

量子力学

上册

〔法〕L. 萨尔蒙 A. 日瓦特 著

科学出版社

201/243/15

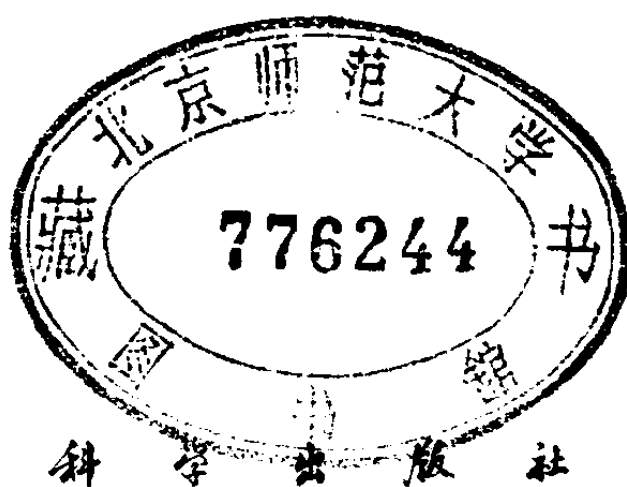
量子力学

上册

(法) J. 萨尔蒙 A. 日瓦特 著

顾世杰 译

戴俊杰 喀兴林 校



1981

内 容 简 介

本书阐述量子力学的基本概念和方法,原书共分两册。上册从复习经典力学开始,介绍了算符、波函数和测不准关系等基本概念。接着详细地讨论了薛定谔方程及其在氢原子、谐振子、核物理研究中的应用。下册介绍微扰论等近似计算方法和相对论量子力学。

本书的特点是说理清晰,公式推导十分详尽,适合理工科院校和师范院校作为教材或参考书,也可供有关工程技术人员参考。

J. Salmon A. Gervat

MÉCANIQUE QUANTIQUE

Tome I

Masson, 1967

量 子 力 学

上 册

〔法〕J. 萨尔蒙 A. 日瓦特 著

顾世杰 译

戴俊杰 喀兴林 校

*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1981 年 5 月第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1981 年 5 月第一次印刷 印张: 12 1/8

印数: 0001—10,220 字数: 269,000

统一书号: 13031·1549

本社书号: 2124·13—3

定 价: 1.85 元

译 者 的 话

量子力学研究微观物质运动的基本规律,所以物理学、化学、生物学等基础科学的科研工作者都必须掌握这门学科的基本概念和方法。同时,现在许多工程技术的发展,也都与量子力学有一定联系,例如激光、半导体、原子核工程等等,都必须应用量子力学规律。所以工程技术人员也有必要熟悉量子力学。

萨尔蒙和日瓦特的这本《量子力学》,原是为学习量子力学的工程师写的,它只要求读者具有普通物理学、电动力学和高等数学等基础知识。此书最大特点是说理清晰,公式推导十分详尽,对于初学者来说,是一本很好的入门书;对教学来说,无论对教师,还是学生,都是一本很好的参考书,也可以用作教科书。

由于译者水平有限,译文中错误和不妥之处,望读者指正。

引 言

教 程 介 绍

量子力学是一门比较难懂的学科。它所用的语言是一些算符和波函数，并且是很抽象的。测不准关系的引入是很不好接受的，因为它破坏了传统的决定论概念。在历史上，有些人曾不太能接受量子力学，它至今也仍然使初入门的人感到难以相信，这是可以理解的。

然而，量子力学在当代的科学和工业发展中的作用不断地扩大。最初，只是一些理论物理学家试图用量子力学来解释在很少几个基础物理实验室里得到的结果，而现在，如果想一想量子力学在光学(激光)和电子学(晶体管和量子放大器)等领域内所取得的进展，那么量子力学已经具有工业上的职能了。因此，有必要在国立工科学院建立从应用角度讲授量子力学和统计力学的高等物理教程。但是，由于这种课程是很难懂的，所以编写有关教程对学生和教师都是有益的。这就是编写这本《量子力学》的原因。

我们主要关心的当然是使教学适应在工科学院学习高等物理学课程的学生水平。他们都是已经获得或将要获得工程师学位的，他们一般学过普通数学、普通物理学和一些专业课程(电子学、核物理、…)，并具有实际的工作能力。因此，他们所受的教育是牢固的，他们的钻劲是强的，他们在专业方面的成就是优异的。对这样的学生，我们首先想到必须介绍所谓经典物理学概况，同时指出经典物理学所遇到的困难。当然，

在以往的教程中,人们也对此作过不少论述,但是把这些困难重新总结一下还是可取的。

不管怎样,普通物理学是属于经典物理学体系,但是就教学而言,不可能用薛定谔方程来处理力学。因此,学习高等物理学的学生受到某种形式体系的局限,我们感到,应该提请他们注意这种形式体系的价值和局限性。人们细心地以相当深刻的方式引入了拉格朗日函数和哈密顿函数等如此重要的概念。所以,分析动力学的一些内容是必须掌握的。

接着我们安排了关于线性泛函算符和希耳伯特空间的一章。这一章是重要的,也是很困难的,因为读者必须改变他的习惯,学会用“本征值和本征函数”来思考。然后,我们用算符法而不用物质波法来介绍量子力学。尽管物质波概念具有较明确的物理意义,但算符法的表示具有更多的演绎特性,而接受这种方法并不十分困难,因为根据两组假设,就能够建立起整个量子力学,其中一个假设是关于与物理量相联系的算符概念和波函数的存在,另一个是关于物理量测量的假设。

然后作为应用,研究了一些诸如氢原子、谐振子、氦核结构和 α 放射性等传统问题。接着用唯象方法引入自旋概念,这是因为我们还停留在非相对论范畴内,这样就可以研究光谱学。但是,很明显,必须引入相对论。因此,我们接着阐明了相对论经典力学以及狄喇克理论,狄喇克理论巧妙地把自旋概念与相对论联系起来了。

为了完整性,接着应该用很长篇幅来描写量子场论,但这超出了本书范围。因此,我们只写了一章,其目的仅仅是以简洁方式指出目前量子力学的发展趋向。

实际上,对于教授及其助教来说,用四十个课时和二十来次习题讨论会处理所有的内容,并且化几个小时来处理统计力学基础,这似乎是有困难的。但是由于学生的水平较高,有

了这本书,教师就可以要求学生自学一部分.三十年以前,高等物理学教程未曾采用过这种技术,但是物理学振奋人心的巨大发展导致了这种革新.

经典力学和量子力学

经典力学首先单纯研究运动本身,而不涉及产生运动的原因.力学的这一分支叫做运动学,它是研究运动的几何点的性质.选定一个原点 O 和参考系 (R) ,使动点 M 的位置对应一个空间矢量 $\overrightarrow{OM}$,它是时间 t 、原点 O 以及端点 M 的函数.然后用矢量 $\overrightarrow{OM}$ 对时间的微商来确定速度矢量 $\mathbf{v}$ 和加速度矢量 $\mathbf{a}$. 矢量 $\mathbf{v}$ 和 $\mathbf{a}$ 以某种方式表示运动的趋势,

$$\mathbf{v} = \frac{d\overrightarrow{OM}}{dt}, \quad \mathbf{a} = \frac{d^2\overrightarrow{OM}}{dt^2}. \quad (1)$$

运动学同样也分析刚体(被看成一组相互刚性联结的点)运动的性质.

经典力学还描述物质世界中物体在产生其运动的原因作用下的运动,这就不再是运动学,而是动力学了.因此,必须引入力和质量的概念,质量使人想起物质的量的概念,而力就是产生运动的原因.

但是,考虑到教学问题,经典力学提出了一种假想体,即质点或无尺寸而有质量的点.于是,提出了一个基本定律,即质量为 m 的质点在合力 $\mathbf{F}$ 作用下所获得的加速度 $\mathbf{a}$ 满足

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a} = m \frac{d^2\overrightarrow{OM}}{dt^2}. \quad (2)$$

因此,如果已知 $\mathbf{F}$ 、 m 和运动的初始条件,微分方程(2)的解就确定了质点的运动.研究这种假想体不是徒劳的,因为当

经典力学研究真实物质系统时，经常要应用到研究质点时所获得的结果。如同几何点的运动学先于几何体运动学一样，质点动力学也可作为物体动力学的前导。

物体动力学首先研究不可形变的刚体，特别是证明，这种刚体的重心 G 的运动同一个质点的运动一样，只要令这质点的质量等于刚体的质量，并把作用于刚体上的合力作用到这质点上，

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a}_G = m \frac{d^2 \overrightarrow{OG}}{dt^2}. \quad (3)$$

这个基本定理叫做“重心定理”，只要把不可形变的刚体看成一个相互间刚性联结的质点系，把方程

$$\mathbf{F}_i = m_i \mathbf{a}_i \quad (4)$$

用到质点系的每一质点上，并以适当方式把它们加起来，就可以建立起“重心定理”。

依旧以方程 (4) 作为出发点，再作一次略长一些的计算，就导出角动量定理。这两个定理加上摩擦定律，就可以解决任何刚体动力学问题。有时还要确定在什么条件下运动是可能的，也就是在什么条件下一个刚体系统是平衡的，刚体静力学的目的就是回答这类问题。它的根据是下列两个命题：

- a) 外力的合力等于零；
- b) 外力的合力矩等于零，

再加上摩擦定律。

在彻底探讨刚体的性质以后，经典力学就从事流体的研究。流体被看成一组不是刚性地联在一起的粒子。把基本方程

$$\mathbf{F}_i = m_i \mathbf{a}_i$$

用于所有粒子，就导致极大量的方程。因而必须引入统计概念和平均值概念。

引入这种统计概念产生了一门重要的学科，叫做经典统

计力学。由于引入了几率概念，使叙述统计力学存在一定困难。轨迹概念至少在微观场合还是保持的，而在宏观场合建立了极重要的流体力学方程。

因此，在本世纪初，经典力学还给人一种严格学说的印象。事实上，它是处于极其严重危机的前夕。

首先是相对论扰动了我们的时间和长度概念，并且也对物体的质量的不变性提出了挑战。

其次是微观物理的发展迫使物理学家引入象测不准关系和波函数那样奇怪的概念。传统的决定论概念瓦解了。这必定会提出一些可怕的哲学和教学问题。避开哲学问题，我们可以说本书的目的正是要向工科学院的学生指出，怎样把物理现象纳入比非相对论经典力学更普遍的范畴中去。因此，将顺次地陈述非相对论量子力学、相对论经典力学和相对论量子力学。

但是，必须补充说明，在许多情况下，非相对论经典力学依旧是相当有效的近似，学生应很好地了解为什么必须复习经典力学。因此，我们将从复习一些经典力学的结论着手。

随后，读者心目中的经典力学“偶像”就被打破了，但要注意，读者想从中取得的愉快将被由于引入有效而复杂的数学工具所带来的苦恼所抵消。（下略）

目 录

译者的话.....	ix
引言.....	x
教程介绍	x
经典力学和量子力学	xii
第一章 质点的经典力学.....	1
§ 1 引言	1
§ 2 质点的经典运动学	1
a) 固定的直角坐标系	2
b) 运动坐标系(柱坐标)	2
c) 塞雷特-弗伦特 (Serret-Frenet) 坐标系	3
§ 3 质点的经典动力学	5
a) 绪论	5
b) 功;动能和势能;力函数	6
c) 动量和角动量	7
§ 4 例子	8
a) 在与距离有关的向心力作用下的运动	8
b) 谐振子	12
c) 带电粒子在磁场中的运动	13
习题和问题	15
第二章 分析动力学基础.....	19
§ 1 引言	18
a) 曲线坐标	18
b) 正交曲线坐标	21
§ 2 曲线坐标中的拉格朗日方程	24
§ 3 拉格朗日函数	29

a) 积分的极值	29
b) 在有力函数的情况下拉格朗日函数的表示式	36
c) 电磁场中带电粒子的拉格朗日函数	41
§ 4 哈密顿函数和哈密顿方程	47
a) 位置变量的共轭动量(即广义动量)——哈密顿函数的定义	47
b) 一个粒子的哈密顿函数表示式——存在力函数的情况	49
c) 一个粒子的哈密顿函数表示式——有电磁场的情况	52
d) 哈密顿方程	53
e) 雅科毕方程	57
f) 粒子系的哈密顿函数	63
习题和问题	63
第三章 粒子与波	66
§ 1 引言	66
§ 2 粒子性	66
a) 基本粒子	66
b) 物质的态——原子和分子	67
§ 3 物质的物理学与经典力学	69
a) 基本粒子物理学	70
b) 不可形变固体的物理学	70
c) 液体和气体物理学	70
d) 可形变固体的物理学	71
§ 4 振动和机械波	71
a) 周期振动	71
b) 平面行波	73
c) 平面驻波	74
d) 能量输运——相干球面波	75
e) 相速和群速	77
f) 平面波的传播方程	78
g) 与流体力学的联系	78
§ 5 电磁波	81
a) 绪论	81
b) 其它干涉装置	84

c) 电磁特性	90
§ 6 经典物理的瓦解	95
a) 氢原子光谱	96
b) 光电效应	97
c) 康普顿效应	99
d) 电子衍射	100
e) 电子干涉条纹	102
习题和问题	106
第四章 量子力学的数学基础	110
§ 1 希耳伯空间	110
§ 2 两个函数 $f(x)$ 和 $g(x)$ 的标量积	111
§ 3 正交归一函数组	112
§ 4 正交函数组	112
§ 5 推广到复值函数	114
§ 6 一个函数展开成正交函数的级数	115
§ 7 狄喇克分布	117
§ 8 线性算符的概念	119
a) 算符的乘积	121
b) 共轭算符, 厄密算符	122
c) 线性算符的本征值和本征函数	124
d) 厄密算符	125
e) 推广到三维空间	127
习题和问题	128
第五章 量子力学的基本概念	132
§ 1 引言	132
§ 2 量子力学的一些假设	134
a) 波函数的存在	134
b) 与物理量相对应的算符	134
c) 波函数的演变方程或薛定谔方程	137
d) 波函数 ψ 的解释	139
e) 算符的本征值和本征函数	140
f) 物理量的测量	141

§ 3 两个量的同时测量——测不准关系	146
§ 4 经典力学被看成是量子力学的近似	150
§ 5 结论	156
习题和问题	156
第六章 薛定谔方程的一般研究	159
§ 1 引言	159
§ 2 稳态问题的一般特征	160
§ 3 能量符号的物理意义	162
a) 束缚态	163
b) 非束缚态	163
§ 4 非稳态的一般特征	165
§ 5 一维运动	166
a) 自由粒子	166
b) 遇上势垒的粒子	167
c) 势阱中的粒子	175
§ 6 另一些常用形式的势阱问题	188
a) 当 $x \rightarrow \pm\infty$ 时, 函数 $V(x)$ 趋于同一极限 E_∞	188
b) 当 $x \rightarrow \pm\infty$ 时, 函数 $V(x)$ 无限增大	191
§ 7 波动性	192
a) 绪论	192
b) 量子力学与互补性	195
§ 8 实验验证	197
习题和问题	198
第七章 两粒子系统	200
§ 1 引言	200
§ 2 经典力学中的两体问题	203
§ 3 量子力学中的两体问题	205
a) 两粒子系统的波函数	205
b) 两粒子系统的薛定谔方程	207
c) 波函数 Ψ 的物理意义	209
§ 4 独立粒子系统	210

§ 5 向心相互作用	211
a) 经典力学	211
b) 量子力学	213
习题和问题	219
第八章 一些常用函数	221
§ 1 引言	221
§ 2 勒让德多项式	221
a) 勒让德多项式的定义	222
b) 勒让德多项式的正交性	223
c) 递推关系	226
d) 勒让德多项式的微分方程	227
e) 以勒让德多项式为本征函数的算符	228
§ 3 联属勒让德函数	228
a) 微分方程	229
b) 对应于微分方程的算符	230
c) 联属勒让德函数的正交性	230
§ 4 球谐函数	232
§ 5 厄密多项式	235
a) 定义	235
b) 递推关系	236
c) 厄密多项式的微分方程	236
d) 相应的算符	237
e) 广义正交关系	237
§ 6 拉盖尔多项式	239
a) 定义	239
b) 递推关系	240
c) 拉盖尔多项式的微分方程	241
d) 与拉盖尔多项式相联系的算符	241
e) 广义正交关系	241
§ 7 联属拉盖尔多项式	243
a) 定义	243
b) 联属拉盖尔多项式的微分方程	243

c) 相应的算符	244
d) 广义正交关系	244
e) 联属拉盖尔函数	246
§ 8 贝塞尔函数	250
a) $\Gamma(x)$ 函数的定义	250
b) 贝塞尔函数的定义	253
c) 贝塞尔函数的微分方程	253
d) 贝塞尔函数的图形	255
e) 递推公式	255
f) $\nu = n + \frac{1}{2}$ 的特殊情况	256
g) 贝塞尔函数的渐近形式	257
§ 9 球贝塞尔函数	258
习题和问题	260
第九章 氢原子	264
§ 1 引言	264
§ 2 束缚态方程	267
a) 关于束缚态研究的引言	267
b) 应用球坐标和分离变量	268
c) g 方程的解	270
d) f 方程的解	274
e) ψ 函数的最终形式	279
§ 3 结果的解释	280
a) 整数 n 的意义	280
b) 整数 l 和 m 的意义	282
§ 4 结果的摘要	292
a) 基态	293
b) 激发态	294
§ 5 实验证明	296
a) 跃迁几率和选择定则	300
b) 自旋的引入	300
c) 氢原子的稳定性	300
§ 6 在中心势内粒子的运动	300

习题和问题	301
第十章 谐振子	303
§ 1 经典力学中的谐振子	303
§ 2 量子力学中的谐振子	304
a) 绪论	304
b) 方程(10.13)的解	305
c) 谐振子的能级	308
§ 3 双原子分子的转动-振动谱	310
§ 4 盐酸分子	315
习题和问题	316
第十一章 量子力学与核物理	318
第一部分 氘核的结构	318
§ 1 问题的要旨	318
§ 2 结合能的计算	320
第二部分 α 放射性	323
§ 1 概论	323
§ 2 α 放射性的理论	325
a) 引言	325
b) 势能的表示式	325
c) 波函数的确定	326
d) 与实验的比较	334
习题和问题	336
附录一 曲线坐标中的劈形算符	338
附录二 带电粒子的辐射	344
1. 电荷分布和电流分布产生的推迟势	344
2. 运动电荷产生的推迟势	345
3. 电场和磁场的表示式	347
4. 非相对论粒子	351
附录三 函数按照正交函数系的展开	353
1. 引言	353
2. 两函数的平均距离	353

3. 平均收敛,完备组	355
附录四.....	357
第一个公式.....	357
a) 函数 $P_l(x)$ 和 $P_l^m(x)$ 的另一重要形式.....	357
b) 一个有用积分的计算	360
c) 勒让德多项式的母函数	360
d) 公式 (A. 4.2) 的证明	361
第二个公式.....	365
a) 球贝塞尔函数的展开	365
b) 研究一个重要的积分	366
c) 公式 (A. 4.30) 的证明.....	368
附录五 常用常数.....	370