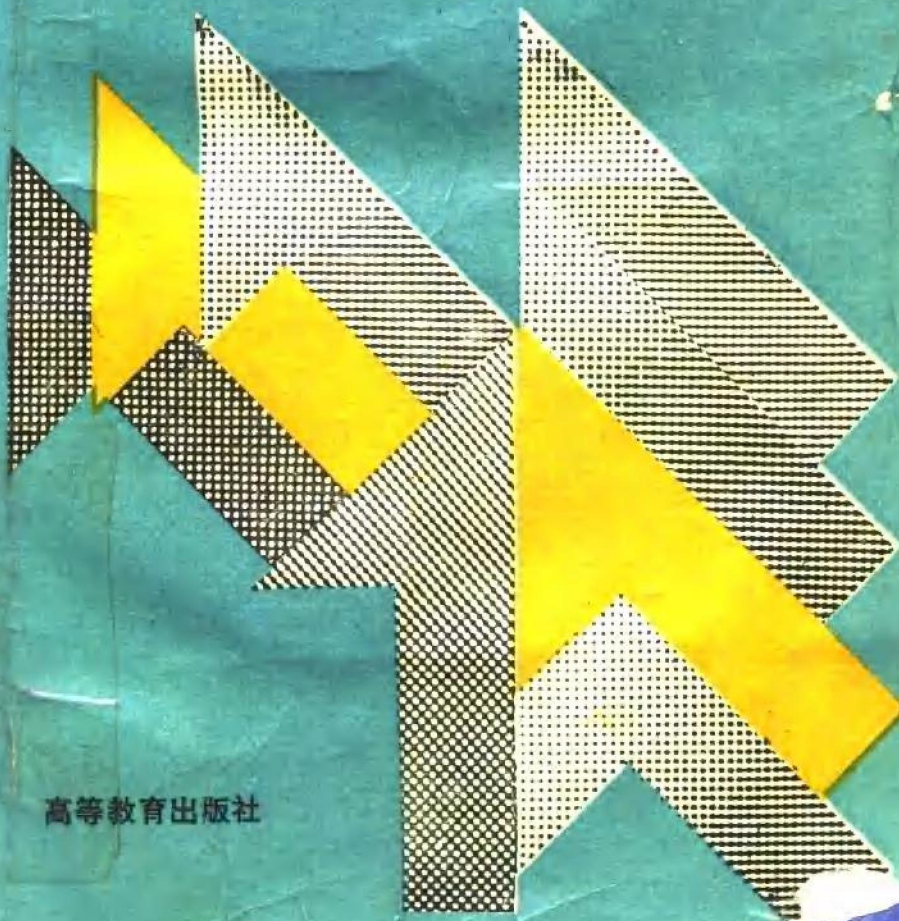


高等学校教学参考书

量子力学

邹鹏程 编

高等教育出版社

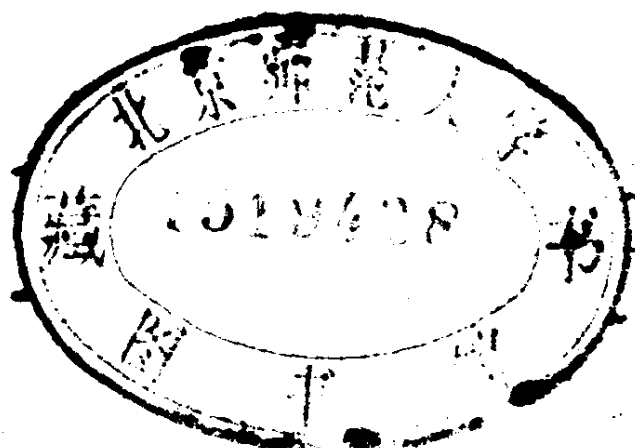
An abstract geometric design on the book cover, featuring several overlapping triangles and polygons. The design includes solid yellow areas, black areas with a fine dot pattern, and white areas with a fine dot pattern. The background is a textured teal color.

高等学校教学参考书

量子力学

邹鹏程 编

501521/02



高等教育出版社

内 容 简 介

本书经高等学校理科物理教材编审委员会评选为高等学校理科物理系教学用书。

本书首先从基本实验事实总结出几条基本原理，然后从这些原理出发处理量子力学中的一些基本问题。本书体系与传统教材不同，它将量子力学的主要内容归结为三类基本问题：定态问题、跃迁问题、散射问题；同时又按问题的深入程度将全书分为三个部分，即初等内容；进一步的理论；理论的推广和发展。全书层次分明，深入浅出，形成一个易于接受的新的教学体系。本书在讲法上也有一些创新，例如关于力学量的引出与对称性的关系以及二次量子化等问题的阐述方面均有独到之处。

本书可作为高等学校理科物理系教学用书，也可供其他有关专业师生及科研工作者参考。

责任编辑 李松岩

高等学校教学参考书

量 子 力 学

邹鹏程 编

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京印刷一厂印装

*

开本850×1168 1/32 印张 17.125 字数 430 000

1989 年11月 第1版 1989年11月 第1次印刷

印数 0 001— 1 650

ISBN 7-04-002329-X/O·768

定价 4.85 元

目 录

绪论	1
§ 0.1 经典物理学的困难及量子力学的产生	1
i) 黑体辐射与能量子假说	2
ii) 光电效应及康普顿散射	4
iii) 在解释原子结构方面的困难	6
§ 0.2 德布罗意假设	9
§ 0.3 波包的动量和能量,测不准关系	12
习题	19

第一部分 量子力学的基本原理

第一章 基本假设	21
§ 1.1 态的描写及其意义	21
i) 波粒二象性	21
ii) 统计解释	21
iii) 归一化	24
iv) 坐标平均值与坐标算符	25
v) 复杂体系的描写	26
vi) 补充	28
§ 1.2 正交分解与几率振幅	29
i) 叠加原理	29
ii) 线性空间	31
iii) 内积与正交分解	33
iv) 态的测量与几率振幅	36
v) 动量平均值与动量算符	40
vi) 补充	41

§ 1.3 薛定谔方程	43
i) 薛定谔方程	43
ii) 薛定谔方程的特点	48
iii) 几率密度及粒子数守恒	52
§ 1.4 量子力学与经典力学的关系	56
i) 从薛定谔方程到牛顿方程	56
ii) 从薛定谔方程到哈密顿方程	60
iii) 力学量的算符表示	63
iv) 量子化方法	65
*v) 宏观近似条件	67
第二章 定态问题	74
§ 2.1 薛定谔方程的稳定解, 定态	74
i) 分离变量法, 定态	74
ii) 定态解的正交性与完备性	76
iii) 初值问题	77
iv) 波函数的标准条件	78
§ 2.2 隧道效应	80
§ 2.3 一维方势阱中的运动	85
§ 2.4 散射时的共振	89
§ 2.5 简谐振子	92
§ 2.6 氢原子和类氢离子	93
i) 两体问题的化简	93
ii) 球坐标中的分离变量	100
iii) 径向方程	104
iv) 讨论	108
§ 2.7 定态微扰理论	111
i) 各级近似方程	111
ii) 无简并时的微扰公式	112
iii) 简并微扰方法	119

§ 2.8 变分法	125
第三章 跃迁问题	133
§ 3.1 跃迁几率公式	134
i) 跃迁振幅方程	134
ii) 一级跃迁公式	135
iii) 跃迁过程中能量守恒	137
iv) 末态求和与初态平均	138
v) 二级跃迁的意义	138
§ 3.2 周期微扰下跃迁公式的化简	139
i) 公式的化简	139
ii) 几点说明	141
iii) δ 函数的消去	143
§ 3.3 电偶极跃迁	144
i) 跃迁公式	144
ii) 选择定则	147
§ 3.4 自发跃迁	150
i) 爱因斯坦辐射理论	151
ii) A_{nm} 、 B_{nm} 的计算	152
iii) 谱线强度	153
iv) 激光器原理	154
第四章 散射问题	160
§ 4.1 散射的一般概念	160
§ 4.2 定态处理——玻恩近似	163
i) 散射截面与球面波振幅的关系	163
ii) 微扰解与玻恩公式	165
*iii) 高阶近似与符号公式	171
§ 4.3 定态处理——分波法	173
i) 截面与相移的关系	173
ii) 相移的意义及近似条件	176

iii) 光学定理	179
*iv) 散射矩阵	179
§ 4.4 跃迁方法	181

第二部分 对称与守恒 力学量理论

第五章 线性算符及表示理论	189
§ 5.1 线性空间与线性算符	189
i) 态的表示	189
ii) 线性算符	190
iii) 对易关系的计算	193
iv) 算符函数	194
§ 5.2 内积及共轭运算	196
i) 内积	196
ii) 态的共轭	199
iii) 算符的共轭	200
§ 5.3 厄米算符及其性质	203
i) 厄米算符及么正算符	203
ii) 本征方程	203
iii) 厄米算符的性质	205
iv) 连续谱的情形	213
v) 箱归一化	215
§ 5.4 力学量的测量	217
§ 5.5 算符具有共同本征态的条件,同时测量与测不准 关系	220
i) 算符具有完备共同本征态的条件	221
ii) 测不准关系	224
*iii) 同时测量	226
iv) 用测不准关系估计系统基态能量	227
§ 5.6 矩阵表示	228
i) 态及内积的矩阵表示	228

ii) 算符的矩阵表示	232
iii) 矩阵形式下本征方程的求解	236
*iv) 连续谱的情形、积分算子	241
§ 5.7 表象变换	243
i) 波函数及算符的变换	243
ii) S 的幺正性	244
iii) 算符的对角化	245
*iv) 幺正算符	246
*§ 5.8 与运动有关的表象	248
i) 态空间随时间变化的幺正算符	248
ii) 与运动有关的表象	252
(1) 薛定谔表象	252
(2) 海森伯表象	252
(3) 相互作用表象	255
第六章 对称与守恒 力学量	261
§ 6.1 对称与守恒, 基本定理	261
§ 6.2 算符守恒的条件及不守恒时随时间的变化	268
i) 算符守恒的条件	268
ii) 对称与简并	269
iii) 算符随时间的变化	272
§ 6.3 守恒算符的性质	274
习题	278
第七章 时、空均匀性与能量、动量守恒	280
§ 7.1 空间均匀性与动量守恒	280
*§ 7.2 空间平移时态及算符的变化	287
i) 平移时态的变化	287
ii) 平移时算符的变化	289
*§ 7.3 与空间平移有关的选择定则	293
§ 7.4 时间均匀性与能量守恒	296

*§ 7.5 与时间平移有关的选择定则	298
i) 平移时态的变化	298
ii) 平移时算符的变化	299
iii) 与时间平移有关的选择定则	300
习题	301
第八章 空间各向同性与角动量守恒	303
§ 8.1 绕固定轴的转动,角动量算符 J_z	303
§ 8.2 绕任意轴的转动,角动量矢量算符 $\mathbf{J}$	310
i) 空间的无穷小转动	310
ii) 转动的无穷小算符,角动量矢量 $\mathbf{J}$	311
iii) 角动量算符的对易关系	314
§ 8.3 任意转动下态的变化	317
i) J^2 算符与转动不变子空间	317
ii) 球对称系统的能级结构	318
iii) J^2 、 J_z 的本征值和本征函数	319
§ 8.4 角动量算符的矩阵	322
i) 角动量算符的矩阵	322
ii) 电子的自旋算符	325
*iii) 转动矩阵	327
§ 8.5 角动量相加法则	329
i) 总角动量算符的本征值	329
ii) 总角动量的本征态, C-G 系数	333
iii) 耦合系统的能量	339
§ 8.6 转动时算符的变化,与转动有关的选择定则	341
i) 不可约张量算符	341
ii) 维格纳-艾卡定理	343
iii) 朗德公式	348
习题	350
第九章 时、空反演及 K^0 介子的衰变	354

§ 9.1 空间反演及宇称守恒	354
i) 镜象与反演	354
ii) 宇称算符	358
iii) 与反演有关的选择定则	361
iv) 宇称守恒及其破坏	363
§ 9.2 CP 对称与中性 K 介子的衰变	365
i) CP 对称与 K^0 介子的哈密顿量	365
ii) 运动方程及其解	367
iii) 讨论	368
*§ 9.3 时间反演	372
i) 一般概念	372
ii) 时间反演算符	374
习题	376
第十章 算符理论应用举例	378
§ 10.1 周期场中的运动	378
§ 10.2 简谐振子的算符解法	384
§ 10.3 带电粒子在电磁场中的运动	390
i) 带电粒子的哈密顿量	390
ii) 几率守恒	392
iii) 均匀磁场中的运动·轨道磁矩及抗磁性	393
*iv) 规范不变性	394
v) 泡利方程	397
§ 10.4 斯特恩-革拉赫实验及磁共振	399
i) 斯特恩-革拉赫实验	399
ii) 磁共振实验	402
§ 10.5 氢原子及碱金属的能级	407
§ 10.6 原子光谱的精细结构	412
i) 轨道-自旋耦合, 碱金属光谱的精细结构	412
ii) 相对论修正, 氢光谱的精细结构	415

*§ 10.7 原子光谱的超精细结构	419
§ 10.8 外磁场中光谱线的分裂	424
i) 强磁场	425
ii) 弱磁场	427
*iii) 一般情况	429
§ 10.9 外电场中谱线的分裂	432
i) 弱电场中氢原子的一级斯塔克效应	433
ii) 一般情况	434
iii) 碱金属的斯塔克效应	438
习题	440

第三部分 全同粒子系及相对论波动方程

第十一章 全同粒子系	444
§ 11.1 交换对称与全同性原理	444
i) 一般概念	444
ii) 两电子系统的波函数	451
§ 11.2 全同粒子的散射	453
i) 0 自旋粒子的散射	453
ii) 非 0 自旋粒子的散射	455
§ 11.3 氦原子和氢分子	456
i) 氦原子	456
ii) 氢分子	459
习题	465
第十二章 二次量子化	466
§ 12.1 玻色系统的二次量子化	466
i) 粒子数表象	466
ii) 产生算符和消灭算符	467
iii) 用产生算符和消灭算符表示力学量	470
iv) 对易关系	473

v) 玻色系统与简谐振子的关系	476
§ 12.2 费密系统的二次量子化	477
i) 产生算符与消灭算符	477
ii) 用产生算符和消灭算符表示力学量	481
iii) 对易关系	482
§ 12.3 二次量子化与场量子化的关系	485
§ 12.4 应用举例	490
i) 带电粒子与电磁场的相互作用	490
ii) 一级近似, 自发跃迁	492
iii) 高阶近似, 费曼图	495
习题	497
第十三章 相对论波动方程	499
§ 13.1 克莱因-戈登方程	499
i) 克莱因-戈登方程	499
ii) 电荷守恒	500
iii) 非相对论近似	501
§ 13.2 自由粒子的狄拉克方程	502
i) 狄拉克方程	502
ii) 几率守恒	503
iii) 自旋角动量	504
§ 13.3 自由粒子狄拉克方程的解	506
§ 13.4 电磁场中的狄拉克方程	509
i) 自旋磁矩	509
ii) 轨道自旋耦合	513
§ 13.5 库仑场中狄拉克方程的精确解	515
i) 球坐标中分离变量	515
ii) 库仑场中径向方程的精确解	520
§ 13.6 狄拉克方程的对称性	524
i) 狄拉克方程的惯用形式	524

ii) 空间反演	525
iii) 时间反演	527
iv) 电荷共轭	528
v) 洛伦兹变换及电子自旋	530
习题	534
物理常数表	535

绪 论

量子论和相对论被视为近代物理学的两大支柱，它们是继经典物理学之后，人类认识自然的又一新的里程碑。

习惯上，人们把牛顿力学、热力学及经典统计、麦克斯韦的电磁理论等称为经典物理学，以区别于本世纪初发展起来的相对论和量子论。

相对论是关于高速物体运动规律的理论，量子论则描述了微观粒子的运动规律。量子论主要指量子力学，同时也包括在量子力学基础上发展起来的场的量子理论。

相对论和量子论是比经典物理学更为普遍的理论，经典物理学乃其特例。对于低速运动的宏观物体，相对论和量子论的结论将与经典物理学的一致。

本书正文从第一章开始，将对量子力学作系统的讲述。绪论中我们先简单回顾一下历史，然后对某些问题作些说明，作为进入正文的准备。

§ 0.1 经典物理学的困难及量子力学的产生

十九世纪末叶，面对经典物理学的辉煌成就，大多数物理学家相信，对自然界的最终描述已经完成，理论上不会再有新的发现，剩下的只是如何运用现有的理论把结果算得更精确些。

可是就在上世纪末、本世纪初，当物理学的研究扩展到高速微观领域时，经典物理学却遇到了一系列困难。为了克服这些困难，在高速领域中建立了相对论，在微观领域中则产生了量子力学。

经典物理在微观领域遇到的困难大体可分为以下三个方面：

① 经典物理学关于能量连续变化的概念不能解释黑体辐射的能谱以及比热对温度的依赖；② 光的波动说不能解释象光电效应这类光与物质相互作用的问题；③ 经典物理学不能给出原子的稳定结构，也不能说明原子光谱的规律。

下面我们就来分别讨论这些问题。

i) 黑体辐射与能量子假说

经典物理学的一个优美而普遍的结论就是能量按自由度均分。它是能量连续变化的必然结果。根据能量均分定理可以计算热平衡时空腔中辐射场的能量分布，进而即知黑体辐射的能谱。计算指出〔见第五章的(5.3-31c)式〕，体积为一单位的空腔，频率在 $\nu - \nu + d\nu$ 之间，电磁场的独立振动的数目为

$$\mathcal{J}_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} d\nu \quad (0.1-1)$$

根据能量均分定理，每一振动方式将具有平均能量

$$\bar{E} = 2 \times \frac{1}{2} kT$$

由此即得空腔的能密度

$$\rho_\nu d\nu = kT \cdot \mathcal{J}_\nu = kT \cdot \frac{8\pi\nu^2}{c^3} d\nu \quad (0.1-2)$$

上式称为瑞利-金斯公式。对于低频，它与实验一致，高频则与实验不符。且因频率没有上限，当 $\nu \rightarrow \infty$ 时， ρ_ν 亦趋无穷。此外还因 ρ_ν 与温度成正比，故空腔的热容量亦为无穷，从而导致矛盾。这就是所谓的“紫外灾难”。

为了克服以上困难，1900年普朗克提出了能量子假说。他认为物质与辐射场的能量交换是以所谓“能包”的形式，一份一份地进行的。每份的大小 ϵ ，称为一个能量量子。由于这种量子化的交换方式，不论是物质体系还是辐射场，其能量的变化都是不连续的。由此，经典的能量均分定理即可得到修正。经过简单的计

算, 可得电磁场的每一振动方式的平均能量为

$$\bar{E} = \frac{e}{e^{e/hT} - 1} \quad (0.1-3)$$

由此得出空腔的平均能密度

$$\rho_\nu d\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \cdot \frac{e}{e^{e/hT} - 1} d\nu \quad (0.1-4)$$

此外, 维恩曾从热力学的普遍定理出发, 证明了热平衡时, 空腔的能密度必须具有如下形式:

$$\rho_\nu d\nu = \nu^3 F\left(\frac{\nu}{T}\right) d\nu \quad (0.1-5)$$

与(0.1-4)比较, 可知 e 必须与 ν 成正比, 即有

$$e = h\nu \quad (0.1-6)$$

其中 h 为比例常数, 称为普朗克常数. 其值由实验测得为 $h = 6.626176(36) \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$. 量子力学中更常用的是普朗克常数

$\hbar \equiv \frac{h}{2\pi} = 1.0545887(57) \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$. 利用(0.1-6), (0.1-4)可写作

$$\rho_\nu d\nu = \frac{8\pi h}{c^3} \frac{\nu^3}{e^{h\nu/hT} - 1} d\nu \quad (0.1-7)$$

此即普朗克公式, 它与实验完全符合.

此外能量均分定理亦不能解释物质的比热对温度的依赖, 也不能说明原子中众多的电子何以对比热没有贡献. 然而只要假定能量取分立值, 一切问题便迎刃而解. 若电子的能量取分立值, 且间隔很宽, 在通常温度下它处于激发态的几率就很小, 实际上只能呆在基态. 其热运动的平均能量即等于基态能量, 为一常数, 故而对比热没有贡献. 对于这种情况, 我们称有关的自由度被冻结. 对于一般物质, 若能级取分立值, 温度降低时, 某些自由度将被冻结, 温度升高时, 原先被冻结的自由度将被激发, 这样即可解释物质的比热随温度的变化.

ii) 光电效应及康普顿散射

经典物理在解释光电效应时也遇到了困难。在光电效应中，光电子的速度与光的强度无关，只依赖于光的频率，而光的强度只决定光电子的多少。当光的频率低于某一确定值时，再强的光也不能打出电子。这一情况不能用经典理论解释。按照经典理论，光是电磁波，其能量决定于光的强度，因此，光电子的速度应由光的强度而不是光的频率决定，任何频率的光，只要足够的强，应该都能打出电子，然而事实却非如此。

为了解释光电效应的规律，1905年，爱因斯坦发展了普朗克的能量子假说，提出了光的量子理论。他认为光除了波动性外，同时还具有粒子性，光粒子被称为光子，实际上，它就是普朗克能量子的携带者。光的强度决定光子的多少，每个光子的能量为 $h\nu$ ，只与光的频率有关。当光照射到金属表面时，电子吸收一个光子 $h\nu$ ，克服金属的脱出功 W ，然后飞离金属。根据能量守恒定律，光电子的速度应满足下列爱因斯坦方程：

$$\frac{1}{2}mv^2 = h\nu - W \quad (0.1-8)$$

光电子的数目应与入射光子数成正比，故正比于光的强度，而光电子的速度则只与单个光子的能量有关，因而只决定于光的频率。当光子的能量 $h\nu < W$ 时，光将不能打出电子。这样便很好地解释了光电效应的规律。

爱因斯坦方程(0.1-8)完全为实验所证实。以 ν 为横坐标，以光电子的动能为纵坐标，实验结果如图0.1-1所示。动能与 ν 基本上成线性关系，测定直线的斜率即可由光电效应确定普朗克常数 h 。

光的量子理论得到了康普顿散射实验的进一步证实。很早就发现 x 射线被物质散射时，波长有所增加，但当时对此并未重视。1922—1923年，康普顿从光量子理论出发，正确地解释了这