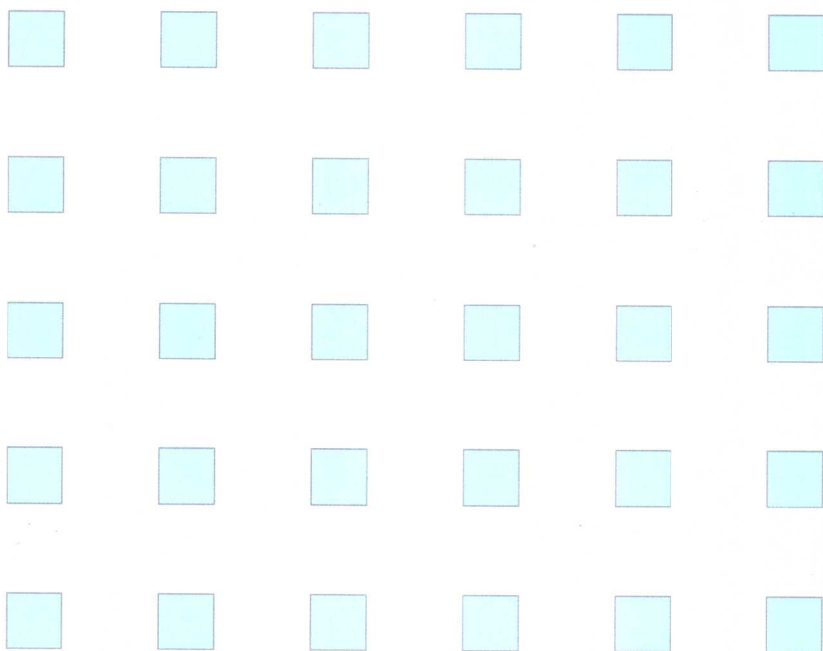


理论物理学之四

量子力学

张启仁 著



科学出版社

www.sciencep.com

内 容 简 介

本书系作者根据多年来在北京大学技术物理系授课的讲义改编而成. 经原国家教委高等学校理科物理教材编审委员会组织评选和复审后, 推荐作为高等学校物理专业量子力学的教材.

本书内容丰富, 选材新颖, 特色鲜明. 全书共分 20 章, 主要包括基本实验事实、定态薛定谔方程、力学量与状态、中心力场、状态随时间变化、散射、转动与角动量、全同粒子、原子、分子、定态微扰、电磁作用、跃迁、相对论量子力学、形式理论、量子统计等. 每章后均有习题. 书后有数学附录. 全书采用国际单位制.

读者对象: 理科大学物理专业师生和研究生, 以及有关研究人员.

图书在版编目(CIP)数据

量子力学/张启仁著. —北京: 科学出版社, 2002. 1

(理论物理学之四)

ISBN 7-03-009482-4

I. 量… II. 张… III. 量子力学-高等学校-教材 IV. O413.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 23157 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2002 年 1 月第 一 版 开本: B5 (720 × 1000)

2002 年 1 月第一次印刷 印张: 34 1/4

印数: 1 - 3 000 字数: 652 000

定价: 48.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈环伟〉)

序

本书的前身是1989年由高等教育出版社出版的量子力学.该书是由国家教委高等学校理科物理教材编审委员会组织评选和复审后,推荐作为高等学校物理专业量子力学教材出版的,1992年获国家教委优秀教材一等奖.

教学是一项创造性的劳动,它不仅要求教师通晓所教课程的内容,而且要对内容作出最好的表达.这里主要不是指表达的技术和艺术,而是指教学过程要符合学生的认识规律.这就使教学本身成为一项有趣的研究课题,包括对课程涵盖的科学内容的研究和人们认识这些科学内容的过程(科学史)的研究,从中领悟相关的认识规律,并用于教学,对其内容常常与人们从日常经验获得的‘常识’相悖的量子力学说来尤其如此.

众所周知,量子力学是从波动力学和矩阵力学两方面几乎同时发现的.就波动力学讲,先是实验发现光的波粒二象性,德布罗意猜想一般物质都具有这种二象性.这一猜想不仅用了“由此及彼”的思想方法,而且依据了如下事实:波的频率 ν 在一定条件下是不连续的.这种不连续性和关系 $E = h\nu$ 一起可以自然地说明粒子能量 E 的量子性.不久,电子衍射实验证实了这一猜想.同时,薛定谔通过力学与光学的对比,提出了他的著名方程.用它计算氢原子能量,自然地得到了正确的结果,从而肯定这一思想路线是正确的.计算能量的定态薛定谔方程是一种本征方程.它的自然推广是为每一力学量找一个算符,用这个算符的本征方程表示相应力学量的性质.再将统计解释推广于每一力学量,就得到量子力学的一套基本原理.可见,这一认识过程本来是自然易懂的,因为它包含的实践与理论的相互促进,“由此及彼、由表及里”的思想方法,正是人们认识每一事物时都应采取的方法,不过在这里表现得更集中、更突出罢了.量子力学的发现者们的优越条件,只是比别人更熟悉当时有关的实验和理论状况,他们的天才只是思想特别准确、敏捷,没有什么神秘的地方.看来,按这一历史的线索引导学生入门是可取的.

然而,要把许多物理学家多年的思维发展在几小时内教给学生,还必须在教学法上下功夫.波动力学的创建过程中用到大量经典力学与几何光学的对比,其中包括许多分析力学内容.虽然本丛书第一卷(经典力学)中包含了创建波动力学必须的分析力学,但作为一本独立的量子力学书,不能假定读者都有良好的分析力学训练;作为面向全国的量子力学课,也不能假定物理类专业三年级学生都熟悉分析力学.在量子力学课中过多地讲分析力学也有喧宾夺主之嫌.为了绕过这一困难,我

们将经典力学与几何光学的对比集中于对折射定律的分析,用较初等的知识迅速走过历史上复杂得多的长过程,以较充足的理由建立起量子力学的基本原理.在这样的引导下,学生的学习过程就以一种简洁的方式再现了人类的认识过程,像胚胎的发育以一种简洁的方式再现了生物的进化过程一样.由于学生的学习过程和人类的认识过程都遵从认识的一般规律,这种以简洁方式再现认识历史的原则在教学法上可能有其普遍意义.在我们按这一原则组织量子力学前几章的教学时,确实感到比较顺利.

作为一本教材,本书基本原理的建立是结合实际问题逐渐展开的.然而我们要求最后建立的基本原理是完备的,系统的,足以作为以后演绎的基础.通常认为,量子力学的数学基础是艰深的,只能由专著论述.例如线性自伴算符本征函数的完备性问题,一般认为要用泛函分析才能解决,而量子力学教材虽然不能假定读者通晓这方面的知识.这便迫使许多教材在这一带根本性的问题上一带而过,不予论证.其结果是在几代物理学家的心灵深处留下一片空白.这自然是一个严肃的教师和教材作者难以忍受的.经一番研究,我们发现事情并不像原来设想的那样绝望,我们可以用较初等的方法论证线性自伴算符本征函数的存在性和完备性.本书 § 3.5 包含了这一内容.当然,从数学上看,这一论证是不彻底的,因为它要求扩充态空间.然而,从量子力学方面看,特别从量子力学的通常表述形式看,态空间本不是希尔伯特空间,扩充是实际需要的.这一论证至少凸显了本征函数完备性与态空间扩充之间的关系.

在第七章,我们试图沿狄拉克^①的思路,在叠加原理的基础上建立量子力学的理论体系.我们论证了:每一力学量都有一套完备正交归一的本征态矢量系.如果我们还要求它们对应的本征值全为实数,则每一力学量便都对应一个线性自伴算符.这一论证,直接将力学量的算符表示及相关的数学性质建立在实验的态叠加原理的基础上.

正确的基本概念与深入的实际应用是相辅相成的.我们遵从这两方面并重的原则.波粒二象性是物质的基本属性.如何正确理解波动性与粒子性的关系,是在量子力学课中应当解决的问题.由于常以粒子或粒子系为对象,波动性又常与波函数的统计解释混淆,容易误以为粒子性是基本的,波动性只是粒子奇特的概率分布的表现.这种误解会导致理解困难.海森伯^②在《量子论的物理原理》一书中对这个问题作了精辟的阐述.他指出:虽然经典的粒子和经典的波动十分不同,量子的粒子和量子的波动却是同一的.粒子量子化必具波性,波动量子化必具粒子性.要表

① 见 § 7.1 的注释.

② W. Heisenberg, Die Physikalischen Prinzipien der Quantentheorie. 有中译本:W. 海森伯著,《量子论的物理原理》(科学出版社,1983).

达好这种关系,就不仅要介绍粒子的量子论,而且要介绍波动的量子论,并阐明二者的等价性.我们在第十章和第十四章安排了相关内容.不仅将它们作为实际有用的方法介绍,而且将它们作为阐明上述概念的手段.20世纪50年代以来,玻色凝聚概念在超导、超流、激光、生物物理、核物理和高能物理的广大领域变得越来越重要;近年更在极低温下实现了原子的玻色凝聚,在宏观尺度上看到了原子波;这些都表明波的量子论应在量子力学课中(而不只是在量子场论中)占适当地位.

量子力学存在独特的解释问题,在教学中引起特别的困难.由于要具备足够的实际知识才能正确地提出和解决这一问题,开始时我们总是尽力把学生的注意力引向实际,而把对解释问题的讨论放到最后.这一问题也确实是在量子力学发现半个世纪后,到20世纪70年代中才由实验解决的.这指的是对爱因斯坦可分隔原则的否定性实验裁决和对量子力学不可分隔预言的实验证实.这是近30年来量子力学基础方面的重大进展,近年更出现了重大应用的可能性.自1989年我们将这方面内容写进量子力学教材以来,已有越来越多的教材加入了这一内容.本书最后一章以此为核心详细介绍和分析了量子力学的解释问题,又称为量子力学基本问题.

大概是受确证不可分隔性的鼓舞,近年有大量与量子力学基本问题相关的实验报道.结果自然总是与量子力学的预测一致,却未能像澄清不可分隔性那样澄清对量子世界的任何基本认识.最接近达到这一目标的是干涉衍射中衍射粒子的路径识别(which way)实验,特别是这类实验中的延迟选择(delayed choice)实验^①.在这类实验中人们通过对与衍射粒子纠缠却已不与它作用的另一粒子的测量识别衍射粒子的路径.这种识别的结果同样导致衍射图案的消失.可见衍射图案的消失不是衍射粒子受测量仪器不可控制的作用的结果.特别在延迟选择的实验中,对与衍射粒子纠缠的另一粒子的测量延迟到了衍射粒子进入探测器之后,即在探测衍射粒子之前,对与它纠缠的另一粒子也未作测量,衍射图案的消失与测量仪器的作用更无关系.实验结果与量子力学的预测一致表明,将衍射图案的消失归因于测量仪器不可控制的作用并非量子力学的固有内容,而是海森伯和哥本哈根学派当时对双狭缝衍射理想实验的分析.由于我们从未跟随哥本哈根学派作这种分析,而且认为从量子力学看这类实验的结果是理所当然的,因此不在正文中介绍这类实验的细节.有兴趣的可参阅所列文献.量子力学确实还有基本问题要由实验解决.在作者看来,这莫过于测量中波包编缩的真实性问题.本书§20.2对此作了一些分析,并期待着新的实验结果.

近几十年,量子力学的理论形式和应用也都有些重大进展,其中成熟的部分自应反映到教材中.对此,除在各有关章节零星地有所反映外,我们在第十七章集中介绍形式理论,第十八章介绍量子作用量原理和费曼路径积分.它们都既是理论

① Y.-H. Kim et. al. *Phys. Rev. Lett.* (84)(2000)1.

的深化,又是实际应用中的有力工具.

在教学中我们遵循“讲清楚”的原则,决不回避问题.一切定理、公式和结论都给出适当的证明.这不仅为了帮助读者踏实掌握理论,也为了训练读者一丝不苟的认真态度,并表明这是可以做到的.当然,这并非易事.如前所述,有些证明要用较深的数学,我们就设法改作初等证明.在不可避免地一定要用超出物理类专业三年级水平的数学时,我们就给出数学附录,其中不仅给出所需的内容,也给出这些内容的证明.

为使读者能由浅入深,循序渐进,也为适应不同类型、不同深度课程的不同需要,本书采用了多层次螺旋上升的结构.前六章在建立基本原理的同时,也讲述原理在定态和跃迁、分立谱和连续谱(势垒穿透和散射)、以及轨道运动和自旋等方面的应用,可作为一个较小和较浅课程的教材.在这样使用时还可略去一些较深的内容(如 § 2.3, § 3.4, § 3.5, § 5.4, § 6.6 和 § 6.7 等),再加入后面几章中的一些较基本的内容(如 § 7.1, § 7.2, § 10.1, § 10.3, § 11.2 和 § 11.3 等).跃迁在 § 5.5 中是以磁共振为例讲的.选择这个例子(而不是原子光谱)出自多方面的考虑.首先,这是一个二能级系统,能精确求解,可用来简单明了地说明关于跃迁的基本概念,如共振和色散等.二能级系统的量子论现已被广泛用于许多实际问题的模型理论中.其次,它不仅是量子电子学和核物理实验方法等学科中直接有用的材料,而且通过举一反三启发人们了解原子钟和磁场、磁矩精确测量等技术的一般原理.最后,它适宜于作为经典电磁场引起的跃迁来考虑,无需将电磁场量子化,这正是一门量子力学小课所能做到的.

第七章总结并在较高水平上系统讲述基本原理.第八章到第十五章在新基础上进一步讲述各方面的应用.前十五章合起来可作为一个完整的非相对论量子力学课的教材.使用中也可略去一些较深或较专门的内容(如 § 8.5, § 8.6, § 9.2 ~ § 9.6, § 10.4, § 14.2 ~ § 14.4, § 15.6 和 § 15.7 等),加入后面几章中较基本的内容(如 § 19.1 和 § 19.2 等).后面几章余下的部分和前十五章中略去的部分一起,可以成为一门高等量子力学课的教材.它可以是研究生课,也可以是本科生的选修课,与前面的量子力学课相衔接.在作者看来,量子力学是一门统一的,完整的学科,将它划分为量子力学和高等量子力学两门课是人为的.划分会因人而异,因时而异.因此教材以统一起来为宜.

以上所提当然都只是建议.读者和教师可按自己的想法使用本书.写书是创造,用书也是创造.本书中较深或较专门的内容都写成相对独立的,可随意增减而不影响对其余部分的理解.安排它们的目的是为读者和教师准备好自由选材的广阔余地.

本书尽可能将公式写成与单位制无关的形式.这一方面可免去单位制的困扰,另一方面也便于表现客观规律的内在美.在必须选用一定单位制的地方,按规定采

用国际单位制(SI). 由于高斯制长期在物理界通行, 至今仍在各种文献和学术活动中广泛使用, 对重要的物理量本书同时给出在高斯单位制中的值.

与 1989 年版相比, 本书除订正一些印刷错误和文字修改外, 主要作了以下增修: 1. 将用于氢原子问题的缔合拉盖尔多项式改为广义拉盖尔多项式, 以便于更广泛的问题. 例如, 它使我们能将相对论氢原子问题讲得更透彻, 不仅给出能谱的精细结构, 还求出归一化的定态波函数. 2. 彻底讲解了两片平行金属箔的卡什米尔效应, 为此增加了一个关于伯努利数和欧拉求和公式的附录. 3. 扩大了相干态的内容, 增加了压缩态的内容. 除 § 14.4 讲解电磁场的相干态和压缩态外, 还在第十章末增加两节, 讲解简谐振动和一般波场的相干态和压缩态. 4. 在 § 17.4 关于微扰展开的讲解中, 增加了在 H^0 有简并的情况下如何选择正确零级近似态的一般讲解, 使这一节成为定态微扰展开的完整理论. 5. 作为不可分隔性的应用, 在第二十章增加了一节关于态的远程传递和量子通讯的内容, 其中还提出了统计可分隔性概念, 用以讲解超光速量子通讯的不可能. 现在有些量子力学教材还包括了量子算法理论. 这种算法用到态叠加和态纠缠等量子概念, 有其它算法不能比拟的优点. 但从根本上讲是一种算法理论而不是一种量子理论. 我们决定不将它收入本书.

由于时间仓促, 未能对本书作更多的校正和修改. 自己也觉得还有许多不足之处. 希望同仁和读者多提宝贵意见, 使作者能在今后的校正和修改中使本书臻于完善.

张启仁

2001 年 1 月 15 日于

北京大学承泽园

目 录

第一章 历史背景和基本实验事实	1
§ 1.1 经典物理学的成熟与危机	1
§ 1.2 光的量子性	1
§ 1.3 物质的量子性	3
§ 1.4 旧量子论	4
§ 1.5 物质波假设及其实验证实 量子力学的诞生	5
§ 1.6 波函数的统计解释及其对运动状态的描述	7
习题一	9
第二章 定态薛定谔方程及其在一维问题中的应用	10
§ 2.1 定态薛定谔方程	10
§ 2.2 一维谐振动	12
§ 2.3 WKB 半经典近似 玻尔-索末菲量子化条件	18
§ 2.4 周期场中的运动 固体能带	22
§ 2.5 若干定性讨论	23
习题二	26
第三章 力学量与状态	28
§ 3.1 算符及其本征方程	28
§ 3.2 算符运算与算符的组成	29
§ 3.3 线性自伴算符的性质	32
§ 3.4 本征方程与变分原理	36
§ 3.5 线性自伴算符本征函数系的存在性与完备性	38
§ 3.6 力学量能同时确定的条件 完备力学量组	40
§ 3.7 任意力学量的统计分布、平均值和均方差	44
§ 3.8 测不准关系	46
习题三	48
第四章 中心场中的定态运动和自旋	50
§ 4.1 轨道角动量和宇称	50

§ 4.2	分离变量与一般讨论	55
§ 4.3	氢原子及类氢离子	58
§ 4.4	球形方势阱	64
§ 4.5	$\frac{1}{2}$ 自旋	66
§ 4.6	轨道角动量与自旋角动量相加 一个粒子的总角动量	72
§ 4.7	自旋轨道耦合引起的能级劈裂 碱金属原子光谱的双重线	76
习题四		79
第五章 状态随时间的变化		81
§ 5.1	波函数完全描述状态与状态变化的薛定谔方程	81
§ 5.2	概率守恒与概率流	83
§ 5.3	势垒穿透 方势垒	85
§ 5.4	势垒穿透 WKB 方法 α 衰变	89
§ 5.5	自旋态之间的跃迁 磁共振现象 二能级系统	93
§ 5.6	力学量的平均值随时间的变化 守恒量	97
§ 5.7	量子力学的经典极限 波包的经典运动	99
习题五		103
第六章 散射问题		105
§ 6.1	二体系统 相对运动与质心运动的分离 质心系与实验室系	105
§ 6.2	截面与散射振幅 散射过程的描述	109
§ 6.3	李普曼-许温格方程及其级数解 玻恩近似	114
§ 6.4	带电粒子在一电荷分布上的散射	118
§ 6.5	分波法	119
§ 6.6	库仑散射 带电粒子间散射的分波法	125
§ 6.7	复合粒子的碰撞 非弹性过程	130
习题六		133
第七章 基本原理的归纳与补充		135
§ 7.1	态 态的叠加原理 态矢量及其表象	135
§ 7.2	力学量 算符及其表象	138
§ 7.3	不同表象间的么正变换	142
§ 7.4	态的变换性质与力学量 对易关系	144
§ 7.5	概率守恒与态随时间变化的么正不变性 哈密顿量及其自伴性	147
§ 7.6	对称性与守恒量	149

§ 7.7 态矢量与算符的协同么正变换 量子力学在么正变换下的不变性	150
§ 7.8 薛定谔图像 海森伯图像 相互作用图像 正则量子化方法	151
习题七	153
第八章 转动与角动量	156
§ 8.1 无穷小转动与角动量算符	156
§ 8.2 角动量的本征值与本征态	157
§ 8.3 角动量相加 CG 系数与 W 系数	160
§ 8.4 不可约张量及其矩阵元 维格纳-艾卡定理	167
§ 8.5 任意转动下态矢量的变换 转动函数	170
§ 8.6 刚体的转动 对称与不对称陀螺	174
习题八	180
第九章 代数方法与动力学对称	182
§ 9.1 一维谐振动	182
§ 9.2 氢原子与 $O(4)$ 动力学对称	184
§ 9.3 三维各向同性简谐运动 $SU(3)$ 动力学对称	189
§ 9.4 李代数与变换群	192
§ 9.5 李代数的表示和不可约表示	198
§ 9.6 能级按李代数不可约表示的分类 强子谱	206
习题九	210
第十章 全同粒子系统与量子化波场 宏观量子力学	212
§ 10.1 全同性原理及其数学表示 波函数的交换对称性	212
§ 10.2 波函数的对称化 玻色统计与玻色凝聚	215
§ 10.3 波函数的反对称化 泡利原理与费米统计	218
§ 10.4 粒子数表象 二次量子化或波场的量子化 对波粒二象性的进一步了解	220
§ 10.5 超流体 速度环量的量子化	229
§ 10.6 超导 迈斯纳效应与磁通量量子化	231
§ 10.7 简谐振动的相干态与压缩态	234
§ 10.8 玻色子波场的相干态 粒子数与相角的测不准关系 压缩态	241
习题十	245
第十一章 粒子系在中心场中的运动 原子	247
§ 11.1 守恒量与能级分类	247

§ 11.2	氢原子的初步理论	249
§ 11.3	变分法及其在氢原子中的应用	252
§ 11.4	原子中的独立粒子运动 自洽场方法	255
§ 11.5	原子的壳层结构和周期律	262
习题十一		265
第十二章 定态微扰法及其应用		267
§ 12.1	微扰法的一般讨论	267
§ 12.2	一维非简谐振动	271
§ 12.3	电场对原子的作用 斯塔克效应	273
§ 12.4	磁场对原子的作用 塞曼效应	275
§ 12.5	原子中的 LS 耦合	278
§ 12.6	jj 耦合与中间耦合	283
习题十二		287
第十三章 原子间力 分子及其他		290
§ 13.1	绝热近似	290
§ 13.2	氢分子	291
§ 13.3	交换力 共价键和铁磁性	293
§ 13.4	分子轨道概念	295
§ 13.5	双原子分子的守恒量与能级分类	298
§ 13.6	双原子分子的振动和转动 能谱	300
§ 13.7	范德瓦耳斯(van der Waals)力	302
习题十三		304
第十四章 电磁场与电磁作用		306
§ 14.1	电磁场的正则量子化 光子	306
§ 14.2	光子数确定的状态	311
§ 14.3	真空态与真空涨落的可观察效应	315
§ 14.4	相干态 激光 光场的压缩态	319
§ 14.5	电磁作用与规范不变性	322
§ 14.6	阿哈罗诺夫-玻姆(AB)效应	325
习题十四		328
第十五章 跃迁问题		329
§ 15.1	跃迁过程的描述与跃迁振幅	329
§ 15.2	跃迁的微扰论	330
§ 15.3	一级电磁跃迁 光的辐射和吸收 黑体辐射和激光的产生	335

§ 15.4	光电效应	340
§ 15.5	电偶极跃迁 磁偶极跃迁 电四极跃迁 电磁跃迁的多极分类	344
§ 15.6	色散 能量时间测不准关系	354
§ 15.7	时间反演对称性 倒易定理	357
	习题十五	361
第十六章	相对论量子力学	363
§ 16.1	克莱因-戈登方程 核力程与介子质量	363
§ 16.2	狄拉克方程	365
§ 16.3	狄拉克方程在洛伦兹变换下的不变性 $\frac{1}{2}$ 自旋	369
§ 16.4	平面波解 负能量态 空穴和反粒子	375
§ 16.5	中心场中的运动 氢原子	378
§ 16.6	狄拉克方程的二次形式 电子在平面电磁波中和在均匀恒定 磁场中的运动	388
§ 16.7	非相对论近似 自旋磁矩与自旋轨道耦合能	392
§ 16.8	定义在类空超曲面上的态 量子力学的多时形式	395
	习题十六	397
第十七章	形式理论	399
§ 17.1	李普曼-许温格方程 入态和出态 S 矩阵和 T 矩阵	399
§ 17.2	三体问题 法捷耶夫方程 少体问题概述	406
§ 17.3	盖尔曼-骆定理	409
§ 17.4	微扰展开	413
§ 17.5	戈德斯通图与戈德斯通定理 相连展开	418
§ 17.6	哈特里-福克方法与布鲁克勒方法	422
	习题十七	425
第十八章	量子力学的拉格朗日形式	426
§ 18.1	许温格的量子作用量原理	426
§ 18.2	费恩曼的路径积分	430
§ 18.3	受迫振动	432
§ 18.4	复平面上的解析函数空间与态空间 复平面上的路径积分	438
§ 18.5	变频振子的受迫振动	444
	习题十八	448
第十九章	系综与量子统计	450

§ 19.1 纯系综与混合系综 密度算符和冯·诺伊曼方程	450
§ 19.2 $\frac{1}{2}$ 自旋系统的极化	452
§ 19.3 稳态系综与正则系综	454
§ 19.4 开放系统 约化密度算符 对偶定理和主方程	455
§ 19.5 信息量及其守恒 熵增加原理	459
习题十九	465
第二十章 量子力学与客观世界	466
§ 20.1 统计解释与由此产生的问题	466
§ 20.2 测量与波包编缩 量子力学的多世界解释	467
§ 20.3 爱因斯坦可分隔原则与贝尔不等式 量子力学不可分隔预言的 实验证实	471
§ 20.4 态的远程传递与量子通讯 态不可克隆定理 统计可分隔性与 超光速通讯不可能	476
§ 20.5 隐变量理论的启迪	479
§ 20.6 客观性 完备性及其他	483
习题二十	484
附录	486
一、厄米多项式	486
二、广义拉盖尔多项式	488
三、勒让德多项式与球谐函数	490
四、贝塞尔函数	497
五、合流超比函数	508
六、 δ 函数	513
七、CG 系数	516
八、伯努利多项式与伯努利数 欧拉求和公式	525
基本物理常数	532

第一章 历史背景和基本实验事实

§ 1.1 经典物理学的成熟与危机

伴随文艺复兴和产业革命,物理学在数百年间得到持续发展.到 19 世纪末,它的各分支都已相当成熟,建立起了系统的理论,在应用中发挥越来越大的作用.如力学已从牛顿(Newton)三定律发展出一套分析力学,不仅具有完美的形式,而且更便于深刻分析和解决实际问题.关于存在海王星的预言及其被证实,使分析力学的正确性和指导能力不容置疑;至于在工程上的应用更不胜数.电磁学也从零星的知识中总结出了一套完备的麦克斯韦(Maxwell)方程.正是根据它,预言了电磁波的存在,奠定了电讯工程的基础.声学统一于力学,光学统一于电磁学,使人们对自然界达到更深刻的认识.热学方面也建立了热力学的系统理论.统计力学则进一步把对热现象的认识奠定在微观元过程的基础上.一切显得如此和谐美满,以致于给一些人以错觉,似乎物理学已发展到了尽头,剩下的问题只是如何应用了.

后来的实践证明,这种科学发展有尽头的观点是错误的.在 19 世纪末成熟了的只是经典物理学.并且就在这成熟的过程中孕育了“物理学的危机”,它导致 20 世纪初立即开始的“物理学的革命”.其结果是产生了以量子论和相对论为柱石的现代物理学.它是经典物理学的发展,并将后者作为极限情形包含于自身,但却不是后者的简单延续,而且应当说是在辩证意义下对后者的否定.正是“于无声处听惊雷.”

§ 1.2 光的量子性

光的量子性主要是通过对黑体辐射、光电效应和康普顿效应等的分析一步步认识的,前两方面的实验现象就发现于 19 世纪中后期.

1. 黑体辐射 实验得到的黑体辐射强度随波长的分布与由经典物理严格算得的分布不符,且在短波方面是有尖锐矛盾的(见图 1.1).这就肯定经典物理有问

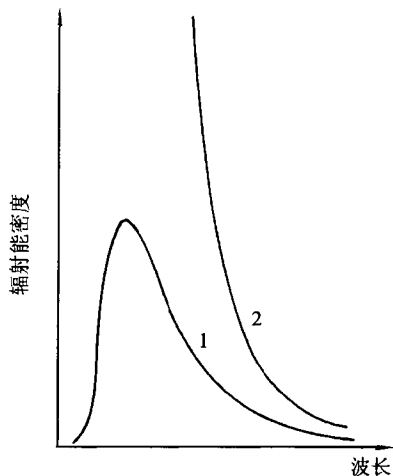


图 1.1 黑体辐射强度随波长的分布

1. 实验曲线; 2. 经典理论
(瑞利-金斯)曲线

题. 一切在经典物理范围内解释黑体辐射现象的尝试都归于失败, 终于迫使普朗克^①在 1900 年提出辐射的量子论: 频率为 ν 的光能量只能以 $h\nu$ 为单位变化, 其中 h 是一个常数, 后来叫作普朗克常数. 按这个假设, 再用统计方法计算黑体辐射的能量分布, 就能得到与实验完全一致的结果. 普朗克常数的实验值为 $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s} = 6.626 \times 10^{-27} \text{erg} \cdot \text{s}$, 它是量子论的基本常数. 有时也用 $\hbar = \frac{h}{2\pi}$. 光的能量单位与频率 ν 或角频率 $\omega = 2\pi\nu$ 的关系为

$$E = h\nu = \hbar\omega. \quad (1.1)$$

2. 光电效应 当时实验发现光电效应有下述规律: (1) 每一物质有一临界频率 ν_0 , 只有频率大于 ν_0 的光才能在其上引起光电效应. (2) 光的强度不影响光电子能量却影响光

电子流强, 越强的光产生的光电子越多. (3) 只要频率超过临界频率, 不论多弱的光一照到物质上立即产生光电子. 这三条规律在经典物理看来是难以理解的. 1905 年爱因斯坦指出^②, 只要假定光的能量是按(1.1)量子化的, 就能自然地理解它们. 实际上设将电子从物质中拉出来需作功 W (逸出功), 则按量子论, 由能量守恒知, 光电子动能为

$$T = h\nu - W. \quad (1.2)$$

动能最小为零, 故有临界频率 $\nu_0 = W/h$. 由(1.2)还可看出, 光电子的动能只取决于光的频率 ν 和电子的逸出功 W , 而与光强无关. 后来的实验定量地证实了(1.2).

爱因斯坦明确提出光量子概念, 指出光是由光量子组成的. 光量子是单位光能 $h\nu$ 的负荷者, 是光的不可分割的单位, 只能整个地一下子被吸收或放出. 这在量子论的发展中是重要的一步. 按这一概念, 光越强, 所含光量子越多, 因而能打出更多光电子. 由于光量子是整个地一下子被吸收的, 因此光一到就能立刻产生光电子. 光的量子论使光电效应的三条规律简直变得直观了. 光量子后来简称光子.

3. 康普顿效应 到 1922 年, 康普顿等通过对光子与自由电子散射的实验研

① M. Planck, *Verh. Deutsch. Phys., Ges.* 2(1900) 202.

② A. Einstein, *Ann. der. Phys.*, 17(1905) 132.

究弄清楚了下述事实^①:光子不仅有能量(1.1),而且还有动量

$$p = \hbar k, \quad (1.3)$$

其中 k 为光波的波矢量,它指向光波传播的方向,大小为波数 $\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c}$ 的 2π 倍:

$$k = 2\pi\tilde{\nu} = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi\nu}{c} = \frac{\omega}{c}, \quad (1.4)$$

λ 为光的波长;散射中光子与电子的总能量和总动量都守恒,就像力学中两个粒子的弹性散射一样.这里光子俨然是一种粒子,光则由它们组成.然而衍射实验早已肯定光是波动,(1.1)和(1.3)右端出现的也是表征波动的量.即我们面临一种既有粒子性又有波动性的东西.这种波粒二象性又是经典物理无法理解的.

§ 1.3 物质的量子性

量子性就是动力学变量不连续的特性.实验表明,它不局限于光,也不局限于能量,它是微观世界的普遍特性.连续不过是不连续在特殊情形中的极限.普朗克在发现光的量子性的同时,也发现了辐射和吸收光的振子的量子性:频率为 ν 的振子,能量也只能以 $h\nu$ 为单位变化.下面是物质量子性的一些其他例子.

1. 声的量子性与固体比热问题 将普朗克关系(1.1)推广到弹性振动和声波,用声的量子性和声子概念来研究固体振动是很自然的.爱因斯坦^②和德拜^③用量子概念计算了固体中振动能量随频率的分布,由此解释了固体比热在低温下趋于零的特征.声子概念在现代固体物理中得到广泛应用.

2. 原子光谱与原子能量的量子化 19世纪对原子光谱作了大量研究,把它分成了许多线系.最后,里兹(Ritz)总结出光谱项组合规则:谱线的波数

$$\tilde{\nu} = T(n) - T(n'), \quad (1.5)$$

其中 $T(n)$ 是整数变量 n 的函数,称为光谱项.这个规则是普适的,对于不同原子,只是光谱项 $T(n)$ 不同.这个规则如此简单明了而又准确,必定反映原子的某种内在本质.然而经典物理却未能对它作出解释.

1913年玻尔指出^④,如果原子能量是量子化的,那么就能理解组合规则(1.5).他假设:(1)原子能量不连续,它们对应着一组不连续的运动状态,称为定态,带电粒子在其中不辐射;(2)辐射和吸收光的机制是从一个定态到另一定态的跃迁.玻尔假设中提出了两个重要概念:定态和跃迁,它们在迄今的量子论中一直起着重要

① A. H. Compton, *Phys. Rev.*, **21**(1923)483.

② A. Einstein, *Ann. der Phys.*, **22**(1907)180, 800.

③ P. Debye, *Ann. der Phys.*, **39**(1912)789.

④ N. Bohr, *Phil. Mag.*, **26**(1913)1, 476, 875.

作用，按玻尔假设和光的量子性，由能量守恒立即得到，跃迁中发出的光子能量必为

$$h\nu = E_{n'} - E_n, \quad (1.6)$$

$E_{n'}$ 和 E_n 分别为跃迁前和跃迁后原子定态的能量，由此得原子光谱线的波数

$$\tilde{\nu} = \frac{\nu}{c} = \frac{1}{hc}(E_{n'} - E_n) = T(n) - T(n'),$$

其中

$$T(n) = -\frac{E_n}{hc}, \quad (1.7)$$

就这样轻而易举地解释了组合规则(1.5)。与此同时，(1.7)还给出了原子的量子化能量 E_n 与光谱项 $T(n)$ 的简单关系，可由实验检验。1914年夫兰克与赫兹作了电子与原子非弹性碰撞的实验^①。通过观察电子与原子的能量交换，直接证实了原子能量的量子性，也证实了关系(1.7)。

3. 原子的有核模型与原子的稳定性问题 卢瑟福用 α 粒子在原子上的散射实验查明^②，原子中正电荷集中在一个很小的核上，负电荷则由电子携带绕核运动，这就是原子的有核模型。在经典物理看来，原子中电子作曲线运动，必然不断辐射出能量，最后落到核上。因此这种原子不能稳定。这显然与存在稳定原子的事实尖锐矛盾。原子能量量子化的概念是解决这一困难的钥匙。不连续能量可以有一个最小值，处在相应定态(基态)中的原子不能再降低能量，因此不会掉进原子核。认识有核原子的关键是建立量子化原子的新力学。

4. 其他力学量的量子化 通过对分子转动光谱的研究发现，轨道角动量的大小是不连续的。通过原子在磁场中性质的研究发现，磁矩和角动量在给定方向上的投影也是不连续的……。量子化是微观世界的一个普遍特性，新力学必须对此予以解释。

§ 1.4 旧量子论

作为建立新力学的第一个尝试，玻尔于1913年提出了关于原子的量子理论。这是一个对经典力学作一些修改而成的理论。它认为：原子中电子沿一定轨道运行，服从经典力学的运动方程，就像行星绕日运动一样；定态和能量的不连续性则由量子化条件来定，它从所有的轨道中选出那些被允许的轨道来。玻尔的条件很简单：角动量的大小 L 只允许为 $\hbar$ 的整数倍：

① J. Franck and G. Hertz, *Verh. Deutsch. Phys. Ges.*, **16**(1914) 457, 517.

② E. Rutherford, *Phil. Mag.*, **21**(1911)669.