

量子物理学

《伯克利物理学教程》第四卷

〔美〕E. H. 威耳逊 著

科学出版社

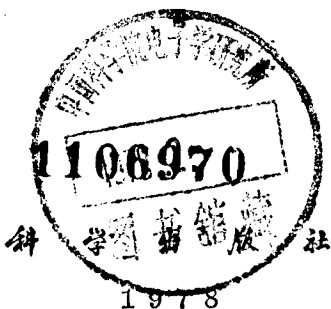
53.26

量子物理学

《伯克利物理学教程》第四卷

[美] E. H. 威切曼 著

复旦大学物理系 译



内 容 简 介

《伯克利物理学教程》是美国近年来出版的供大学理工科头两年使用的基础物理教程。本书是其中的第四卷，阐述量子力学的基本原理和概念。共包括九章：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，薛定谔波动方程，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力学理论的根据，并特别着重于澄清对量子力学的一些误解；书中还概要地叙述了量子力学在原子物理、分子物理、核物理和基本粒子等领域中的应用。

本书可供大专院校理工科师生阅读，也可供有关科技人员参考。

E. H. Wichmann

QUANTUM PHYSICS

Berkeley Physics Course, Vol. 4

McGraw Hill, 1971

量 子 物 理 学

《伯克利物理学教程》第四卷

[美] E. H. 威切曼 著

复旦大学物理系 译

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

上海商务印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1978年9月第一版 开本：787×1092 1/32

1978年9月第一次印刷 印张：16 1/2

印数：0001—218,300 字数：374,000

统一书号：13031·821

本社书号：1172·13—3

定 价：1.70 元

中译本前言

自六十年代初期以来，美国一些重点大学，为了解决基础物理教材内容陈旧，与现代科学技术蓬勃发展的要求不相适应的矛盾，开始对大学基础物理课程试行改革。《伯克利物理学教程》就是这种尝试之一。它是美国近年来较为流行的供大学理工科学生头二年使用的基础物理学教程，一共包括五卷：1. 力学；2. 电磁学；3. 波动；4. 量子物理学；5. 统计物理学。原教程编写的意图，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。全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。在编写过程中，曾吸收了在各个前沿领域工作的许多物理学工作者的意见，经过较长时间的教学试验和多次修改，于1963年开始出版。迄今已重版多次。这部教程对美国大学物理教学有较大影响。原书比较偏重于理论方面，在实验方面，另编有《伯克利物理学实验》一书。鉴于这部教程在取材、编排和写法上有一些特点，对如何利用新的科学技术成就来改革和充实基础物理教学内容尚有可供借鉴之处，按照“洋为中用”的方针，我们翻译出版中译本，以供我国高等院校师生和科技人员参考。由于各卷内容相对独立，我们将分别出版。

必须指出，这部教程完全是按照美国教学原则编写的，不一定适合我国的具体情况，观点上也会存在一些问题。希望

读者阅读时注意。

在中译本中，我们对原书作了少量删节，删去的主要有和原书内容关系不大的一些物理学家的照片和简单传记材料以及其他一些材料。原书各章附有一些参考读物，考虑到这些读物有的出版较早，国内难以找到，我们也已一律删去。读者可以根据需要与可能，参考有关的书籍。

译文错误或不当之处，请读者批评指正。

1977年11月24日

原书序言

本书是《伯克利物理学教程》的第四卷，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。一本份量适当的入门书无疑地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门在实质上会更困难。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象的不完整性。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。我不大相信，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，他们竟会感到量子现象比(例如)万有引力现象更神秘了。

我在本书中的目的是在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。

关于数学预备知识的要求并不过高。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，我在序言后面的《教学说明》中讨论了各章的具体目的，而且试图大致列出可以认为是必不可少的内容。

E. H. 威切曼

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。课文中的公式、图和表，均以所在的或有关的节号编号。课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。每章之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。

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，其中根本不出现宏观单位。

下面我想评介一下每一章的内容，说明我的意图，并指出可以如何取舍。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课文难于理解。

第一章是一般性引论。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。在最低大纲中很可以把第一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节中的材料，这些材料是与把普朗克常数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，在最低大纲中所有问题

1106970

· ix ·

都可以布置。

第二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。在最低大纲中可以略去第 47—57 节。

第三章是讲述能级，但不是关于能级发生的理论解释，这个解释放在第八章中。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。在第三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 节)。

第四章是论述光子的波性和粒子性。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。

第五章讨论所有实物粒子的波性。这样，读过第四和第五章的学生就会认识到所有自然界中发现的实在粒子都有波性，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。这样第五章在很大程度上关系到一些非常基本的问题。克莱因-戈登方程的导出(第 36—46 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 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 节)在最低大纲中也可略去，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。

在第六章的第一部分中讨论了测不准关系(第1—19节)。这个内容具有决定性的重要性,不应略去。在第六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。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是物理的和具体的。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,我并且认为试着尽早提出这些概念是值得的。

第七章和第八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。第七章的第49—51节和第八章的第49—58节在最低大纲中可以略去。 α 衰变中势垒穿透的讨论(第七章第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。

第九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。在最低大纲中第九章可整个略去,但我认为应在课程中某处讨论一下相互作用问题。不管第九章的内容是否教,我认为这些材料应当提供给感兴趣的学生。这些问题毕竟是现代物理学注意的中心。

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确实是有益的。但在我

的选择中,我要强调那些真正测验读者对课文的理解的问题,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.如果教师略去了课文的某些部分,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.在最低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.

目 录

中译本前言	v
原书序言	vii
教学说明	ix
第一章 导论	1
一、量子物理学的范围(1—7)	1
二、原子和基本粒子(8—19)	5
三、经典理论的适用范围(20—26)	17
四、普朗克常数的发现(27—40)	22
五、光电效应(41—46)	34
六、原子的大小和稳定性问题(47—55)	40
问题	47
第二章 量子物理学中物理量的量值	50
一、单位制和物理常数(1—10)	50
二、能量(11—18)	57
三、原子物理学和分子物理学中的特征物理量(19—32)	64
四、核物理的几个最基本的事实(33—39)	77
五、万有引力和电磁力(40—43)	86
六、关于数值计算(44—46)	89
七、提高课题:自然界的基本常数(47—57)	91
问题	100
第三章 能级	107
一、谱项图(1—13)	107
二、能级的有限宽度(14—26)	124
三、能级和谱项图的继续讨论(27—42)	134

四、谱线的多普勒增宽与碰撞增宽效应(43—46)	158
五、提高课题: 关于电磁跃迁的理论(47—56)	162
问题	170
第四章 光子	174
一、光子的粒子性(1—17)	174
二、康普顿效应, 韧致辐射; 粒子对的产生和湮没(18—30)	188
三、光子会“分裂”吗?(31—50)	204
问题	218
第五章 实物粒子	223
一、德布罗意波(1—15)	223
二、周期性结构的衍射理论(16—22)	236
三、只有一个普朗克常数(23—27)	246
四、物质波会分裂吗?(28—35)	250
五、波动方程和迭加原理(36—46)	256
六、提高课题: 物理状态的矢量空间(47—54)	263
问题	268
第六章 测不准原理和测量理论	273
一、海森伯测不准关系(1—19)	273
二、测量和统计系综(20—40)	291
三、振幅和强度(41—49)	314
四、每次测量结果原则上可以预言吗?(50—56)	321
五、偏振光和非偏振光(57—61)	326
问题	329
第七章 薛定谔波动力学	335
一、薛定谔的非相对论性波动方程(1—18)	335
二、几个简单的“势垒问题”(19—36)	348
三、 α 放射性的理论(37—48)	364
四、提高课题: 波函数的归一化(49—51)	381
问题	384

第八章 定态理论	388
一、量子化, 即本征值问题(1—26)	388
二、谐振子. 分子的振动和转动激发(27—41)	411
三、类氢体系(42—48)	427
四、提高课题: 薛定谔理论中位置变量和动量变量(49—58)	433
问题	440
第九章 基本粒子及其相互作用	447
一、碰撞过程和波动图景(1—18)	447
二、粒子的意思是什么?(19—31)	467
三、量子场论的基本概念(32—46)	483
四、 π 介子和核力(47—55)	495
五、结束语(56)	502
问题	503
附录	507
表 A. 一般物理常数	507
表 B. 最稳定的基本粒子	509
表 C. 化学元素	511
表 D. 单位和转换因子	512
表 E. 表示能量的各种单位的转换因子	513
表 F. 重要物理常数的非精确值	514

第一章 导 论

一、量子物理学的范围

1 在本教程的这一部分里，我们将研究原子、原子核和基本粒子领域中的物理学。这样，我们就会遇到自然界的一些新方面；所谓新的，意思是指在前几卷里我们尚未系统地讨论过这些问题。自然界的这些方面通常被称为量子现象，所以，我们就称这一卷的主题为量子物理学。现在公认的量子物理学的基本数学理论称为量子力学。

然而，不应该认为“量子物理学”是某种与宏观世界毫无关系的东西。实际上，整个物理学都是量子物理学；我们今天所了解的量子物理学一些定律，都是自然界中最普遍的定律。

2 在《伯克利物理学教程》(Berkeley Physics Course)的前几卷里，我们研究了宏观世界中的物理现象。我们已发现的自然定律都是经典物理学的定律。一般说来，可以认为经典物理学涉及的只是自然界中和物质的根本结构没有直接关系的那些方面。在这一卷里正好相反，我们要特别研究基本粒子，并且要尝试揭示出支配这些粒子行为的定律。我们的注意力自然会集中在这些定律尽可能显著突出的那些物理情况，这就是说，我们要研究的是每次只有少数几个粒子相互作用的情况。因此，这一卷所研究的物理学大部分可以称之为微观物理学；即研究由少数基本粒子构成的“小”体系。

然而,如果知道了支配基本粒子的基本定律,原则上也就可以预言由大量基本粒子构成的宏观物理体系的行为. 这意味着经典物理学的定律来自微观物理学的定律,从这个意义上说,量子力学在宏观世界中也与在微观世界中一样适用.

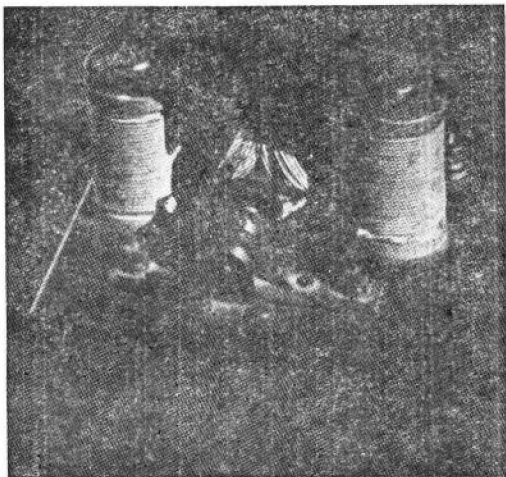


图 2.4 一个量子力学体系的例子. 这个电动机(以及作为电源使用的手电筒电池)的行为受量子力学定律的支配. 虽然作者在大约三十年前得到这个电动机时从未想到这一点.

设计电动机可以而且应该根据经典电磁理论和经典力学,它们是量子力学的极限形式. 没有一个神志正常的工程师会企图用组成这个体系的所有基本粒子间的相互作用来描述诸如此类的宏观体系.

3 当我们把经典物理学的规律应用于宏观体系时,我们试图描述的仅仅是体系行为的某些总的特征. 例如,我们把“刚体”作为一个整体来考察它的运动,而不去讨论它的所有基本组成部分的运动. 这就是物理学的经典理论应用于宏观体系时的特点,即忽略体系行为的细节,并且也不去考虑情况的所有方面. 从这个意义上说,经典物理学的定律是自然界的近

似定律。我们应该将它们看成是更基本和更全面的量子物理学定律的极限形式。

换句话说，经典理论是唯象理论。唯象理论试图描述和概括的是物理学中某些有限领域内的实验事实。它不打算描述物理学中的每件事情，但如果它是一个好的唯象理论，它的确可以非常准确地描述有限领域内的一切。善于思考的读者可能会说，每一种物理学理论毕竟都是唯象的，基本理论和唯象理论之间的差别只是程度上的问题。不过作为物理学家，我们认为在这两种理论之间有着明显的差别。自然界的基本定律的显著特点是它们的极大的普遍性；对它们所叙述的内容，我们不知道有什么例外。我们把它们看作是**正确的，严格的和普遍有效的**，除非有明确的实验证据与之抵触。与此相反，唯象理论中的定律我们认为不是普遍有效的；我们知道它们只在物理学的某些有限的领域中是有效的（即足够准确的），超出了这个领域，这个唯象理论可能是毫无意义的。

4 当然，我们不应该轻视唯象理论。它们在概括我们在物理学各个领域中的实际知识上，是非常有用的。在物理学中有许多例子，对于这些例子我们确信有一个可用的基本理论，不过现象的复杂性使我们不能根据“第一原理”作出准确的预言。在这种情况下，我们就试用一个简化的唯象理论，它部分地直接依据实验事实，部分地是根据基本理论的某些一般性的特征。换句话说，让“物理体系做我们的某些理论工作”。再者，在物理学里还有许多没有找到基本理论的例子。这时，我们根据某些简单模型所能建立的任何唯象理论，都可以用来作为寻找更全面理论的一种过渡手段。

当我们试图去了解一种不熟悉的物理现象时，显然合理的是首先试用最简单的东西，这就是说，首先试用一个在表观