

张永德/主编

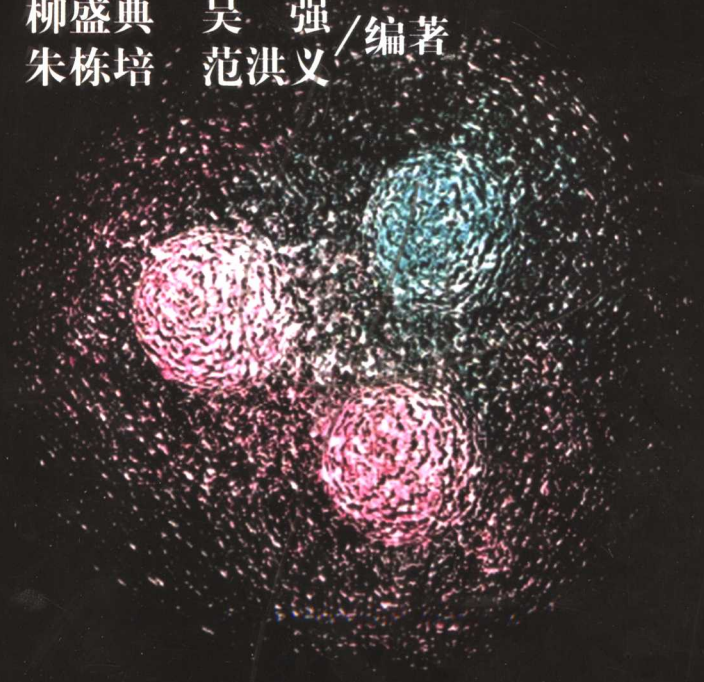
物理学大题典

量子力学

6

A Grand Dictionary
of Physics
Problems And Solutions

张永德 柳盛典 吴强/编著
刘乃乐 朱栋培 范洪义



科学出版社

www.sciencep.com

中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

《物理学大题典》是一套大型工具性、综合性物理题解丛书。丛书内容涵盖综合性大学全部本科物理学内容：从普通物理的力学、热学、光学、电学、近代物理到“四大力学”，以及原子核物理、粒子物理、凝聚态物理、等离子体物理、天体物理、激光物理、量子光学、量子信息等。内容新颖、注重物理、注重学科交叉、注重与科研结合。

《量子力学》卷包括量子力学基础、一维定态问题、中心力场束缚态问题、轨道及自旋角动量、带电粒子在电磁场中的运动、定态近似问题、散射、含时近似方法与跃迁、少体问题以及量子信息等内容。

本丛书可做为物理类本科生的学习辅导用书、研究生的入学考试参考书和各类高校物理教师的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

量子力学/张永德等编著. —北京：科学出版社；合肥：中国科学技术大学出版社，2005

(物理学大题典⑥/张永德主编)

ISBN 7-03-014510-0

I.量… II.张… III. 量子力学-解题 IV.O2109

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 108824 号

策划编辑：胡升华 / 文案编辑：贾瑞娜 / 责任校对：赵桂芬

封面设计：张 放 / 责任印制：钱玉芬

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>

中国科学技术大学出版社

安徽省合肥市金寨路 96 号

邮政编码：230026

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005 年 9 月第 一 版 开本：787×1092 1/16

2005 年 9 月第一次印刷 印张：48 1/4

印数：1~5 000 字数：1 095 000

定价：72.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换〈科印〉)

《物理学大题典》编委会

主 编 张永德

编 委 (按姓氏拼音字母为序)

白贵儒	陈银华	程稼夫	范洪义	范扬眉	宫竹芳	顾恩普
郭光灿	胡友秋	金怀诚	李泽华	林鸿生	刘金英	刘乃乐
柳盛典	强元荣	王韶舜	吴 强	轩植华	杨保忠	杨德田
尤峻汉	张家铝	张鹏飞	张永德	章世玲	赵叔平	郑久仁
周又元	周子舫	朱栋培	朱俊杰			

前 言

物理学, 由于它在自然科学中所具有的主导作用, 在人类文明史中, 特别是在人类物质文明史中, 占据着极其重要的地位. 经典物理学的诞生和发展曾经直接推动了欧洲物质文明的长期飞跃. 20 世纪初诞生并蓬勃发展起来的近代物理学, 又造就了上个世纪物质文明的辉煌. 自 20 世纪末到 21 世纪初的当前时代, 物理学正在以空前的活力, 广阔深入地开创着向化学、生物学、生命科学、材料科学、信息科学和能源科学渗透和应用的新局面. 在本世纪里, 物理学再一次直接推动新一轮物质文明飞跃的伟大进程已经开始.

但是, 发展到目前的物理学宽广深厚, 累积的知识浩瀚无垠. 教授和学习物理学都是一个相当艰苦而漫长的过程. 在这个漫长过程的许多环节中, 做习题是其中必要而又重要的环节. 做习题是巩固所学知识的必要手段, 是深化拓展所学知识的重要练习, 是锻炼科学思维的体操. 习题对于教师和学生双方都是重要的.

然而, 和习题有关的事都是很不起眼的事. 在有些人眼中, 求解和编纂练习题是全部教学活动中相当次要的环节. 习题集也确实是有著作中“最低层”的, 是大约只有“傻子”们才肯做的事, “聪明人”常会找诸如习题集不应当出之类的理由, 光明正大地规避掉.

但是, 在教授和学习过程中, 只要是需要的, 都是合理的, 也总得有人去做才行. 于是我们编委会的这些人, 本着甘为孺子牛的精神, 平时在科研和教学中一道题一道题地积累, 现在又一道题一道题地编审, 花费了大量时间做着这种不起眼的事. 大家觉得, 这件事终究是教与学双方共同需要的, 也就是有益的. 正如一个城市基础建设中, 不能都去做地面上的摩天大楼和纪念碑等“抢眼球”的事, 也还需要做诸如修建马路、下水道等基础设施的事.

这套《物理学大题典》的前身是中国科学技术大学出版社出版的《美国物理试题与解答》丛书(7 卷). 那套丛书于 20 世纪 80 年代后期由张永德发起并组织完成, 内容包括普通物理的力、热、光、电、近代物理到四大力学的全部基础物理学. 出版时他选择了“中国科学技术大学物理辅导班主编”的署名方式. 自那套丛书出版之后, 虽历经 10 余年, 仍然有不断的需求, 于是就有了现在的这套丛书——《物理学大题典》.

现在这套《物理学大题典》丛书的内容, 除继续涵盖力、热、光、电、近代物理到四大力学全部基础物理学内容之外, 还包括了原子核物理、粒子物理、凝聚态物理、等离子体物理、天体物理、激光物理、量子光学和量子信息物理等内容. 就是说, 追踪不断发展的科学轨迹, 现在这套丛书仍旧大体涵盖了综合性大学全部本科物理课程的内容.

这次重新编审中, 大部分教师仍为原来的, 但也增加了一些新的成员. 这次出版经大家着力重订和大量扩充, 又耗时近两年而成. 总计起来, 这套丛书前后历时近 20 年, 耗费了 30 余位富有科研和教学经验的教授、近 150 位 20 世纪 80 年代和现在的研究生及高年级本科生的巨大辛劳. 丛书确实是大家长期共同劳动的结晶.

《物理学大题典》中包括了大量的美国物理试题. 一般说来, 美国物理试题涉及的数

学并不繁难,但却或多或少具有以下特色:内容新颖,富于“当代感”;思路灵活,涉及面宽广;方法和结论简单而实用,试题往往涉及新兴和边沿交叉学科;不少试题本身似乎显得粗糙但却抓住了物理本质,显得“物理味”很足.纵观这些,我们深切感到,这些题目的集合在一定程度上体现了美国科学文化的个性及思维方式的特色.惟鉴于此,我们不得不惮繁重,集众多人力而不怯,耗漫长岁月而不辍,还是值得的.

至于这次扩充修订所增添的大量题目,也是本着这种精神,摘自大家各自的科研成果,或是来自各人的教学心得,实是点滴聚成.

这里要强调指出,对于学生,确实有一个如何正确使用习题集的问题.有的同学,有习题集也不参考,咬牙硬顶,一个晚上自习时间只做了两道题.这种精神诚应嘉勉,但效率不高,也容易挫伤学习积极性,不利于培养学习兴趣;也有的同学,逮到合适解答提笔就抄,这样做是浮躁的、不踏实的.这两种学习方法都不可取.我们认为,正确使用习题集是一个“三步曲”过程:遇到一道题,先自己想一想,想出来了自己做最好;如果认真想了一些时间还想不出来,就不要老想了,不妨翻开习题集找答案,看懂之后,合上书自己把题目做出来;最后一步,要是参考习题集做出来的,就用一两分钟时间分析解剖一下,找找自己存在的不足,今后注意.如此“三步曲”下来,就既有效率又踏实了.本来,效率和踏实是一对矛盾,在这类“治学小道”之下,它俩就统一起来了.总之,正确使用之下的习题集肯定能够成为学生们有用的“爬山”工具.

丛书这次重订扩充工作是在科学出版社胡升华博士的倡议和支持下进行的,没有他的推动,这套丛书面世是不可能的.同时,在这次重订扩充工作里,我们得到了中国科学技术大学的部分教学资助,以及编委会中郭光灿和周又元两位院士和刘万东教授的支持.对于这些宝贵的支持,谨表示深切感谢.

《丛书》的最子力学卷共计 11 章,题目总数由原来 380 道增扩为 707 道.题目来源是一些国际著名大学(包括哥伦比亚大学、加州大学伯克利分校、麻省理工学院、威斯康星大学、芝加哥大学、普林斯顿大学、纽约州立大学布法罗分校)的试题和习题, CUSPEA 考试、丁肇中考试试题,一些量子力学学习题集(作者分别是 H. Mavromatis, G. L. Squires, D ter Haar, 康斯坦丁内斯库等, В. М. Галицкий 等, 以及钱伯初等), 部分量子力学教材(朗道、张永德、曾谨言等), 另有相当一部分是我们自拟的.

前后近 20 年中,参加本卷解题的人有任勇、戴铁生、萧旭东、周苏闽、王力军、何小东、孟国武、斯其苗、袁卡佳、何广梁、缪凌、康绍强、张洪、陈一新、杨仲侠、宁铂、吴盛俊、周锦东、赵博、赵梅生、杨洁、张强等.其间也听取过马雷、唐忠、潘建伟、刘乃乐、吴建达等人的意见.为了丛书行文简洁,书中不再另行指出他们姓名.另外,戴铁生、郁司夏、赵博、赵梅生、杨洁、张强、曾树祥和王立志分别承当过部分审校、抄写和计算机输入工作.编写期间曾承俞礼钧教授提供过资料.本卷前 5 章由柳盛典负责编写,后 6 章由吴强负责编写,然后再经交换审阅.全书由张永德统稿并断续地校阅过.

编审者谨识

2005 年 5 月

题 意 要 览

- 1.1 几个常见数值.
- 1.2 基本量的数值估计.
- 1.3 几个重要数值的量级.
- 1.4 几个重要实验的意义.
- 1.5 电子的双缝干涉.
- 1.6 电子、中子、光子的 de Broglie 波长.
- 1.7 原子的稳定性.
- 1.8 光子衰变.
- 1.9 电子偶素的衰变.
- 1.10 光波的反射与折射.
- 1.11 de Broglie 波的相速与群速.
- 1.12 考虑相对论修正后电子的 de Broglie 波长.
- 1.13 de Broglie 波长的计算.
- 1.14 电子显微镜的分辨率.
- 1.15 波函数的归一化.
- 1.16 粒子的径向分布与角分布.
- 1.17 验证不确定性关系.
- 1.18 利用不确定性关系, 估计无限深方势阱中的粒子的基态能量.
- 1.19 波函数的归一化及 $\overline{x^2}$ 、 $\overline{p^2}$ 的计算.
- 1.20 自由粒子动量和动能平均值的计算.
- 1.21 流密度算符.
- 1.22 电子 Young 双缝实验与测量公设.
- 1.23 测量公设例(1).
- 1.24 测量公设例(2).
- 1.25 测量公设例(3).
- 1.26 能量守恒.
- 1.27 一维束缚态无简并.
- 1.28 一维束缚态的性质.
- 1.29 宇称(空间反演)算符.
- 1.30 在 Hamilton 量定态分立谱中动量的平均值恒为零.
- 1.31 广义 Virial 定理.
- 1.32 广义 Hellmann-Feynman 定理.
- 1.33 $[\hat{A}, \hat{B}]_+ = 0$ 时, 在 Hermite 算符 $\hat{A}$ 的分立谱本征态下 $\hat{B}$ 的平均值为零.

- 1.34 $[\hat{H}, \hat{A}]_+ = 0$ 时能量本征态的性质.
- 1.35 算符函数 $\hat{F}^N$ 的展开.
- 1.36 坐标算符本征值谱的讨论.
- 1.37 动量算符本征值谱的讨论.
- 1.38 坐标平移算符的本征值及本征态.
- 1.39 轨道角动量算符 $\hat{L}_z$ 的 Hermite 性条件.
- 1.40 Kubo 恒等式.
- 1.41 压缩算符的转置及 Hermite 共轭算符.
- 1.42 算符 $i\frac{\partial}{\partial r}$ 的转置及 Hermite 共轭算符.
- 1.43 对 Hermite 算符 $\hat{A}, \hat{B}$, 算符 $(\hat{A} + i\hat{B})^2$ Hermite 性的条件.
- 1.44 压缩算符在 x 表象中的表示.
- 1.45 压缩相干态在 x 表象中的表示.
- 1.46 压缩态的另一种形式.
- 1.47 Fourier(积分)变换的性质.
- 1.48 动量空间的 Schrödinger 方程.
- 1.49 $F = \alpha p + \beta x$ 的本征态.
- 1.50 算符 $x + \frac{d}{dx}$ 的本征态.
- 1.51 两反对易算符存在共同本征态的条件.
- 1.52 线性算符在连续谱表象中的矩阵元——积分核.
- 1.53 算符 $\frac{1}{r}$ 和 $\frac{1}{r^2}$ 的积分核.
- 1.54 算符 $\hat{L}$ 的 $\hat{L}^*$, $\hat{L}^T$, $\hat{L}^\dagger$ 的积分核.
- 1.55 已知算符 $\hat{L}$ 积分核的形式, 讨论 $\hat{L}$ 的 Hermite 条件.
- 1.56 两对易算符的积分核之间的关系.
- 1.57 与 $\hat{x}$, $\hat{p}$ 都对易的算符为常数算符.
- 1.58 积分核形如 $F(x, x') = f(x)f^*(x')$ 算符的本征值、本征态.
- 1.59 若 $\hat{\pi}\psi(x) = \psi(-x)$ 则 $\hat{\pi}\varphi(p) = \varphi(-p)$.
- 1.60 算符函数在连续谱表象中的矩阵元——积分核.
- 1.61 投影定理.
- 1.62 投影算子.
- 1.63 投影算子的积分核.
- 1.64 投影算子的形式.
- 1.65 力学量平均值对时间的二次微商.
- 1.66 坐标算符平均值对时间的二次微商.
- 1.67 算符整函数与 $\hat{x}, \hat{p}$ 的对易关系.
- 1.68 Baker-Hausdorff 公式.

- 1.69 Glauber 公式.
- 1.70 对易关系的一个重要结果.
- 1.71 矢量算符的点乘积、叉乘积与标量算符的对易关系.
- 1.72 轨道角动量算符与整函数算符的对易子.
- 1.73 轨道角动量与动量算符的两个代数关系.
- 1.74 矢量算符与角动量算符的一般代数关系.
- 1.75 $\hat{L}^2, \hat{p}^2$ 的代数结果.
- 1.76 $\hat{L}, \hat{r}, \hat{p}$ 的混合积与二重叉积.
- 1.77 关于 $\hat{L}, \hat{p}$ 的几个代数关系.
- 1.78 Schmidt 正交化方案.
- 1.79 算符的逆.
- 1.80 算符的导数.
- 1.81 Virial 定理的应用.
- 1.82 态随时间的演化.
- 1.83 力学量平均值随时间的演化.
- 2.1 自由粒子波包的扩散.
- 2.2 自由粒子运动的普遍解.
- 2.3 粒子在一维无限深方势阱中的运动.
- 2.4 一维盒中的粒子.
- 2.5 平面转子.
- 2.6 禁闭在一维盒中电子对器壁的压力.
- 2.7 半壁无限高方势阱.
- 2.8 $H = H_0 + \frac{\lambda}{m} p$ 的求解.
- 2.9 一维束缚态的逆(反散射)问题(1).
- 2.10 一维束缚态的逆(反散射)问题(2).
- 2.11 一维束缚态的逆(反散射)问题(3).
- 2.12 一维束缚态的逆(反散射)问题(4).
- 2.13 半壁无限深和有限深对称方势阱存在束缚态的条件.
- 2.14 δ 势阱的束缚态.
- 2.15 δ 势阱的束缚态中, 使粒子处于 $|x| < x_0$ 的概率为 $1/2$ 的 x_0 值.
- 2.16
$$V(x) = \begin{cases} V_0 \delta(x), & -a < x < \infty \\ \infty, & x < -a \end{cases}.$$
- 2.17 一维束缚态逆问题.
- 2.18
$$V(x) = -\alpha \delta(x) + V', \quad V' = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ V_0, & x > 0 \end{cases}.$$
- 2.19
$$V(x) = \begin{cases} \infty, & x < 0, x > a \\ \alpha \delta(x - a/2), & 0 < x < a \end{cases}.$$

- 2.20 处于谐振子叠加态的 $\langle x \rangle$.
- 2.21
$$V(x) = \begin{cases} -V_0\delta(x), & x > -d \\ \infty, & x < -d \end{cases}$$
- 2.22 Dirac 梳.
- 2.23 双 δ 势垒中的共振态能级.
- 2.24 δ 势阱中粒子波函数系数矩阵.
- 2.25 在动量表象中求解 δ 势阱束缚态问题.
- 2.26 粒子在非经典区的概率(谐振子基态).
- 2.27 粒子在对称方势阱中运动, 阱口刚好出现一条束缚态能级的条件.
- 2.28 van der Waals 力势场中的束缚态.
- 2.29 限制在圆周上运动且存在一个 δ 势垒的束缚态.
- 2.30 限制在一段圆弧上运动的粒子.
- 2.31 计算散射势垒的宽度.
- 2.32 谐振子基态为最小不确定性态.
- 2.33 谐振子能量本征态的演化.
- 2.34 谐振子随时间的演化(1).
- 2.35 谐振子随时间的演化(2).
- 2.36 谐振子势中心加一个很高很薄势垒.
- 2.37 与给定的谐振子本征态能级相邻的本征态.
- 2.38 谐振子随时间的演化.
- 2.39 谐振子基态和第一激发态波函数在 p 表象中的形式.
- 2.40 两个能量本征态的能级差.
- 2.41 对势场 $V(x) = V_0(x/a)^{2n}$, 用不确定性关系估计基态能.
- 2.42 一个关于一维 Schrödinger 方程本征值的定理.
- 2.43 束缚态存在定理.
- 2.44 一维势存在束缚态条件的讨论.
- 2.45 双势阱中态的一些讨论.
- 2.46 一维反散射问题.
- 2.47 自由粒子波包随时间的演化.
- 2.48 自由粒子波包随时间演化的极限形式.
- 2.49 ${}_{83}\text{Bi}^{212}$ 的衰变的量子模型.
- 2.50 $V(x) = -g[\delta(x-a) + \delta(x+a)]$.
- 2.51 方势阱的透射.
- 2.52 势阱的透射和反射.
- 2.53 势阱的反射.
- 2.54 粒子自势阶方向入射时的透射、反射.
- 2.55 势阶反射比率.
- 2.56 势垒的透射.

- 2.57 一维散射的能量守恒.
- 2.58 $v(x) = -v_0 \operatorname{sech}^2 x$ 的 S 矩阵.
- 2.59 中子束在平板上的反射.
- 2.60 光学(虚)势的吸收系数.
- 2.61 Galileo 变换下 Schrödinger 方程的解.
- 2.62 在 p 表象中求解 δ 势垒的透射概率.
- 2.63 在 p 表象中求解双 δ 势垒的反射、透射系数.
- 2.64 Dirac 梳的全反射.
- 2.65 受冲力 $p\delta(t)$ 作用的谐振子基态.
- 2.66 谐振子势场的突变.
- 2.67 重力场中粒子的能量.
- 2.68 一维 Ising 模型.
- 2.69 关于 Dirac 梳的计算.
- 2.70 由算符满足的最低阶方程求本征值.
- 2.71 电荷算符与“电荷共轭”算符.
- 2.72 算符本征态的完备性与可观测量 Hermite 性的应用.
- 2.73 能量表象中的求和规则(1).
- 2.74 $V(x) = V_0 \left(\frac{a}{x} - \frac{x}{a} \right)^2$.
- 2.75 氨分子钟工作原理.
- 2.76 能量表象中的求和规则(2).
- 2.77 能量表象中的求和规则(3).
- 2.78 力学量的时间导数在能量表象的矩阵元.
- 2.79 在动量表象中求解均匀力场中运动粒子的定态波函数.
- 2.80 在均匀力场中运动粒子 $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ 与 $\frac{\partial \rho}{\partial p}$ 的关系.
- 2.81 中子与反中子互相转变.
- 2.82 表象与表象变换例(1).
- 2.83 表象与表象变换例(2).
- 2.84 由不确定性关系求最小不确定性态.
- 2.85 $U(x) = \frac{U_0}{1 + e^{-\alpha x}}$.
- 2.86 $U(x) = \frac{U_0}{\cosh^2 ax}$.
- 2.87 么正算符与么正矩阵.
- 2.88 Heisenberg 表象中算符运动方程.
- 2.89 么正算符的时间导数.
- 2.90 积分方程 $B(t) = B(0) + i \left[A, \int_0^t B(\tau) d\tau \right]$ 的解.

- 2.91 入射至半壁无限高势阱粒子的入射波和出射波的相位关系.
- 2.92 能量表象中的求和规则(4).
- 3.1 中心力场中有一定轨道角动量的定态中, $\langle \mathbf{r} \rangle = 0$..
- 3.2 Landau 隧落.
- 3.3 原子单位.
- 3.4 三维无限深势阱.
- 3.5 “夸克”禁闭.
- 3.6 被空穴束缚的电子吸收谱的最大波长.
- 3.7 处于无限深球方势阱基态电子对器壁压力.
- 3.8 粒子在两个不可穿透的同心球壳中的运动.
- 3.9 谐振子基态是最小不确定性态.
- 3.10 中心力场运动粒子各能级径向波函数的结点数.
- 3.11 三维各向同性谐振子能级的占有数和简并度.
- 3.12 三维耦合谐振子.
- 3.13 对数势中运动的粒子.
- 3.14 氢原子受一无限高势壁的作用.
- 3.15 氢原子波函数随时间的演化.
- 3.16 电子偶素.
- 3.17 电子在势场 $V = kr$, $k > 0$ 中运动.
- 3.18 重夸克之间近似相互作用势 $V(r) = A + Br$.
- 3.19 质子和中子通过交换 π^+ 介子产生近似的吸引势 $V(r) = -\frac{g^2}{d} e^{-r/d}$.
- 3.20 中心力场束缚态的一个重要关系.
- 3.21 有限深球方势阱中的束缚态.
- 3.22 有限深球方势阱存在束缚态的条件.
- 3.23 在势 $V(x, y, z) = \begin{cases} \infty, & x \leq 0, \quad y, z \text{ 任意} \\ 0, & x > 0, \quad y, z \text{ 任意} \end{cases}$ 中运动的粒子, 计算其 Green 函数及 $|G(\mathbf{r}, \mathbf{r}', t)|^2$.
- 3.24 电子在不可穿入的导体表面上方的运动.
- 3.25 非相对论电子在无限大接地、不可穿透导体上方运动.
- 3.26 粒子在势场 $V(r) = -\frac{\lambda}{r^{2/3}}$ 中运动, 由不确定性关系估计其基态能.
- 3.27 粒子在球势阱 $V(r) = -\gamma\delta(r-a)$ 中运动.
- 3.28 $V(r) = -\frac{a}{r} + \frac{A}{r^2}$, ($a, A > 0$), 粒子的能量本征态.
- 3.29 三维各向同性谐振子与 Coulomb 场束缚态径向方程的联系.
- 3.30 $V(r) = \lambda r^\nu$, $-2 < \nu < \infty$ 的 $\nu > 0$ 和 $\nu < 0$ 径向方程的联系.
- 3.31 $V(r) = \lambda r^\nu$, $-2 < \nu < \infty$ 的能级量纲构造式.

- 3.32 $V(r) = \lambda r^\nu$, $-2 < \nu < \infty$ 势场, 粒子在半径为 a 的球面内出现的概率.
- 3.33 中心势场, 若 $\frac{dV}{dr} > 0$, 则 $\int_0^a (V - \langle V \rangle) u^2 dr < 0$.
- 3.34 类氢离子处在束缚态 ψ_{nlm} , 计算 $\langle r^\lambda \rangle$, $\lambda = -1, -2, -3$.
- 3.35 类氢离子 $\langle r^\lambda \rangle$ 的 Kramers 递推公式.
- 3.36 三维各向同性谐振子的本征态中 $\langle r^\lambda \rangle$ 的递推关系.
- 3.37 原子核的突然 β^- 衰变.
- 3.38 用不确定性关系估算氢原子的基态能量.
- 3.39 估算核力的力程.
- 3.40 对于氢原子基态, 验证不确定性关系.
- 3.41 类氢离子 $n_r = 0$ 态的讨论.
- 3.42 氢原子 $n_r = 0$ 态, 电子在经典禁区外的概率.
- 3.43 氢原子态 s 态中计算 $\Delta x, \Delta p_x$.
- 3.44 碱金属价电子受屏蔽势作用时的能级.
- 3.45 中心力场等效势的讨论.
- 3.46 双原子分子, 分子内部运动能级的近似表达式.
- 3.47 Morse 势的 s 态解.
- 3.48 有限深球方势阱的一般讨论.
- 3.49 n - p 体系束缚态.
- 3.50 介子的弹性袋模型.
- 3.51 二维和三维中心力场能量本征值的对应关系.
- 3.52 在无限长圆筒中运动粒子的能量.
- 3.53 中心力场束缚态能级对磁量子数 m 简并.
- 3.54 中心力场存在束缚态的充分条件.
- 3.55 氢原子定态波函数径向部分在动量表象中的形式.
- 3.56 粒子在 Kratzer 分子势中运动束缚态解.
- 3.57 三维中心力场的“反散射”问题(1).
- 3.58 三维中心力场的“反散射”问题(2).
- 3.59 一维氢原子的束缚态解.
- 3.60 氢原子 $1s, 2s, 2p$ 态在动量表象中的形式.
- 3.61 氢原子中电子的电矩.
- 3.62 刚性球半径突变时处于球内的粒子.
- 3.63 粒子在 Hulthen 势中束缚态能级的不等式.
- 3.64 无自旋粒子在柱对称势下运动的讨论.
- 4.1 角动量的对易关系.
- 4.2 角动量的升降算符.
- 4.3 在 J^2, J_z 的共同本征态 $|j, m_j\rangle$ 下, 求 $\langle J_x \rangle$, $\langle J_x^2 \rangle$ 及 ΔJ_x .

- 4.4 在 J^2 、 J_z 共同本征态 $|j, m_j\rangle$ 下, 求 $\langle J_n \rangle$ 、 $\langle J_n^2 \rangle$.
- 4.5 在 J^2 、 J_z 表象的 $j=1$ 的子空间, J_x 、 J_y 的矩阵表示及本征值与本征态.
- 4.6 在 $j=1$ 的子空间中, 证明 $J_x^3 = J_x$.
- 4.7 在 J^2 、 J_z 共同本征态 $|j, m\rangle$ 中, J_x 、 J_y 取 $\pm m\hbar$ 的概率相同.
- 4.8 在 L^2 、 L_z 的共同本征态 $|lm\rangle$ 中, L_x^4 的平均值.
- 4.9 在 Y_{20} 态下, L_x 的可能值及相应概率.
- 4.10 与角动量 $\mathbf{J}$ 对易的标量算符在 $|j, m\rangle$ 中的平均值与量子数 m 无关.
- 4.11 角动量的投影定理.
- 4.12 角动量算符和矢量算符的几个代数关系.
- 4.13 σ_n 的本征值与本征态.
- 4.14 自旋 $\frac{1}{2}$ 粒子, σ_n 的可能值及相应概率.
- 4.15 与 σ 的三个分量都对易的非零二维矩阵必为常数矩阵.
- 4.16 不存在与 σ 的三个分量都反对易的非零二维矩阵.
- 4.17 SU_2 矩阵的一般形式.
- 4.18 同位旋算符 τ .
- 4.19 $(\sigma \cdot A)(\sigma \cdot B) = AB + i\sigma(A \times B)$.
- 4.20 $\text{Tr}(\sigma \cdot A)$, $\text{Tr}[(\sigma \cdot A)(\sigma \cdot B)]$.
- 4.21 $\sigma(\sigma \cdot A) - A = A - (\sigma \cdot A)\sigma$.
- 4.22 $e^{i\lambda\sigma_z} = \cos \lambda + i\sigma_z \sin \lambda$.
- 4.23 $e^{i\sigma \cdot A}$ 和 $e^{i\sigma \cdot A} e^{i\sigma \cdot B}$.
- 4.24 计算 $e^{i\lambda\sigma_z} \sigma_\alpha e^{-i\lambda\sigma_z}$.
- 4.25 $e^{i\lambda\sigma_n} \sigma e^{-i\lambda\sigma_n} = n\sigma_n + (n \times \sigma) \times n \cos 2\lambda + n \times \sigma \sin 2\lambda$.
- 4.26 $\sigma_\pm \equiv \sigma_x \pm i\sigma_y$ 的一些代数结果.
- 4.27 自旋态 $|\lambda\rangle$ 的投影算子.
- 4.28 自旋极化矢量在均匀磁场中的动力学方程.
- 4.29 在 σ_n 本征态下的自旋极化矢量.
- 4.30 $s = \frac{1}{2}$ 时极化矢量与投影算子的关系.
- 4.31 在自旋态 $|x\rangle$ 中, 测得 $s = \frac{1}{2}$ 粒子处于 $|\lambda\rangle$ 态的概率.
- 4.32 由测量结果确定自旋态.
- 4.33 轨道、自旋和总角动量之间的一些代数关系.
- 4.34 总角动量的投影算子.
- 4.35 σ_r 对 (L^2, J^2, J_z) 共同本征态的作用结果.
- 4.36 在态 Y_{l0} 下 J^2 、 J_z 的可能值及相应概率.

- 4.37 在 (L^2, J^2, J_z) 的共同本征态下求 $\langle \sigma \rangle$.
- 4.38 在 $|l m_j\rangle$ 态下求总磁矩分量 μ_z 的平均值.
- 4.39 $\sigma_1 \cdot \sigma_2$ 满足的最简单代数关系.
- 4.40 自旋交换算符.
- 4.41 两个自旋 $\frac{1}{2}$ 粒子的两体算符 $e^{i\alpha\sigma_1\sigma_2}$ 的展开.
- 4.42 两个自旋 $\frac{1}{2}$ 粒子的 Pauli 算符的一些代数结果.
- 4.43 两个自旋 $\frac{1}{2}$ 粒子自旋算符和总自旋算符的一些代数结果.
- 4.44 张量算符 $S_{12} = 3(\sigma_1 \cdot n)(\sigma_2 \cdot n) - \sigma_1 \cdot \sigma_2$
- 4.45 两电子原子处于自旋单态时, L - S 耦合对能量无贡献.
- 4.46 两个 $S = \frac{1}{2}$ 非全同粒子的自旋状态中, S^2 的可能测量值及相应概率.
- 4.47 两个自旋 $\frac{1}{2}$ 粒子系受均匀外磁场作用时的能级.
- 4.48 三个自旋 $\frac{1}{2}$ 粒子系统求体系的能级和简并度.
- 4.49 对于两个自旋 $\frac{1}{2}$ 粒子系的自旋单态 χ_{00} , $S_n \chi_{00} = 0$ 及 $\langle \chi_{00} | \sigma_i | \chi_{00} \rangle = 0$.
- 4.50 $\langle \chi_{00} | (\sigma_1 \cdot a)(\sigma_2 \cdot b) | \chi_{00} \rangle = -a \cdot b$
- 4.51 $L^2, L_z, L_{\pm}$ 与 $n_{\pm}, n_3$ 的对易子.
- 4.52 Pauli 矩阵的一些性质.
- 4.53 $S=1$ 的自旋算符的代数结果.
- 4.54 角动量矩阵的本征值.
- 4.55 σ_z 表象中 σ_x, σ_y 的本征态.
- 4.56 在态 $\psi = K(x + y + 2z)e^{-ar}$ 中, 总角动量及 L_z 的期望值.
- 4.57 对 $L=2\hbar, S=1\hbar$ 的粒子, $H = AL \cdot S$ 的能级及简并度.
- 4.58 电子在 $\psi = \frac{1}{\sqrt{4\pi}}(e^{i\varphi} \sin\theta + \cos\theta)g(r)$ 态中, L_z 的可能值及概率.
- 4.59 $\langle jm | U(\beta, y) | jm' \rangle$.
- 4.60 两个自旋 $\frac{1}{2}$ 粒子相互作用 $f = a + b\sigma_1 \cdot \sigma_2$ 在耦合与非耦合表象中的矩阵表示.
- 4.61 两粒子系 L_1^2, L_2^2 及 J^2 的可能值.
- 4.62 在给定的空间态中, L^2, L_z 的值.
- 4.63 自由碳原子的电子组态.
- 4.64 从带负电的全同的 $S=1$ 的两粒子代替氮原子中电子求其基态简并.
- 4.65 电子自旋态的测量.

- 4.66 算符 $AS_y + BS_x$ 的本征值、本征态.
- 4.67 三个自旋 $\frac{1}{2}$ (非全同) 粒子系 Hamilton 量的求解.
- 4.68 一个自旋为 1 的粒子 $H = AS_z + BS_x^2$ 的能级.
- 4.69 两个自旋 $\frac{1}{2}$ 粒子系 Hamilton 量的求解.
- 4.70 激发态原子二次发射的光子之间的关系.
- 4.71 磁场中电子的自旋态.
- 4.72 磁场中自旋 $\frac{1}{2}$ 粒子的自旋态.
- 4.73 磁场中自旋 $\frac{1}{2}$ 粒子的 $\frac{dS}{dt}$.
- 4.74 $H = -J[\sigma_x^{(1)}\sigma_x^{(2)} + \sigma_y^{(1)}\sigma_y^{(2)}]$ 的解.
- 4.75 自由碳原子存在 L - S 精细结构耦合时, 各可能态的 S, L, J 值及重数.
- 4.76 $\pi^- + d \rightarrow n + n$, 中子对的轨道和总角动量.
- 4.77 $\Omega^- \rightarrow A + K^-$ 中的角动量问题.
- 4.78 两角动量 $j_1 = 1, j_2 = \frac{1}{2}$ 的 C - G 系数.
- 4.79 电子在外磁场中运动时的自旋态及平均极化率.
- 4.80 电子处于外磁场中时沿 x 和 z 方向的极化.
- 4.81 两个自旋 $\frac{1}{2}$ 粒子系在给定态下, 总自旋 $S = 0$ 的概率.
- 4.82 与电子自旋有关的测量问题.
- 4.83 为什么氦核不存在 P 态和 G 态.
- 4.84 Stern-Gerlach 装置中的电子.
- 4.85 处于基态的碱原子通过 Stern-Gerlach 装置.
- 4.86 自旋 $\frac{1}{2}$ 粒子束相继通过两个 Stern-Gerlach 装置.
- 4.87 Stern-Gerlach 试验(银原子).
- 4.88 存在自旋-自旋相互作用两个自旋 $\frac{1}{2}$ 粒子系, 在外磁场中情况讨论.
- 4.89 处于 $^2P_{1/2}$ 态氢原子在弱和强外磁场中的有效磁矩.
- 4.90 磁矩为 $\mathbf{M} = \gamma \mathbf{s}$ ($s = 1/2$) 在外磁场中的 $\langle \mathbf{s} \rangle$.
- 4.91 磁共振问题(1).
- 4.92 磁矩 $\boldsymbol{\mu} = \mu_0 \boldsymbol{\sigma}$ 粒子处于磁场 $\mathbf{B} = B_0 \sigma_z + B_1 \sigma_x$ 中状态随时间的演化.
- 4.93 磁共振问题(2).
- 4.94 中子束相继穿过两个方向不同磁场时, 自旋态的演化.
- 4.95 $(\mu^+ e^-)$ 原子在外磁场中 Hamilton 量中各项的意义.
- 5.1 速度算符及各分量间的对易关系.

- 5.2 $\frac{dv}{dt}$ 和 $\frac{dL}{dt}$.
- 5.3 自由电子在外磁场中的 Hamilton 量.
- 5.4 带电粒子在均匀磁场中运动的轨道中心算符.
- 5.5 带电粒子在均匀磁场中运动的轨道中心算符和轨道半径的本征值谱.
- 5.6 电荷密度和电流密度算符.
- 5.7 带电粒子在均匀磁场及三维各向同性谐振子势场中的能谱.
- 5.8 限制在圆周上的带电粒子处于磁场中时的能级.
- 5.9 磁通量量子化.
- 5.10 对称规范与不对称规范.
- 5.11 Pauli 提出的全面地反映电子在电磁场中的运动的 Hamilton 量.
- 5.12 带电粒子受均匀电场作用时的含时 Schrödinger 方程.
- 5.13 处于均匀磁场中无自旋带电粒子的能级.
- 5.14 带电粒子在恒定相互垂直电磁场中运动.
- 5.15 中子的旋量干涉.
- 5.16 Aharonov-Bohm 效应.
- 5.17 将 Bohr-Sommerfeld 关系推广应用到有电磁场存在的情况.
- 5.18 规范变换对波函数的影响.
- 5.19 三维刚性盒中电子受一均匀磁场作用时的能级.
- 5.20 导体圆环处于磁场中, 在此环中运动电子的基态与外磁场的关系.
- 5.21 时间反演不变时, 波函数的时间反演形式.
- 5.22 有自旋的带电粒子在均匀磁场中低速运动时的 Hamilton 量.
- 5.23 中子干涉问题.
- 5.24 处于 2p 态氢原子在外磁场中, 计算 $\langle L_z \rangle$.
- 5.25 不带电荷磁矩为 μ 粒子被约束在 $(-L, L)$ 的无限深势阱中, 在 $x < 0$ 区加磁场 $B_0 \mathbf{e}_z$, 在 $x > 0$ 区加磁场 $B_0 \mathbf{e}_x$, 求能量本征态及能级方程.
- 5.26 带电粒子在磁通为 ϕ 的长螺线管穿过半径为 R 的双环中运动时, 能级及本征函数.
- 6.1 用微扰论计算椭圆状刚性势阱中基态能量修正.
- 6.2 微扰论计算切去一角的无限深阱中前三态的能量修正.
- 6.3 微扰论计算一维谐振子基态能量的相对论修正.
- 6.4 Coulomb 场中电子在微扰势 $V_{\text{微扰}} = f(r)xy$ 作用下, 能级的变化.
- 6.5 一维无限深势阱中有一小势阱时的基态能量一级修正.
- 6.6 微扰论计算有两个小势垒的无限深势阱中能量一级修正.
- 6.7 微扰论计算有一个小势垒的无限深势阱中的基态能量.
- 6.8 微扰势 $\delta V = \frac{\lambda}{x^2 + a^2}$, 一维谐振子基态的能量修正.
- 6.9 弹性球在缓慢移动墙之间运动时能量随时间的变化.
- 6.10 在一维无限深阱中突然加上势垒后电子的跃迁.
- 6.11 一维带电谐振子放入电场后基态能量的移动.

- 6.12 一维谐振子在 $V = \alpha y^3$ 微扰时, 能量的最低级修正.
- 6.13 一维谐振子在与时间无关微扰下的能量修正.
- 6.14 一维谐振子在微扰 $V(x) = \frac{1}{2}kx^2 + cx^4$ 下的基态能量改变.
- 6.15 一位谐振子在微扰 $\frac{\delta k}{2}x^2$ 作用下, 能量二级修正.
- 6.16 电场使带电谐振子能量降低.
- 6.17 小角度单摆的能级及小角度近似误差产生的基态能量的最低阶修正.
- 6.18 刚性转子在弱电场中的能量修正.
- 6.19 双原子分子的转动能级及其在弱电场中的能级移动.
- 6.20 电偶极矩为 P 的刚性转子在弱电场中的三个最低能级.
- 6.21 两端带电均匀棒的转动能级, 本征函数及其在电场中的能量修正.
- 6.22 对称陀螺的能级及稍不对称时能级的修正.
- 6.23 用微扰论与变分法分别计算氢原子的电离能.
- 6.24 粒子在周期势 $V = V_0 \cos\left(\frac{2\pi x}{a}\right)$ 中的本征态及 V_0 很小时的能量本征值.
- 6.25 周期性边界条件下一维运动电子的定态及其在微扰 $V(x) = \varepsilon \cos qx$ 下的能量修正.
- 6.26 带电谐振子在微电场中的能移及电偶极矩.
- 6.27 求氢原子 1s, 2p 态能级的 Lamb 位移.
- 6.28 电子偶素 1s 基态中单态与三重态的能级差.
- 6.29 氢原子结合能.
- 6.30 氢原子的 1s 态和 2p 态.
- 6.31 原子中的电子能级.
- 6.32 核的有限大小效应对基态能量的影响.
- 6.33 $\pi^+ - \mu^-$ 原子的 1s、2p 态之间的能级差.
- 6.34 μ 介子原子由于核体积的有限性产生的能移.
- 6.35 定性解释 Pauli 原理对能级的影响, 给出氢原子态能级的微扰公式.
- 6.36 圆周运动的粒子在微扰势 $H' = A \sin \theta \cos \theta$ 下的最低两个态及其能量修正.
- 6.37 电子在 $V(x) = -\frac{k}{x}, x > 0; V(x) = \infty, x < 0$ 势中的基态能级, 及基态能量的 Stark 移动.
- 6.38 讨论和计算氢原子基态的 Stark 效应.
- 6.39 为何氢原子激发态有线性 Stark 效应, 而钠原子激发态只有二次 Stark 效应.
- 6.40 计算 Stark 效应引起的氢原子 $S_{1/2}, P_{1/2}, P_{3/2}$ 态的能级变化.
- 6.41 说明普通原子与氢原子 Stark 效应的区别及四个氢原子态的 Stark 能移.
- 6.42 只剩一个电子的离子的 Zeeman 分裂与一阶 Stark 效应.
- 6.43 用微扰论计算在弱电场时, 氢原子 $n=2$ 能级的简并消除与能移.
- 6.44 类氢原子在均匀电场、磁场中 $n=2$ 的能级的分裂.