

量子力学

时庆云 编著

北京理工大学出版社

378096

0413.1
S56

量子力学

时庆云编著



北京理工大学出版社

(京)新登字149号

内 容 简 介

本书系统地讲述量子力学的基本概念、原理和基本方法,前五章主要讨论基本规律,从测量理论出发,通过分析基本实验事实,分别概括出几条原理,且根据这些原理处理了几个典型的单粒子问题;第六章研究量子力学的普遍形式,并讨论了物质运动的时空特性、测量和对称性之间的联系;第七、八、九章介绍微扰论、跃迁和散射问题;第十、十一章讨论自旋和全同粒子;最后一章简述相对论波动方程。各章除既定的基本内容外,穿插选入一些新兴课题,反映了量子力学近年来的发展。

本书取材精练,深入浅出,分析问题思路清晰,数学处理繁简适宜,具有易于理解和接受的特点,可作为物理专业和有关专业的教材或参考书,也可供研究生、教师和科研工作者参考。

量 子 力 学

时庆云编著

责任编辑 郑锡琰

*

北京理工大学出版社

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

开封新新印刷厂印刷

850×1168毫米 32开本 15.5印张 390.4千字

1993年11月第一版 1993年11月第一次印刷

ISBN 7-81013-893-6/O·99

印数:1—3000册 定价:11.70元

序 言

量子力学是物理专业一门重要而难度较高的课程,由于其物理概念抽象,数学运算复杂,大学生们学习这门课程的成绩并不尽如人意;因之,尽管中外文文献中不乏优秀的量子力学专著或教程,一本切合实用的量子力学教程的出版仍然是值得欢迎的。

一部优秀的量子力学教程,在体系的安排和内容的取舍上,理应摆正以下几方面的关系:首先,应该注意,在理论物理中高等数学的运用日益广泛而深奥,但归根到底,数学只是一种表达和演算工具,不能将物理概念和物理内容淹没在复杂的数学形式之中;其次,虽然大学生们学习量子力学的主要目的在于应用,但不系统地掌握其基本原理是很难用之于解决具体的物理问题的,反之不通过具体问题的演算又难于吃透量子力学的基本原理,这两个方面是相辅相成的;最后,任一本量子力学教程都不能不介绍像谐振子和氢原子这些在方法论上十分重要的经典问题,但近年来,量子力学无论在基本原理方面还是在应用方面都发展迅速,这些“近代”的课题,一部新出版的量子力学教程也应择要加以介绍。但在有限的篇幅中,要兼顾这几方面的内容并非易事。

时庆云同志根据多年教学经验,编著的这本量子力学教程,在上述各方面进行了认真的考虑。例如,表象理论一向是大学生们难于掌握而又必须掌握的内容,一般教程中将之分散介绍,这更增加了学习的困难,在本书中作者将之汇集为一章,以线性空间概念为基础进行了概括,有助于深化对表象理论的理解;量子力学的一般理论形式建立后,在同一章中紧接着研究对称性的基本内容,以对称性的统一观点,揭示出时间、空间和运动规律的内在联系。作者

这样编排,对概括和深化量子力学规律本质的认识,可能是一种有益的尝试;又如,在阐明正则量子化这种“经典”的量子化方法之后,作者并引用路经积分量子化方法及路径积分这种有力的计算工具;对量子力学基础这一重要而饶有兴趣的问题,作者除论述了广为流传的哥本哈根学派的观点外,还介绍了近年来对隐参数等的研究简况.细心的读者还可以在本教程中发现有更多的这类例子.本书文笔流畅,说理清晰,习题选择深浅适宜,数学处理简繁得当.这本量子力学教程的出版,将会使物理专业的大学生们得益匪浅.

赵祖森

1992. 4. 郑州

前 言

人类对物质世界的认识,深入到原子层次以后,揭示出了以普朗克 (*M. Planck*) 常数 h 表征的量子现象,并发现这是一种普遍存在的自然现象. 廿世纪头四分之一时间里,经过对这种新现象的仔细研究,看出了经典物理的局限性,从而建立了适用范围远比经典力学广泛的量子力学. 量子力学规律实质上是支配物质世界的普遍规律. 但是,由于在一般宏观现象中量子效应并不显著,经典力学作为量子力学的很好近似,依然适用. 在这种意义上,通常称量子力学是反映微观物质世界运动规律的理论.

量子力学经过七十余年的发展,已深入到物理学的各个分支,广泛应用于原子、分子、原子核、“基本粒子”以及凝聚态物理等方面,成为现代物理学的理论基础和支柱. 并且,它越出传统的物理学,渗透到化学、生物学等之中,形成了量子化学、量子生物学等新兴学科. 而现代技术的应用和发展,许多方面都与量子力学相关,有些就是直接由量子力学理论衍生和开拓出来的. 因此,在当代科学技术中,不仅物理学的各个领域,其他一些基础科学和许多工程技术学科,都把量子力学作为追踪科学技术发展的理论基础.

实际上,量子力学的基本规律并不复杂. 对初学者来说,克服日常生活经验和经典力学知识形成的心里障碍,启迪逻辑思维,以及运用以往不太熟悉的数学语言,大致是面临的主要问题. 从教学观点出发,我们对取材、理论体系安排和阐述问题的方式都作了一些尝试. 例如,本书比较深入地讨论了测量问题. 根据多数人公认的测量理论,分析电子衍射、偏振等实验的结果,引出基本概念和原理,试图使初学者摆脱经典物理图象的纠缠,易于准确理解这些

新概念和接受相应的数学表述,从而缓解学习难度.再如,基于测量理论,讨论量子力学的一般理论形式,并和对称性理论安排在同一章,便于揭示物质运动和时空特性的内在联系,有利于深化对测量结果、运动规律和描述形式间统一性的认识.本书注重物理实质的分析,力求思路清晰,推理严谨,数学处理简明,但尽可能贴近实际应用.此外,鉴于量子力学的理论和应用发展一直比较活跃,且它的每一进展,总是对近代科学或技术产生巨大而深远的影响.本书选择路径积分,相干态,磁单极,几何相位等有重大意义的课题,进行了简明的讨论,并且适当地提及有关应用方面的信息,借以反映量子力学发展的新成就.我们还扼要介绍了隐变数理论的发展现状,但没有涉及有关量子力学基本问题的那些况且已久的争议.

本书源于作者在郑州大学所编“量子力学”讲义,这次出版对原讲义作了重大修改和重写.全书分十二章,取材比较广泛.各章除基本内容外,尚列入了一些比较深入的课题.习题数量也选得偏多.在编写过程中,作者充分考虑了基本内容和基本方法的前后衔接.选用本书作本科生教材时,教师可根据实际情况,决定内容的取舍,学时较少时,第六、十二两章也可全部不讲,不会因为前后衔接带来什么不便.

感谢赵祖森先生为本书作序,承蒙赵先生审阅原讲义,对修订本书提出一系列宝贵意见.陈允鸿、翁永刚、时万忠、胡国驹、胡行、李玉晓等老师,先后和我一同教过量子力学这门课.他们分别对原讲义的有关内容,习题选取或解答,进行过有益的讨论或工作;本书修订出版过程中,申智灵、戴耀东、员玉娟、李玉晓、时懂宇等同志给予我极大的帮助;苏金凤老师为本书绘制了全部图形,作者在此一并致谢.由于作者水平有限,错误和欠妥之处在所必然,恳请批评指正.

目 录

序言	(1)
前言	(1)
第一章 物质的波粒二象性	(1)
§ 1.1 量子力学产生的背景	(1)
一. 黑体辐射的困难	(1)
二. 光电效应的困难	(2)
三. 原子的线状光谱规律及原子的稳定性	(3)
§ 1.2 光的波粒二象性	(4)
§ 1.3 微粒的波粒二象性	(10)
一. 玻尔的量子论	(10)
二. 德布罗意假设	(11)
习题	(15)
第二章 微观粒子的状态描述	(18)
§ 2.1 经典描述的失效 不确定关系	(18)
§ 2.2 量子态的测量及其特性	(22)
一. 态的测量	(22)
二. 量子态的特性	(26)
§ 2.3 态的叠加原理	(29)
§ 2.4 波函数	(32)
§ 2.5 坐标平均值和动量平均值	(37)
习题	(41)
第三章 力学量的算符表示	(44)
§ 3.1 算符的一般性质	(44)
一. 算符定义 单位算符和相等算符	(44)
二. 算符相加	(45)

三. 算符的乘积和对易关系	(45)
四. 算符函数	(46)
五. 线性算符	(46)
六. 内积 算符的厄米共轭	(47)
七. 厄米算符和么正算符	(49)
八. 算符的本征方程	(50)
§ 3.2 力学量平均值和几率分布的一般公式	(52)
一. 力学量平均值的一般公式	(53)
二. 几率分布的一般公式	(55)
§ 3.3 力学量的可能取值与本征态	(58)
§ 3.4 力学量同时有确定值的条件	(62)
一. 力学量同时有确定值的条件	(62)
二. 不确定关系的一般公式	(64)
§ 3.5 力学量算符化的一般规则	(66)
一. 算符化规则	(66)
二. 坐标和动量 连续谱归一化	(68)
三. 角动量	(76)
习题	(81)
第四章 运动方程	(87)
§ 4.1 薛定谔方程	(87)
一. 薛定谔方程的提出	(87)
二. 几率守恒	(90)
§ 4.2 力学量随时间的变化 守恒定律	(92)
一. 力学量平均值随时间的变化 守恒量	(92)
二. 力学量随时间的变化 海森伯方程	(95)
§ 4.3 定态问题	(101)
一. 初值问题	(101)
二. 定态 定态薛定谔方程	(103)

§ 4.4	一维方形势	(106)
一.	无限深方势阱	(106)
二.	有限势阱	(109)
三.	隧道效应	(113)
§ 4.5	一维简谐振子	(118)
§ 4.6	重力场中的粒子	(126)
	习题	(130)
第五章	单粒子问题	(136)
§ 5.1	氢原子和类氢离子	(136)
一.	中心力场	(136)
二.	库仑场	(138)
三.	氢原子的能级和波函数	(143)
§ 5.2	粒子在电磁场中的运动	(149)
一.	有电磁场时的薛定谔方程	(149)
二.	正常蔡曼效应	(151)
三.	均匀恒定磁场中带电粒子的运动	(154)
§ 5.3	规范不变性	(157)
一.	规范变换	(157)
二.	阿哈仑诺夫——玻姆效应	(159)
三.	磁单极子	(160)
§ 5.4	分子的振动与转动	(162)
§ 5.5	周期场中粒子的运动	(168)
一.	一维周期场	(168)
二.	三维周期场	(171)
§ 5.6	氘核的结构	(176)
	习题	(179)
第六章	量子力学的普遍形式	(183)
§ 6.1	态矢量空间	(183)

一. 右矢空间	(183)
二. 左矢空间 内积	(185)
三. 算符	(186)
§ 6.2 矩阵表示	(188)
一. 基矢量 表象	(188)
二. 量子态的矩阵表示	(191)
三. 算符的矩阵表示	(192)
四. 运动方程的矩阵表示	(194)
§ 6.3 表象变换	(197)
一. 变换算符	(197)
二. 态矢量和算符的变换	(199)
三. 算符对角化	(200)
四. 幺正等价的力学量	(201)
§ 6.4 粒子数表象	(202)
§ 6.5 谐振子态的时间演变 相干态	(205)
一. 谐振子态随时间的变化	(205)
二. 谐振子相干态	(207)
§ 6.6 对称性和守恒定律	(211)
一. 对称变换	(212)
二. 对称与守恒	(214)
三. 对称与简并	(216)
§ 6.7 连续时空变换	(218)
一. 空间均匀性 动量守恒	(218)
二. 时间均匀性 能量守恒	(222)
三. 空间各向同性 角动量守恒	(224)
§ 6.8 空间反射和时间反演	(226)
一. 空间反射 宇称守恒和破坏	(226)
二. 时间反演	(232)

习题	(235)
第七章 定态微扰理论	(239)
§ 7.1 非简并定态微扰论	(239)
§ 7.2 简并定态微扰理论	(248)
一. 各级微扰方程	(248)
二. 零级近似态矢量与一级近似能量	(249)
三. 二级近似	(252)
§ 7.3 氢原子的一级斯塔克效应	(256)
§ 7.4 氨量子放大器	(260)
§ 7.5 苯分子的结合能	(263)
习题	(267)
第八章 含时微扰理论	(271)
§ 8.1 相互作用绘景 含时微扰级数	(271)
一. 相互作用绘景	(271)
二. 含时微扰级数	(273)
§ 8.2 跃迁几率	(274)
一. 跃迁几率幅方程	(274)
二. 跃迁几率公式	(276)
三. 常微扰	(277)
四. 谐振微扰	(280)
五. 非周期含时微扰	(281)
§ 8.3 光的受激发射和吸收	(282)
一. 光的受激发射和吸收	(282)
二. 电偶极跃迁	(283)
三. 磁偶极和电四极跃迁	(285)
四. 选择定则	(286)
§ 8.4 自发发射	(288)
一. 爱因斯坦辐射理论	(289)

二. 导出自发跃迁几率的另一种方法.....	(291)
三. 激光原理.....	(295)
§ 8.5 寝渐绝热变化 能级和衰变宽度	(297)
一. 寝渐绝热变化.....	(298)
二. 能级和衰变宽度.....	(299)
三. 能量不确定关系.....	(303)
§ 8.6 几何相位	(304)
习题.....	(308)
第九章 散射问题.....	(310)
§ 9.1 散射问题的一般描述	(310)
一. 散射截面.....	(310)
二. 李普曼——许温格方程.....	(312)
§ 9.2 格林函数和玻恩近似	(313)
一. 格林函数.....	(313)
二. 玻恩近似.....	(318)
§ 9.3 分波法	(319)
一. 相移和散射截面.....	(319)
二. 相移的确定和近似条件.....	(323)
三. 光学定理.....	(326)
§ 9.4 低能散射和束缚态	(327)
一. 球方势.....	(327)
二. 零能量散射和束缚态.....	(329)
三. 共振散射.....	(331)
§ 9.5 时间有关的散射 跃迁方法	(335)
一. 时间有关的散射.....	(335)
二. 跃迁方法.....	(336)
§ 9.6 传播函数及其路径积分	(337)
一. 传播函数的路径积分表示.....	(338)

二. 路径积分量子化	(342)
三. 准经典近似	(343)
习题	(346)
第十章 自旋	(349)
§ 10.1 角动量的一般表述	(349)
一. J^2 算符和阶梯算符 $J_{\pm}$	(350)
二. J_x, J_y 的本征值和本征态	(352)
§ 10.2 角动量的矩阵表示	(354)
一. 角动量算符的矩阵元	(354)
二. 转动算符的矩阵表示	(356)
§ 10.3 电子自旋	(358)
一. 史特恩——盖拉赫实验	(358)
二. 电子的自旋算符和自旋态矢量	(360)
三. 电子的波函数	(363)
§ 10.4 泡利方程	(364)
一. 自旋 $1/2$ 粒子的哈密顿量	(364)
二. 泡利方程	(367)
§ 10.5 两个角动量的耦合	(370)
一. 总角动量本征值	(370)
二. 总角动量的本征态	(374)
§ 10.6 原子光谱的精细结构	(377)
一. 碱金属光谱的精细结构	(378)
二. 氢原子光谱的精细结构	(381)
§ 10.7 原子光谱在外磁场中的分裂	(383)
一. 正常蔡曼效应	(384)
二. 反常蔡曼效应	(385)
§ 10.8 磁共振	(387)
习题	(389)

第十一章 全同粒子	(394)
§ 11.1 全同粒子体系 置换对称性	(394)
一. 全同粒子体系的态矢量和置换算符	(394)
二. 全同性原理	(397)
三. 泡利原理	(399)
§ 11.2 氦原子 交换能	(400)
一. 两电子体系的波函数	(401)
二. 氦原子的能级和波函数	(403)
三. 交换能	(405)
§ 11.3 氢分子	(407)
一. 变分法	(408)
二. 氢分子	(410)
§ 11.4 自洽场	(416)
§ 11.5 全同粒子散射	(421)
§ 11.6 二次量子化方法	(423)
一. 产生和湮灭算符 玻色子体系	(424)
二. 坐标表象的波函数 场算符	(425)
三. 可观察量的场算符表示	(428)
四. 费米子体系	(431)
§ 11.7 自旋相关测量和贝尔不等式	(432)
一. 自旋单态的相关性	(432)
二. 爱因斯坦定域性原理和贝尔不等式	(434)
三. 量子力学和贝尔不等式	(437)
习题	(439)
第十二章 相对论波动方程	(442)
§ 12.1 罗伦兹变换	(442)
一. 齐次罗伦兹变换	(442)
二. 无穷小变换	(444)

§ 12.2	克莱因——戈登方程	(446)
一.	克莱因——戈登方程	(446)
二.	几率流密度, 负几率问题	(447)
三.	库仑场中的束缚态	(449)
§ 12.3	狄拉克方程	(451)
一.	狄拉克方程的导出	(451)
二.	狄拉克矩阵	(452)
三.	电子自旋	(454)
四.	几率和几率流的戈登分解	(455)
§ 12.4	狄拉克方程的平面波解	(457)
一.	动量、能量的本征态	(457)
二.	螺旋性态	(459)
三.	负能态和正电子	(461)
§ 12.5	电磁场中的狄拉克方程	(462)
一.	波函数的大分量和小分量	(463)
二.	F——W 变换	(464)
三.	自旋磁矩和轨道——自旋耦合能	(466)
§ 12.6	势场中的狄拉克方程	(467)
一.	势场中的哈密顿量及其本征态	(467)
二.	库仑场中径向方程的精确解	(471)
§ 12.7	狄拉克方程的对称性	(476)
一.	正常正时罗伦兹变换	(476)
二.	空间反射	(478)
三.	时间反演	(479)
四.	电荷共轭变换	(480)
	习题	(481)

第一章 物质的波粒二象性

§ 1.1 量子力学产生的背景

十九世纪末叶,经典物理学理论发展到了相当完善的地步,当时一些科学家曾认为:到此为止,我们已建立起物理学尽善尽美的完整理论,留给后人的工作,只是利用这些理论解决各种具体问题了.然而,由于实验技术的提高,人们从实验中发现了一系列新现象,在说明这些新现象时,经典理论遇到不可克服的困难,形成了量子力学诞生前夕的历史背景.

一、黑体辐射的困难

热辐射和光辐射是不同波长范围内的电磁波,一般的情况下,所有的物体都发射出热辐射,对于外来的辐射,物体有吸收和反射作用,如果一个物体能够全部吸收而不反射投射于其上的辐射,就称该物体为绝对黑体,简称黑体.自然界中不存在黑体,通常以小孔空腔容器作为黑体的模拟,从小孔发射出的辐射可以视为黑体的辐射.利用小孔空腔,可以测定黑体的辐射能量密度,当空腔与内部的辐射场处于热平衡时,辐射能量密度 ρ_ν 随频率变化的实验曲线如图 1—1 所示.实验指出,空腔单位体积中,频率在 $\nu + \nu d\nu$ 间的辐射能量 $\rho_\nu d\nu$, 只与频率及黑体的温度 T 有关,而与空腔的形状及组成物质

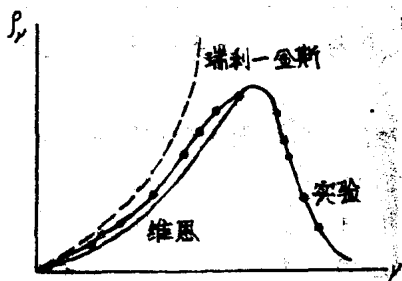


图 1—1