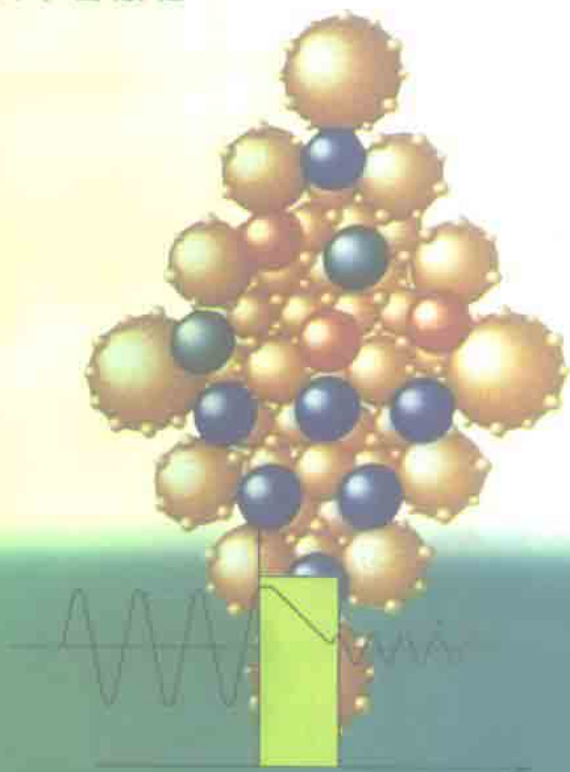


理论物理学基础教程丛书

● 苏汝铨 编著

● 复旦大学出版社



量子力学

理论物理学基础教程丛书

量子力学

苏汝铿 编著

复旦大学出版社

责任编辑 龚少明
责任校对 马金宝
理论物理学基础教程丛书
量 子 力 学
苏汝铨 编著

出 版 复旦大学出版社
(上海国权路 579 号 邮政编码 200433)
发 行 新华书店上海发行所
印 刷 复旦大学印刷厂
开 本 850×1168 1/32
印 张 21
字 数 546,000
版 次 1997 年 6 月第 1 版 1997 年 6 月第 1 次印刷
印 数 1—3 000
书 号 ISBN 7-309-01831-1/O · 174
定 价 20.00 元

本版图书如有印订质量问题,请向承印厂调换。

内 容 简 介

本书是复旦大学物理系理论物理教研室组织编写的《理论物理学基础教程丛书》中的一种,着重阐述量子力学的基本原理、基本方法和广泛的应用。全书 11 章,分别讲述量子论基础、力学量和算符、表象理论、近似方法、自旋和角动量、散射理论、多体问题、路径积分、相对论量子力学、隐变数理论等。本书还就朗道坠落、相干态、贝利位相、卡什米效应、超导和超流微观理论等前沿应用问题作了深入浅出的介绍。各章都有一定量的例题、习题,供读者练习,用以检验自己对概念的理解和熟练应用各种数学方法。

本书适用于物理类本科生和研究生作教材和教学参考书,也适宜于相关专业师生和科技研究人员阅读。

序

《理论物理学基础教程丛书》包括《经典力学》、《数学物理方法》、《经典电动力学》、《量子力学》和《统计物理学》五种,这是根据我们多年来在复旦大学物理系教学实践的基础上编写的。我们在编写过程中力求注意以下几个问题:

1. 理论联系实际。各门学科虽有自身的“纵向”逻辑体系,但这种体系的严格性不宜过分强调,以免相对忽视了各种具体的体系和物质属性的综合分析。物理讲的是“物”之“理”,我们一定要避免有“理”无“物”的毛病。加强各门学科之间的“横向”联系,则是克服这种毛病的有效方法之一。

2. 在确保概念正确的基础上加强计算的训练。事实上,理论物理的正确概念只有通过大量计算才能真正学到手。经验告诉我们,必须大声疾呼地对我们的学生说:要动手算,多算算,算了再多想想。

3. 反映科学的新进展。这一点要在基础课程里做到是相当困难的,但是又非做不可。为此目的,我们删除了一些较陈旧的内容,对那些最基本、最重要而又相当成熟的内容,则努力注意体系的改革和观点的提高,同时在保证准确性和稳定性的前提下,适当增加新的内容,以较快和较多地反映近代物理学的发展。

4. 我们希望适应性广一些。这套教程希望不仅可以作为大学生的教学用书,而且可以作为教师和研究生的参考书。为此目的,我们在编写过程中努力做到简明扼要,条理清楚,使读者查阅起来感到比较实用和方便。

在复旦大学出版社的支持下,这套教程将陆续与读者见面,但

限于我们的水平,书中的缺点和错误在所难免,希望读者批评指正。

复旦大学物理系理论物理教研室

1990 年 4 月

作 者 的 话

本书是根据作者从 60 年代初开始在复旦大学物理系为大学生开设量子力学课程,为研究生开设高等量子力学课程的讲稿补充修改而成。

量子力学是物理系学生的一门重要的基础理论课程,也是物理学工作者从事现代物理学研究不可缺少的基本知识和基本训练。它的基本概念除了和经典力学不同之外,还视量子力学的各种表述形式的不同而各异。本书将分别就波动力学、矩阵力学和路径积分三种概念完全不同,但结果又彼此等价的表述形式展开讨论,力求对一些基本概念,包括它的适用范围、相互联系、各种推理作深入浅出的阐述,希望能免除读者难以捉摸之苦,便于掌握量子力学内容。量子力学的另外一个特点是它的应用范围非常广泛,在固体物理、介观物理、原子分子物理、表面物理、原子核物理、天体物理,甚至化学、生物学等各个领域中都有许多精彩的应用。当然,任何一本量子力学书都不可能囊括所有这些应用,而只能按需要和可能作一些挑选。作者历来认为,一本好的教材,不仅应该是一本好的教学用书,而且也应该是一本好的参考书。它不仅需要阐述本门课程的基础知识,还应该介绍一些与本门课程有关的现代物理题材,以便逐步引导学生走向现代科学的前沿。当然,限于可能和篇幅,只能挑选一些有兴趣的内容。在这方面,本书介绍了朗道坠落、相干态、形式微扰理论、密度矩阵、阿哈朗诺夫-玻姆效应、贝利位相、卡什米效应、跃迁矩阵和散射矩阵、扭曲波近似、超导微观理论、超流和近似二次量子化方法、哈特利-福克近似、克莱因佯谬、MIT 袋模型、转动算符、对称性特别是手征不变性等内容,以供读者参考。在本书的最后一章,我们还对量子力学中在物理上争论颇多的问题,包括爱因斯坦-潘多尔斯基-罗森佯谬、贝尔不等式、隐

变数理论等作了一些简单的介绍。

就作者看来,量子力学和高等量子力学之间并没有什么本质的界线或者严格的分水岭,无非是视教学时数的多少,学生水平的高低而对量子力学的内容作不同的取舍和安排。前者偏重于基本知识、基本理论,后者可以涉及更多的应用和更深刻的理论探讨。但是,高等量子力学既不同于量子统计,它无需考虑温度的影响;也不同于量子场论,它不必讨论场的量子化。本书的选材基本上是按照上面这个原则进行的。作为参考,带“*”号的章节或许可以留在高等量子力学中讲授。另外,各章所附的习题也并不需要学生每道题目都做,因为有些习题,特别是注明出处的习题,其实就是一篇学术论文。附在这里的原因无非是希望开阔学生的视野,以便有能力、有兴趣的学生能有进一步钻研的余地。

作者特别感谢周世勋教授,1960年,从作者踏入复旦校园参加工作开始,就有幸在周世勋教授的指导和主持下,参加量子力学课程的教学和教材的编写工作。他精彩的讲课内容和严谨的治学态度让作者受益良多。

作者感谢历年来在复旦大学参加过本门课程教学的同事和学习过本门课程的学生。他们的讨论、质疑以及对许多问题的有趣回答常常使作者深受启发。事实上,收录在本书习题中的大部分论题,就是在和这些学生的讨论、研究中完成的。

最后,限于作者水平,书中错漏或不妥之处在所难免,诚恳地希望读者批评指正。

苏汝铿

1996年春于复旦大学

目 录

序	1
作者的话	1
第一章 量子论基础	1
§ 1.1 经典物理学的困难	1
§ 1.2 光量子和普朗克-爱因斯坦关系	6
§ 1.3 玻尔的量子论	11
§ 1.4 波粒二象性和德布罗意波	13
本章小结	16
习 题	17
第二章 波动力学基础	18
§ 2.1 波函数的统计解释	18
§ 2.2 态叠加原理	21
§ 2.3 薛定谔方程	25
§ 2.4 一维方势阱	35
§ 2.5 一维谐振子	41
§ 2.6 一维薛定谔方程的普遍性质	48
§ 2.7 一维可解势	57
§ 2.8 势垒贯穿	65
§ 2.9 三维薛定谔方程的普遍性质, 朗道坠落	70
§ 2.10 氢原子	80
§ 2.11 三维可解势	92
§ 2.12 薛定谔方程的经典极限	99
本章小结	102
习 题	104

第三章 矩阵力学基础(Ⅰ)——力学量和算符 109

§ 3.1 力学量的平均值	109
§ 3.2 算符的运算规则	114
§ 3.3 厄米算符的本征值和本征函数	124
§ 3.4 连续谱本征函数	133
§ 3.5 量子力学中力学量的测量值	138
§ 3.6 不确定性原理	146
§ 3.7 力学量随时间的变化	153
§ 3.8 运动积分, 宇称算符	155
* § 3.9 对称性和守恒律	166
本章小结	171
习 题	172

第四章 矩阵力学基础(Ⅱ)——表象理论 176

§ 4.1 态和算符的表象表示	176
§ 4.2 矩阵力学表述	183
§ 4.3 幺正变换	188
§ 4.4 狄拉克符号	198
§ 4.5 线性谐振子和占有数表象	204
§ 4.6 受迫谐振子和相干态	214
* § 4.7 密度矩阵	224
* § 4.8 薛定谔图景和海森堡图景	228
本章小结	232
习 题	234

第五章 近似方法 237

§ 5.1 非简并定态微扰论	237
§ 5.2 简并情况下的定态微扰论	247
§ 5.3 变分法	255
§ 5.4 含时微扰理论	265
§ 5.5 跃迁几率和费米黄金规则	270

§ 5.6 含时微扰论与定态微扰论的关系	277
§ 5.7 光的发射和吸收, 选择定则	279
§ 5.8 相互作用图景和形式微扰理论	286
§ 5.9 绝热近似和盖尔曼-劳定理	290
§ 5.10 WKB 近似	295
本章小结	306
习 题	308
第六章 自旋和角动量	314
§ 6.1 电子自旋	314
§ 6.2 电子的自旋算符和自旋函数	317
§ 6.3 粒子在电磁场中的运动, 泡利方程	324
§ 6.4 朗道能级	330
§ 6.5 两个角动量的耦合	333
§ 6.6 克莱布希-高登系数	341
§ 6.7 光谱线的精细结构	349
§ 6.8 塞曼效应	354
§ 6.9 自旋单态和自旋三重态	360
§ 6.10 转动算符	363
§ 6.11 阿哈朗诺夫-玻姆效应	369
§ 6.12 贝利位相	373
* § 6.13 真空的能量和卡什米效应	378
本章小结	382
习 题	383
第七章 散射理论	389
§ 7.1 散射问题的一般描述	390
§ 7.2 分波法	395
§ 7.3 分波法示例	402
§ 7.4 格林函数法和玻恩近似	408
§ 7.5 质心坐标系和实验室坐标系	418
§ 7.6 跃迁矩阵(T 矩阵)	422

* § 7.7 李普曼-许温格方程	425
§ 7.8 戴逊方程	429
* § 7.9 散射矩阵(S 矩阵)	432
* § 7.10 复势场中的散射和光学势	439
* § 7.11 非弹性散射的一般理论	442
* § 7.12 扭曲波近似	447
本章小结	449
习 题	451
第八章 多体问题	455
§ 8.1 全同粒子的性质	456
§ 8.2 全同粒子的散射	463
§ 8.3 氦原子	468
§ 8.4 分 子	472
§ 8.5 二次量子化	480
* § 8.6 哈特利-福克平均场近似	490
§ 8.7 托马斯-费米方法	495
§ 8.8 超导电理论	498
§ 8.9 超流理论和博戈留博夫近似二次量子化方法	506
本章小结	511
习 题	512
*第九章 路径积分	517
§ 9.1 经典作用量和量子力学振幅	518
§ 9.2 路径积分	522
§ 9.3 高斯积分	531
§ 9.4 路径积分和薛定谔方程	535
§ 9.5 路径积分的正则形式	542
本章小结	546
习 题	546
*第十章 相对论量子力学	548
§ 10.1 克莱因-高登方程	549

§ 10.2 狄拉克方程	554
§ 10.3 狄拉克方程的自由粒子解	559
§ 10.4 电磁场中的狄拉克方程	566
§ 10.5 狄拉克方程的协变形式	569
§ 10.6 鞍力场中的狄拉克方程	576
§ 10.7 狄拉克方程的库仑场解	584
§ 10.8 克莱因佯谬	588
§ 10.9 MIT 口袋模型	598
§ 10.10 手征对称性	603
本章小结	607
习 题	609
* 第十一章 量子力学和隐变数理论	612
§ 11.1 爱因斯坦-潘多尔斯基-罗森佯谬	613
§ 11.2 冯·诺曼定理, 格里森定理和隐变数理论	621
§ 11.3 贝尔不等式	628
附录 I 物理常数表	635
附录 II δ 函数	636
附录 III 合流超比函数和超比函数	638
附录 IV 一些常用公式	642
答 案	648

第一章 量子论基础

§ 1.1 经典物理学的困难

19 世纪末 20 世纪初,经典物理学,主要是经典力学、热力学和经典统计物理学、经典电动力学,已经发展得相当完善。比方,速度远小于光速的物体的机械运动遵从牛顿力学规律;电磁现象满足麦克斯韦方程;光的现象有光的波动理论;特别是当时已认识到热辐射和光辐射都是电磁波,还提出了热辐射满足的基尔霍夫(G. Kirchhoff)定律和斯忒藩(J. Stefan)定律,证实黑体辐射场的能量密度与温度的四次方成正比。对于热现象,除了已经有了非常系统的热力学理论外,还有玻耳兹曼、吉布斯等人提出的统计物理学。经典物理学的大厦已经建立得相当完美了。

但是,在和实验进一步对比的过程中,也出现了一些困难,而且这些困难,在经典物理的范畴内是无法解释的。这主要表现在:

1. 黑体辐射*

任何物体总在吸收投射在它身上的辐射。物体吸收的辐射能量与投射到物体上的辐射能之比称为该物体的吸收系数。一般地,物体只吸收投射到它表面上的部分能量,吸收系数小于 1。如果一个物体,能吸收投射到它表面上的全部辐射,即其吸收系数为 1 时,则称这个物体为绝对黑体,简称黑体。一个开有一个小孔的空腔可近似视为黑体。因为一旦光线通过小孔射入空腔后,就很难再通过小孔反射出来。

* 关于黑体辐射和比热的详细论述可参阅苏汝铿:《统计物理学》,复旦大学出版社,1990. § 4.1, § 4.2, § 4.5, § 4.6.

另一方面,由于腔壁具有一定温度,它还会发出热辐射。当空

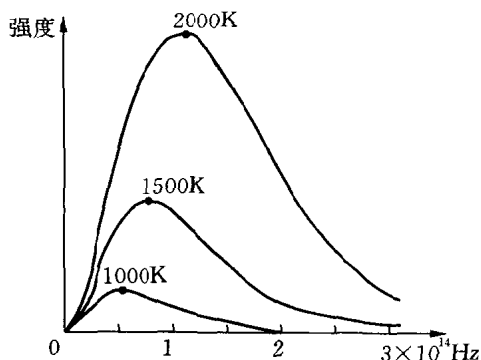


图 1.1.1 黑体辐射

腔和内部的热辐射达到平衡后,实验发现,在频率 $\nu \rightarrow \nu + d\nu$ 之间的辐射能量密度 $\rho_\nu d\nu$ 只与频率 ν 和绝对温度 T 有关。在不同温度下, ρ_ν 随 ν 的变化曲线如图 1.1.1 所示。实验曲线存在维恩(W. Wien)位移:辐射能量密度按波长分布的最大

值 λ_m 与 T 的乘积为常数:

$$\lambda_m T = 0.2898 \text{cm} \cdot \text{K} \quad (1.1.1)$$

而且满足

$$E = \int_0^\infty \rho_\nu d\nu = aT^4 \quad (1.1.2)$$

其中 a 是常数。

但是,利用经典热力学和电动力学,维恩给出的辐射能量密度的经验公式是

$$\rho_\nu d\nu = C_1 \nu^3 e^{-C_2 \nu / T} d\nu \quad (1.1.3)$$

(1.1.3) 式称为维恩公式,式中 C_1, C_2 是经验参数。与实验结果比较后发现,维恩公式只适用于高频区。

几年后,利用经典统计物理学和电磁理论,瑞利(J. W. Rayleigh)和金斯(J. H. Jeans)推导出公式

$$\rho_\nu d\nu = \frac{8\pi}{c^3} k T \nu^2 d\nu \quad (1.1.4)$$

式中 k 是玻耳兹曼常数, c 是光速。(1.1.4) 式称为瑞利 - 金斯公

式。它只在低频区与实验相符。在高频区,当 $\nu \rightarrow \infty$ 时, $\rho_\nu \rightarrow \infty$, 而且能量密度发散,

$$E = \int_0^\infty \rho_\nu d\nu = \frac{8\pi}{c^3} kT \int_0^\infty \nu^2 d\nu \rightarrow \infty \quad (1.1.5)$$

这个结果称为紫外灾难。

2. 光电效应

1888年,赫兹(H. Hertz)在验证电磁波存在的实验中,发现当用紫外光照到火花隙的负极上时,放电比较容易发生。1897年汤姆孙(J. J. Thomson)通过气体放电和阴极射线的研究发现电子后,人们逐渐认识到这种现象是由于紫外光照射到金属表面上,金属中的电子吸收了光的能量而从金属表面逸出所致。这种逸出的电子称为光电子。对于表面光洁的金属材料,光电效应的实验结果是:

(i) 存在临界频率 ν_0 , 当入射光的频率 $\nu < \nu_0$ 时,无论光的强度多大,都无光电子逸出。只有在 $\nu \geq \nu_0$ 时,即使光的强度较弱,但只要光照到金属表面上,几乎在 10^{-9} s 的极短时间内,就能观测到光电子。

(ii) 出射的光电子的能量只与入射光的频率 ν 有关,而与入射光的强度无关。

(iii) 入射光的强度只影响光电流的强弱,即只影响在单位时间内由单位面积上逸出的光电子的数目。

显然,这些实验结果,特别是(i)和(ii),无法用经典电磁理论解释。因为按经典电动力学,光是电磁波。电磁波的能量决定于它的强度,即只与电磁波的振幅有关,而与电磁波的频率无关。而要释放光电子,显然需要有足够的能量。

3. 原子的线状光谱

1885年,巴耳末(J. J. Balmer)通过对氢的光谱线分析研究后,发现氢原子可见光的光谱线满足经验公式

$$\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c} = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), n = 3, 4, 5, \dots \quad (1.1.6)$$

$\tilde{\nu}$ 为波长的倒数,称为波数。 R_H 称为里德伯(J. R. Rydberg) 常数,数值上等于 109677.581cm^{-1} 。以后又陆续发现了其他线系,1889年,里德伯把氢的所有谱线归纳为一个里德伯方程,即

$$\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} = R_H \left[\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n'^2} \right] = T(n) - T(n') \quad (1.1.7)$$

式中, $n = 1, 2, 3, \dots$; 对于每一个 n , 有 $n' = n + 1, n + 2, n + 3, \dots$ 构成一个谱线系。 $T(n)$ 称为光谱项。由(1.1.7)式可见,如果光谱中有频率为 ν_1 和 ν_2 的两条谱线,则也有频率为 $\nu_1 + \nu_2$ 及 $|\nu_1 - \nu_2|$ 的谱线。这个结果称为里兹(W. Ritz) 的并合原则。

原子的线状光谱用经典理论也是无法解释的。因为按卢瑟福模型,原子中电子绕原子核运动。这是一种加速运动。但按经典电动力学,加速电荷应不断发出辐射。于是电子不断损失能量。而且,加速电荷发出的辐射的频率是连续分布的,不可能产生线状光谱。此外,按电动力学,若体系发出频率为 ν 的波,则它也可能发出频率为 ν 的整数倍的其他谐波。这个结论也与并合原则不符。

4. 原子的稳定性

原子结构的卢瑟福模型在经典理论中是无法理解的。因为电子既然绕原子核运动,则在这一加速运动过程中,由于辐射能量,必然使电子绕核运动的轨道变小。最后“落到”原子核中去。也就是说,按经典理论,卢瑟福的原子模型是不稳定的。这种原子最后必然坍缩成一团。但是现实世界中原子是稳定的。经典理论无法解释这个实验事实。

5. 比 热

经典统计物理的比热理论建立在能量均分定理的基础上。在和实验比较后发现,经典的比热理论存在着下述困难:

(i) 固体比热的杜隆-珀蒂(Dulong-Petit) 定律

$$C_P \cong C_V = 3R \quad (1.1.8)$$

只在常温下与实验相符。在极低温下,固体比热服从德拜(P. Debye) T^3 定律: C_P 与 T^3 成正比。