确，计算机给人类社会带来如此深刻的变化，是二三十年前任何有远见的科学家都不可能预见到的。现代计算机的硬件基础是半导体集成电路，PN 结是核心。1947 年晶体管的发明，标志着信息时代的发端。所有上述一切，无不建立在量子物理的基础上，或是在量子物理的概念中衍生出来的。此外，众多交叉学科的领域，像量子化学、量子生物学、量子宇宙学，也都立足于量子物理这块奠基石上。我们可以毫不夸大地说，没有量子物理，就没有我们今天的生活方式。

普朗克量子论的诞生已经有 114 年了，从 1925 年或 1926 年算起量子力学的建立也已经将近 90 年了。像量子物理这样重要的内容，在基础物理课程中理应占有重要的地位。然而时至今日，我们的基础物理课程中量子物理的内容在许多地方只一带而过，人们所说的“近代物理”早已不“近代”了。

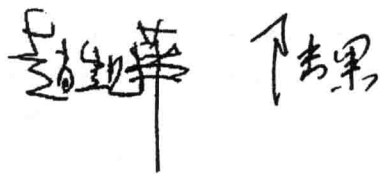
美国的一些重点大学，为了解决基础物理教材内容与现代科学技术蓬勃发展的要求不相适应的矛盾，早在上世纪五六十年代起就开始对大学基础物理课程试行改革。上世纪六十年代出版的《伯克利物理学教程》就是这种尝试之一，它一共包括五卷：1. 力学；2. 电磁学；3. 波动学；4. 量子物理学；5. 统计物理学。该教程编写的意图，是尽可能地反映近百年来物理学的巨大进展，按照当前物理学工作者在各个前沿领域所使用的方式来介绍物理学。该教程引入狭义相对论、量子物理学和统计物理学的概念，从较新的统一的观点来阐明物理学的基本原理，以适应现代科学技术发展对物理教学提出的要求。

当年《伯克利物理学教程》的作者们以巨大的勇气和扎实深厚的学识做出了杰出的工作，直到今天，回顾《伯克利物理学教程》，我们仍然可以从中得到许多非常有益的启示。

首先，这五卷的安排就很好地体现了现代科学技术发展对物理教学提出的要求，其次各卷作者对具体内容也都作出了精心的选择和安排。特别是，第 4 卷《量子物理学》的作者威切曼 (Eyvind H. Wichmann) 早在半个世纪前就提出：“我不相信学习量子物理学比学习物理学

其他部分在实质上会更困难。……当然，确曾有一个时期，所有量子现象被认为是非常神秘和错综复杂的。在最初探索这个领域的时期，物理学工作者确曾遇到一些真正的心理上的困难，这些困难一部分来自可以理解的偏爱于经典观点的成见，另一部分则来自于实验图像的不完整性。但是，对于今天的初学者，没有理由一定要重新制造这些同样的困难。”我们不能不为他的勇气和真知灼见所折服。第5卷《统计物理学》的作者瑞夫（F. Reif）提出：“我所遵循的方法，既不是按照这些学科进展的历史顺序，也不是沿袭传统的方式。我的目标是宁可采用现代的观点，用尽可能系统和简洁的方法阐明：原子论的基本概念如何导致明晰的理论框架，能够描述和预言宏观体系的性质。……我选择的叙述次序就是要对这样的读者有启发作用，他打算自己去发现如何获得宏观体系的知识。”的确，他的《统计物理学》以其深刻而清晰的物理分析，令人回味无穷。

感谢机械工业出版社，正是由于他们的辛勤工作，才为广大教师和学生提供了这套优秀的教材和参考书。

The image shows a handwritten signature in black ink. It consists of two parts: the name '钱学森' (Qian Xuesen) on the left and '陆嘉论' (Lu Jialun) on the right. The signature is written in a cursive, flowing style.

2014年4月12日于北京大学

《伯克利物理学教程》原序（一）

本教程为一套二年期的初等大学物理教程，对象为主修科学和工程的学生。我们想尽可能以呈现在领域前沿工作的物理学家的方式介绍物理。我们旨在编写一套严格强调物理学基础的教材。我们更特别想让学生尽早了解狭义相对论、量子物理和统计物理的思想。同时我们希望我们的表述具有基础的特点，我们从未设想编一套专门面向优等生、尖子生的教材。本教程应该适用于每个在高中学过物理的学生。不过，包括微积分在内的数学课应该同时修读。

本教程共五卷，包括：

- I. 力学 (Kittel, Knight, Ruderman)
- II. 电磁学 (Purcell)
- III. 波动学 (Crawford)
- IV. 量子物理学 (Wichmann)
- V. 统计物理学 (Reif)

因为教材本身强调物理原理，令有的老师觉得实验物理不足。使用教材初期的教学活动促使 Alan M. Portis 提出组建基础物理实验室，这就是现在所熟知的伯克利物理实验室。这所实验室里重要的实验相当完善，而且实验室专门设计得与整套教材很匹配，相辅相成。

现在美国有好几套大学物理的新教材在酝酿、编写。许多物理学家都有编写新教材的想法，原因是科技发展和中、小学日益强调科学。我们这套教材发端于 1961 年末 Philip Morrison（现在麻省理工学院）和 C. Kittel 两人之间的一次交谈。我们还受到国家科学基金会的 John Mays 和他的同事们的鼓励，也受到时任大学物理委员会主席的 Walter C. Michels 的支持。我们在开始阶段成立了一个非正式委员会来指导本教程，委员会由 C. Kittel 任主席。1962 年 5 月委员会第一次在伯克利开会，会上确定了一套试验性大纲，大纲包括我们认为既应该又可能教给刚进大学、主修科学与工程的学生们的具体内容以及应有的学习态度。后来委员会的成员有所调整，而现在的成员就是在本序言末签名的各位。在教材编写过程中每位作者自行选择以最适合其本人分支学科的风格和方法写作。

编写教材的财政资助来自国家科学基金会，加州大学也给予了巨大的间接支持。财务由教育发展中心 (EDC，前身为教育服务公司) 管理，这是一家非赢利性组织，专门管理各项课程改进项目。我们特别感谢 Gilbert Oakley、James Aldrich 和 William Jones 积极而贴心的支持，他们全部来自 EDC。EDC 在伯克利设立了一个办公室以协助教材编写和实验室建设。最近办公室由 Lila Lowell 夫人负责，她极其称职。

加州大学同我们的教材项目虽无正式的联系，但却在很多重要的方面帮助了我们。在这一方面我们感谢物理系主任 Bulton J. Moyer 教授和系里的全体教职员。我们特别感谢所有在课

堂上试用本教程以及根据各自的经验提出批评和改进建议的我们的同事。

欢迎各位提出更正和建议。

Frank S. Crawford, Jr.

Malvin A. Ruderman

Charles Kittel

Eyvind H. Wichmann

Walter D. Knight

A. Carl Helmholz } 主席

Alan M. Portis

Edward M. Purcell }

Frederick Reif

附注

本教程的第1卷、第2卷、第3卷和第5卷此前已出版。本卷对总序作了一些变更，反映本卷编撰出版过程中的一些组织机构性变化。

《伯克利物理学教程》原序（二）

本科生教学是综合性大学现在所面临的紧迫问题之一。随着研究工作对教师越来越具有吸引力，“教学过程的隐晦贬损”（摘引自哲学家悉尼·胡克 Sidney hook）已太过常见了。此外，在许多领域中，研究的进展所导致的知识内容和结构的日益变化使得课程修订的需求变得格外迫切。自然，这对物理科学尤为真实。

因此，我很高兴为这套《伯克利物理学教程》作序，这是一项旨在反映过去百年来物理学巨大变革的本科阶段课程改革的大项目。这套教程得益于许多在前沿研究领域工作的物理学家的努力，也有幸得到了国家科学基金会（National Science Foundation）通过对教育服务公司（Educational Services Incorporated）拨款的形式给予的资助。这套教程已经在加州大学伯克利分校的低年级物理课上成功试用了好几个学期，它象征着教育方面的显著进展，我希望今后能被极广泛地采用。

加州大学乐于成为负责编写这套新教程和建立实验室的校际合作组的东道主，也很高兴有许多伯克利分校的学生志愿协助试用这套教程。非常感谢国家科学基金会的资助以及教育服务公司的合作。但也许最让人满意的是大量参与课程改革项目的加州大学的教职员所表现出来的对本科生教学的生机盎然的兴趣。学者型教师的传统是古老的，也是光荣的；而致力于这部新教程和实验室的工作也正展示了这一传统依旧在加州大学发扬光大。

克拉克·克尔（Clark Kerr）

注：Clark Kerr 系加州大学伯克利分校前校长。

出版说明

为何要采用 SI 国际单位制？

在印度次大陆所有的使用者都认为 SI (Système Internationale) 单位更方便，也更受欢迎。因此，为使这套经典的伯克利教材对读者更适用，有必要将原著中的单位改用 SI 制。

致谢

我们要对承担将伯克利教材单位制更改为 SI 制工作的德里大学圣斯蒂芬学院（新德里）的退休副教授 D. L. Katyal 表示诚挚的谢忱。

同样必须提及的是巴罗达 M. S. 大学（古吉拉特邦瓦多达拉市）物理系的副教授 Surjit Mukherjee 的精准校核。

征求反馈和建议

Tata McGraw-Hill 公司欢迎读者的评论、建议和反馈。请将邮件发送至 tmh.sciencefeedback@gmail.com，并请举报和侵权、盗版相关的问题。

前 言

本书是《伯克利物理学教程》的第4卷，论述量子物理学，是为已学过前面几卷大部分内容的读者而写的入门书。因而本书的理想读者是理工科二年级学生。鉴于最近五十年来物理学的发展，目前把对量子现象的全面学习推迟到二年级以后，似乎是不合理的和不公正的。一本分量适当的入门书无疑应该反映这些发展的某些部分。

我不相信学习量子物理学比学习物理学其他部分在实质上会更困难。在物理学的每一个领域中，我们既遇到我们认为是简单而明了的现象，也遇到很难用定量方式说明的现象。当然，确曾有一个时期，所有量子现象被认为是非常神秘和错综复杂的。在最初探索这个领域的时期，物理学工作者确曾遇到一些真正的心理上的困难，这些困难一部分来自可以理解的偏爱于经典观点的成见，另一部分则来自于实验图像的不完整性。但是，对于今天的初学者，没有理由一定要重新制造这些同样的困难。现已确实知道，经典描述只是近似正确的，而且现在已可得到大批实验结果，来支持和阐明目前理论概念的各个方面。我坚信在已知的事实中，能够找到用初等方法处理起来既明确又足够简单，但又能阐明重要思想和原理的讨论题材。我不太相信，有指导地使学生去思考一系列选择得当的简单而又重要的物理事实时，他们还会感到量子现象比（例如）万有引力现象更神秘。

我写作本书的目的是提供有特征性的量子现象的例子，以使读者了解微观物理学中一些物理参量的典型数量级，并向他们介绍量子力学思想。我力图在我讨论的课题中包括对理解物理学来说特别重要的现象和问题。同时，我力图使讨论尽可能是初等的。我从微观物理学的各个领域选择了一些论题，但我并不想对这些领域中的任何一个提出详细而系统的说明。按照我的意见，这样的说明应留给三、四年级水平的课程。

本书对数学预备知识的要求适度。我只假定读者已学过微积分，包括常微分方程的初步介绍和一些矢量分析。为防止把注意力从物理问题转向技术性的数学问题，我已努力避免在这一阶段采用数学上有困难的论题。凡是要求了解一些特殊函数性质或偏微分方程理论中分离变量法的课题，我都完全未予讨论。关于代数，我已颇为遗憾地断定，不应假定读者熟悉矩阵理论，所以，我已避免了以矩阵理论作为数学工具的一些论题。

我并不认为，要实现教程这一部分的总目的，需要在课堂上讲授本书的所有材料。相反，在选择讨论题材方面，我想给教师留下相当多的自由。为了帮助教师安排课程，我在后面的“教学说明”中讨论了各章的具体目的，而且试图大致列出那些可以认为是必不可少的内容。除了在课堂上实际讲授的内容，本书还提供了一些阅读材料，我觉得这没有什么害处，因为总有一些学有余力的学生需要这些课堂之外的东西。

E. H. 威切曼
伯克利，加利福尼亚

教 学 说 明

本书内容分成九章。每一章分成许多连续编号的小节，每一小节大致对应于一个概念或一连串思想中的一步。正文中的公式、图和表，均以所在的或有关的节号编号。正文中个别论题的专门参考文献列在脚注中。物理数据表列在附录中。每章末列有一些问题供思考，认真的学生应做这些问题中的很大一部分。

我参考的原始论文、其他教科书以及一些基本的评论文章都可以在《科学美国人》中找到。我想对我的学生读者提几点忠告。如果只阅读教科书，你得到的将是一个扭曲的物理图像。教科书提供了一个有序、系统研究的框架，但它不可能反映物理学的丰富性和多样性背后的故事。例如，本书对实验步骤的描述就非常缺乏。为了鼓励学生开始熟悉文献，我列出了论文的出处，这些论文报导了原始的研究。我并不期望学生们能阅读这些论文的一小部分，但遇到感兴趣的课题时，我还是鼓励你去图书馆查找原始资源。你也许会发现其他令你感兴趣的论文，并且很快你就会成为一个具有良好阅读习惯的读者。不要尝试去阅读那些你显然不具备必要知识储备的论文。以你目前的知识储备，图书馆有大量的论文可供你阅读，尤其是实验方面的，但你应该有所选择。至于应该阅读哪些内容，教师会给你进一步的建议。只需要做少量的准备工作，便可以阅读《科学美国人》中基本的评论文章，在这一阶段这一点非常有用，你能了解到目前的实验以及目前有趣的课题。

单位问题在本书中并非争议之点。教师可随其所好使用厘米·克·秒制或米·千克·秒制（唯一有不同的地方是精细结构常数的表示式）。常数都用这两种单位制列出。实验结果用实用单位制表示。在理论的讨论中我常把式子写成无量纲的形式，其中根本不出现单位。

下面我想评介一下每一章的内容，说明我的意图，并指出如何取舍。在正文中有些材料明确地用“提高课题”标出。这些课题并不一定比所讨论的其他课题更高级，也不一定更困难。但它们是离开了本书的叙述主线的论题，因而可以完全略去而不会使其余内容难于理解。

第1章是一般性引论。其中讨论了量子物理的范围，评论了量子物理历史的某些方面。最重要的启示也许是这样一点，即量子物理适用于物理学中的**所有**部门，而不仅仅只与“微观”现象有关。在最简大纲中完全可以把第1章的大部分内容留作阅读作业，教师可把课堂讲授限于讨论第27~52小节中的材料，这些材料是与把普朗克常量引进物理学领域有关的。章末的问题不需要特别的预备知识，在最简大纲中所有问题都可以布置。

第2章是讲述微观物理中物理量的量值，其目的是让学生熟悉这些量值，发现物理常数的“自然”组合，并向学生说明如何在简单模型的基础上作简单的估计。我认为这些目的非常重要，因而本章，包括末尾的问题，值得仔细注意。在最简大纲中可以略去第47~57节。

第3章是讲述能级，但不是关于能级发生的理论解释（这个解释放在第8章中）。采用这种有些独特的陈述次序，其理由是我想把所有需要一些微分方程知识的论题尽可能放到本书的后面。如果学生的预备知识足够，这一次序也可以改变。在第3章中我想给出能级系统和谱项图的现实例子，并说明如何根据自然界中存在能级系统这一经验事实推断出简单的结论。本章的一部分也可以留作阅读作业。一个应充分讨论的重点是寿命和能级宽度之间的联系（第14~26小节）。

第4章是论述光子的波动性和粒子性，提出了重要的实验事实，并引导读者按量子力学的思想去思考这些事实。我认为这一章不应删节。

第5章讨论所有实物粒子的波动性。这样，读过第4和第5章的学生就会认识到所有自然界中发现的实物粒子都有波动性，而且他对于这一简单实验事实的直接含义将有一些概念。他还会认识到粒子的波动性并不与我们关于宏观物理学的经验相矛盾及为什么是这样。这样第5章在很大程度上关系到一些非常基本的问题。克莱因-戈尔登方程的导出（第36~46小节）不应略去。波动方程的解与矢量空间中的矢量相对应的解释的讨论（第47~54小节）可留作阅读作业或完全略去。波被周期性结构衍射的讨论（第16~22小节）在最简大纲中也可略去，尽管略去具有这么多美妙和明确的实验应用的理论是一件遗憾的事。

在第6章的第一部分中讨论了测不准关系（第1~19节）。这个内容极其重要，不应略去。在第6章的其余部分中试图系统地阐述并讨论量子力学思想的某些一般规则。本章提出了测量理论，讨论了统计系综概念和相干、不相干叠加的概念。我力图使这种讨论保持尽可能物理的和具体的。然而不能否认，本章中的讨论远远超出一些引论性书本中已经习惯的讨论，许多读者会感到这些内容可以等以后再讲。另一方面，我认为本章的一些主要概念，如果用有条理的方式表示，并不特别困难，并且我认为试着尽早提出这些概念是值得的。

第7章和第8章是薛定谔理论的引论。我的目的是稍为详细地说明波动力学理论在实践上如何解决问题的。第7章的第49~51节和第8章的第49~58节在最简大纲中可以略去。 α 衰变中势垒穿透的讨论（第7章第37~48节）或许不应略去，因为理论和实验之间的比较必定会产生有力的效果。

第9章论述如何描述基本粒子间的相互作用的问题。第1~18节是碰撞过程的初步讨论。关于粒子的某些已知的事实和某些理论概念在第19~31节中讨论。接着是量子场论一些基础概念的定性讨论。这一讨论的明确结果是第47~55节中汤川势的简化推导。在最简大纲中第9章可整个略去，但我认为应在课程中某处讨论一下相互作用问题。不管第9章的内容是否讲授，我认为这些材料应当提供给感兴趣的学生，毕竟这些问题是现代物理学的焦点。

每章末尾的问题是打算用来进一步说明所讨论的课题的。它们在难易程度上相差颇大。只有比较少的问题属于只涉及把数值代入书中某处出现的公式的类型。一定数量的这种问题在给读者有关数量级的感觉上的确是有用的。但在我的选择中，我要强调那些真正测验读者对正文的理解的问题，我不想把它们淹没在一大堆意义不大的问题中。我还进一步设想每个教师都将

给出一定数量的、和他的特定课程相适应的他自己的题目，如果必要，其中有一些完全可以简单的替代数值的题目。如果教师略去了正文的某些部分，他自然将略去相应的问题，或用其他问题来代替。

除了这些关于可略去的明确的建议以外，必要时教师有权随处进一步略去一节，缩短或简化讨论，而不违背本书的目的。在最简大纲中可以只讲授本书材料的二分之一到三分之二。我估计这可能相当于约二十个学时，而这是整个课程中应该用于量子物理部分的最少时间。

Acknowledgments

I am greatly indebted to the other members of the Berkeley Physics Course Committee for their continual help and encouragement during the past few years. I wish to thank in particular Professors C. Kittel, A. M. Portis and A. C. Helmholtz for their many suggestions for improvements and for their constructive criticism.

Very many of my colleagues in the Department of Physics at Berkeley have helped me at one time or another, and I here want to express my gratitude to all of them. I am particularly grateful to Professors S. P. Davis, W. B. Fretter, W. D. Knight, L. B. Loeb, J. H. Reynolds, A. H. Rosenfeld, E. G. Segre, and C. H. Townes, and to Dr. W. Hines for providing me with photographs, and for their comments on my manuscript.

This book has been developed from earlier drafts used in teaching this part of the course in Berkeley and elsewhere. The earliest version was used by myself when I taught a small group of students in Berkeley during the spring term of 1964. I wish to thank these students for their interest and for the very many helpful comments and suggestions which they made. Later drafts have been subsequently used as texts in the same course by Professors K. Dransfeld, F. S. Crawford, L. T. Kerth, and A. C. Helmholtz. I thank these colleagues of mine for sharing with me their experiences in teaching this course.

My manuscripts have been typed by Mrs. Lila Lowell, and I wish to thank her for her infinite patience and her careful work. The manuscript has been critically read and checked for errors by Dr. J. D. Finley and Dr. L. J. Landau, and I am greatly indebted to them for their many useful comments. I also wish to thank Dr. J. Crichton, who similarly read the manuscript for the preliminary edition.

I am indebted to my wife, Marianne Wichmann, for illuminating my serious discussion of some topics with a few drawings of a not entirely serious character. All the other drawings were prepared in their final form by Mr. Felix Cooper, and it is a pleasure to thank him for his careful work.

目 录

《伯克利物理学教程》序

《伯克利物理学教程》原序（一）

《伯克利物理学教程》原序（二）

出版说明

前言

教学说明

致谢

第1章 导论	1
• 量子物理学的范围（1~7）	2
• 原子和基本粒子（8~19）	5
• 经典理论的适用范围（20~26）	14
• 普朗克常量的发现（27~40）	18
• 光电效应（41~46）	28
• 原子的大小和稳定性问题（47~55）	32
• 进一步学习参考	38
• 问题	39
第2章 量子物理学中物理量的量值	43
• 单位制和物理常量（1~10）	44
• 能量（11~18）	49
• 原子物理学和分子物理学中的特征物理量（19~32）	56
• 核物理的几个最基本的事实（33~39）	66
• 万有引力和电磁力（40~43）	73
• 关于数值计算（44~46）	75
• 提高课题：自然界的基本常数（47~57）	78
• 进一步学习参考	85
• 问题	85
第3章 能级	93
• 谱项图（1~13）	94
• 能级的有限宽度（14~26）	104
• 能级和谐项图的继续讨论（27~42）	111

• 谱线的多普勒增宽与碰撞增宽效应 (43 ~ 46)	127
• 提高课题: 关于电磁跃迁的理论 (47 ~ 56)	130
• 进一步学习参考	136
• 问题	137
第4章 光子	141
• 光子的粒子性 (1 ~ 17)	142
• 康普顿效应: 韧致辐射; 粒子对的产生和湮没 (18 ~ 30)	152
• 光子会“分裂”吗? (31 ~ 50)	162
• 进一步学习参考	174
• 问题	175
第5章 实物粒子	179
• 德布罗意波 (1 ~ 15)	180
• 周期性结构的衍射理论 (16 ~ 22)	191
• 只有一个普朗克常量 (23 ~ 27)	196
• 物质波会分裂吗? (28 ~ 35)	200
• 波动方程和叠加原理 (36 ~ 46)	205
• 提高课题: 物理状态的矢量空间 (47 ~ 54)	211
• 进一步学习参考	216
• 问题	217
第6章 测不准原理和测量理论	221
• 海森伯测不准关系 (1 ~ 19)	222
• 测量和统计系综 (20 ~ 40)	234
• 振幅和强度 (41 ~ 49)	249
• 每次测量结果原则上可以预言吗? (50 ~ 56)	254
• 偏振光和非偏振光 (57 ~ 61)	259
• 进一步学习参考	262
• 问题	262
第7章 薛定谔波动力学	267
• 薛定谔的非相对论性波动方程 (1 ~ 18)	268
• 几个简单的“势垒问题” (19 ~ 36)	279
• α 放射性的理论 (37 ~ 48)	292
• 提高课题: 波函数的归一化 (49 ~ 51)	304
• 进一步学习参考	307
• 问题	307
第8章 定态理论	311

• 量子化, 即本征值问题 (1 ~ 26)	312
• 谐振子 分子的振动和转动激发 (27 ~ 41)	328
• 类氢体系 (42 ~ 48)	339
• 提高课题: 薛定谔理论中位置变量和动量变量 (49 ~ 58)	344
• 进一步学习参考	350
• 问题	350
第 9 章 基本粒子及其相互作用	357
• 碰撞过程和波动图景 (1 ~ 18)	358
• 粒子的意思是什么? (19 ~ 31)	372
• 量子场论的基本概念 (32 ~ 46)	382
• π 介子和核力 (47 ~ 55)	393
• 结束语 (56)	400
• 进一步学习参考	401
• 问题	401
附录	405
• A 一般物理常量	406
• B 最稳定的基本粒子	408
• C 化学元素	410
索引	413