

· 物理学教程 ·

夏学江 史斌星 主编

(第二版)

# 量子物理学

史斌星 编著

清华大学出版社

清华大学教材  
物理学教程

主编 夏学江 史斌星

量子物理学

(第二版)

(原子、分子、原子核、粒子)

史斌星 编著

清华大学出版社

1992

## 内 容 简 介

《物理学教程》是清华大学教材,分为《力学与热学》、《电磁学》、《波动与光学》、《量子物理学》及《统计与量子力学基础》等五个分卷出版。

《量子物理学》分两部分:一部分为基本内容,包括微观粒子二象性、原子与分子光谱等;另一部分为选修内容,包括光谱线的宽度以及原子核、粒子等。

第二版对原书进行了较多的修改,增加了普朗克黑体辐射公式推导、卢瑟福模型、多光子光电效应、核力与核模型等章节,以及同步辐射、自由电子激光器、光谱的超精细结构等应用性课题。

书末附有习题答案,对于带\*号题给出了题解或提示。

本书可作为理科类、师范类和工科偏理学科的原子物理学教材,也可作为科技人员参考书和自学用书。

(京)新登字 158 号

量子物理学  
(第二版)  
试星、编著

清华大学出版社出版  
北京 清华园  
清华大学印刷厂印刷  
新华书店总店科技发行所发行

☆

开本:850×1168 1/32 印张:13 1/8 字数:342千字

1992年12月第2版 1992年12月第1次印刷

印数:0001—4000

ISBN 7-302-01047-1/O·127

定价:4.05元

## 第二版前言

本书自 1982 年出版以来,陆续收到许多来信,其中大多数是提出问题寻求答案的,但从这些问题中最可以看到读者的要求.因此,趁这次再版的机会,作了较大的修改.一方面为了更好地满足读者的需要,另一方面也可将这些年来出版的国内外教材的优点以及科学上的新成就尽可能地吸收进来,从总的方面来说,与原来版本比较,新版本作了下列改动:

(1)为了与本教程其它各分册的书名一致,将原书名“量子物理”改成“量子物理学”.在内封面的书名下边用括号标明书中包含:原子、分子、原子核、粒子等各部分,以期说明本书内容与传统的“原子物理学”的内容基本一致.

(2)为了使叙述更加精炼、准确、易懂以及前后连贯,除极少数章节外,几乎重写了全部内容,除了文字上的加工,许多地方在内容上也作了调整和充实.例如,增加了普朗克黑体辐射公式的推导、原子的核式结构、能级的简并度、核力与核模型、多光子光电效应以及发生康普顿效应与光电效应的几率等章节;此外还增加了同步辐射、自由电子激光器、光谱线的超精细结构、重离子束应用等与现代物理技术发展密切相关的内容.对于问题较多、不易弄懂的地方也作了更多的说明.虽然增加了一些内容,由于叙述方式的改进,总的篇幅却减少了.

(3)取消了“量子跃迁理论及应用”一章,有关内容一部分放在新设的“光谱线的宽度和激光”一章中,另一些内容分散在“分子光谱”、“原子核”各章中.

(4)为了满足部分读者的要求,带 \* 号的习题都给了题解或详

细提示。

北京大学陈熙谋教授和清华大学黄天麟、邓新元教授对本书的修改提出了宝贵的意见，在此表示衷心的感谢。作者还在此对关心本书的广大读者表示感谢，对于他们的来信虽然未能一一答复，但在这次修订工作中尽量考虑了他们的愿望。

史斌星

# 物理学教程

## 序 言

本书是参照我国通用的高等学校理科类与工科类物理课教学大纲,作为一套普通物理教材而编写的,希望它可供理、工科各专业使用或参考.本书的大部分内容曾在清华大学物理学时较多的几个专业以讲义的形式试用;现在经过修改、重写后计划分为《力学与热学》、《电磁学》、《波动与光学》、《量子物理学》及《统计与量子力学基础》等五个分卷陆续出版.

本书编者的共同愿望是这套书能帮助读者较好地掌握物理学的基本内容.我们力图把物理学的基本定律、概念、方法准确地叙述清楚;力求帮助读者分清主次,克服学习难点;对于容易产生误解的地方也力图给予必要的说明.有些问题虽然在学生学习中容易产生疑问,但因属于细节问题,常常没有包括在教材中.本书对某些这样的问题也试图在小字段落、脚注、加\*号章节或附录中给以一些说明,供读者有余力时参考.

物理学是研究自然界最基本规律的一门科学,学习物理和世界观的建立有密切的联系.本书在内容的安排与阐述中力求贯彻辩证唯物主义思想,帮助读者获得对客观世界的正确认识.在人们对物理概念与规律的认识过程中,实验与理论的结合起着极重要的作用,本书在阐明原理概念时,特别是在说明近代物理概念的发展时,也希望能将这一情况反映出来,对于若干重要的实验以及它们与建立理论、发展概念的关系给予较详细的说明.

物理学日新月异的发展使它在现代科学技术领域中有着越来越广泛和重要的应用. 在着重阐明基本原理的基础上, 我们也尽可能地 向读者介绍一些物理原理的应用和物理学新近发展的材料, 使读者增加学习兴趣, 开阔眼界和提高理解新技术及其应用的能力.

为了使本书有较大的适应性, 我们把内容作了如下安排, 凡是不带 \* 号的各章节属于最基本的内容, 可独立于带 \* 号的章节学习. 学时较少的各专业只需学习这些章节. 理科专业或学时较多的工科专业则可用带 \* 号章节、小字段落、附录等作为补充内容. 从全书看, 五个分卷前三卷是基本教材, 我们希望对于一般理科和工科各专业都能适用或可供参考; 第四卷可作基本教材也可作选修课教材, 视专业而定; 最后一卷属于选修课教材.

在编写本书时, 我们力图使它便于自学. 我们的体会是: 学生在学习中不仅应该获得知识与应用知识, 还应该锻炼与提高学习的能力. 因此在教学中必须注意培养与提高学生的学习能力, 其中也包括培养与提高学生读书的能力. 我们希望这套教材可供学生独立阅读, 有助于培养学生的读书习惯与能力. 另一方面, 我们认为, 如果教材便于自学, 则明确了恰当的学习要求与份量后, 就可以在课堂上详讲某些部分, 略讲某些部分, 再留一些部分给学生自学. 这会有利于启发与指导学生, 培养学生正确的学习习惯. 此外, 我们也希望这套书能供在职科技人员和自学的青年使用.

作习题是学习理论的重要环节. 本书各分卷中都附有一定数量的复习思考题和习题. 除基本的习题外, 我们还选编了若干有一定难度的题以反映提高的要求(有的题是参考了国内外研究生入学试题选编的). 书末附有习题答案.

本书各分卷一律采用国际单位制. 物理量的名称和符号也尽可能地符合国际标准化组织(ISO)提出的国际标准.

在本书的编写过程中得到了许多同志的热情帮助. 刘绍唐教

授审阅了全部内容,从编写的指导思想到具体内容都提出了宝贵的意见;清华大学物理系的许多位年长同志如孟昭英、徐璋本、何成钧、徐亦庄、张礼等教授分别承担了本书某些分卷或某些部分的审阅工作;还有许多同志分别在各分卷中为编写习题、核对答案、制图、抄稿、出版等各方面作了大量的工作;在此对他们表示衷心的感谢.

在编写本书各分卷时,都参考了若干现有的教材,在许多地方得到启发与教益.这里难于一一指出,在此一并致谢.

由于编者能力有限,编写时间仓促,书中一定有不少缺点、错误,欢迎批评指正.

夏学江

史斌星

1982年于清华大学



## 编者的话

本书是清华大学编写的“物理学教程”的一个分卷,主要包括光与微观粒子二象性、原子与分子光谱、原子核与基本粒子等内容.

在这部分内容中如何对待玻尔、索末菲等提出的旧量子论是一个教学上值得探讨的问题.旧量子论不仅在历史上起过重要作用,而且从教学角度看,有助于初学者从经典物理过渡到现代量子理论.但另一方面它毕竟只是一种过渡性理论,对它也不宜过分强调.基于这一考虑,本书中仅把玻尔理论作为引导学员进入量子领域的一座桥梁,通过它帮助学员建立能量、角动量量子化等概念,而不作详细的讨论.

本书没有引入薛定谔方程,准备把它放在本教程另一分卷“统计与量子力学基础”中讨论.但书中尽量采用量子力学得出的关于微观粒子运动的观点来分析问题,例如加强了几率波的概念,并用它来分析测不准关系、电子衍射等问题,角动量合成的引入也采用了量子力学中常见的叙述方式等.我们感到不增加数学难度而加强现代量子论的概念是值得尝试的.

本书中较为详细地介绍了激光、喇曼效应、核磁共振,穆斯堡尔效应、光谱线的宽度等有关量子理论的应用课题,这些内容将有助于加深对理论的理解.

量子物理的发展过程充分说明,能够突破原有局限观点的束缚,善于根据实验事实提出新观点建立新学说的重要意义.本书对普朗克量子论的提出、玻尔原子理论的建立、德布罗意假设的提出以及穆斯堡尔效应的发现等都作了一定的介绍,希望能对读者有

所启发.

学习这本书前,读者应先学过力学、热学与分子物理学、电磁学、波动与光学等方面内容,数学上除微积分外没有其它先修要求.

从教学上看本书可分成两部分.第一至五章为第一部分,包括微观粒子二象性、原子与分子光谱等.这是本书的基本内容.第六至八章为第二部分,可作为选修内容,其中包括光谱线的宽度和各种量子过程的应用,以及原子核、基本粒子等内容.

除习题答案外,对于带\*号的题还给了提示,提示放在书的末尾而不是随题目给出,这是由于不希望让读者刚读完题目就看到提示.带\*号的题并非全是难题,而是编者感到有必要加一个提示的那些题.

刘绍唐同志审查了本书,徐亦庄同志审查了本书部分内容,张礼同志、张培林同志、张玫同志分别审查了有关章节,他们都提出了许多宝贵意见,在此对这些同志表示衷心感谢.

李庆霖、邓新元、张泊静同志校对了习题和答案,阎魁恒、陈福华、王建纬同志制作了全部插图,对于他们的大力协助也表示衷心感谢.

# 目 录

引 言 .....	1
<b>第一章 微观粒子的二象性 .....</b>	<b>3</b>
§ 1.1 黑体的热辐射 .....	3
1.1.1 热辐射现象 .....	3
1.1.2 黑体 .....	5
1.1.3 黑体辐射的实验规律 .....	6
1.1.4 普朗克黑体辐射公式 .....	8
1.1.5 计算举例 .....	11
§ 1.2 光电效应 .....	13
1.2.1 光电效应的实验规律 .....	13
1.2.2 经典理论的困难 .....	15
1.2.3 爱因斯坦的假设 .....	15
1.2.4 光子 .....	16
1.2.5 多光子光电效应 .....	18
1.2.6 光电效应的应用 .....	20
§ 1.3 康普顿效应 .....	21
1.3.1 X 光的散射 .....	21
1.3.2 康普顿散射公式 .....	23
1.3.3 发生康普顿效应与光电效应的几率 .....	25
§ 1.4 实物粒子的波动性 .....	26
1.4.1 德布罗意假设 .....	26
1.4.2 德布罗意波长计算 .....	27
1.4.3 戴维孙和革末实验 .....	28
1.4.4 汤姆逊实验 .....	32
1.4.5 约恩孙的实验 .....	33
§ 1.5 测不准关系 .....	35

1.5.1	单缝衍射的启示	35
1.5.2	波动性的判据	38
1.5.3	禁锢粒子的能量	39
1.5.4	波列长度与单色性	39
* § 1.6	几率波	40
1.6.1	双缝干涉实验提出的矛盾	40
1.6.2	玻恩的假设	41
* § 1.7	基尔霍夫定律	42
1.7.1	平衡腔内的辐照度	43
1.7.2	辐射本领与吸收率的正比关系	43
1.7.3	有效辐射	44
* § 1.8	普朗克黑体辐射公式的推导	45
1.8.1	经典振子的平均能量	45
1.8.2	普朗克振子的平均能量	45
1.8.3	状态密度	46
1.8.4	瑞利-金斯公式的推导	47
1.8.5	单色辐射本领的推导	48
* § 1.9	波包与群速度	49
1.9.1	经典波的启示	49
1.9.2	相速度与群速度	50
1.9.3	德布罗意波的群速度	52
* § 1.10	电子在平面点阵的衍射	53
1.10.1	一维衍射	53
1.10.2	二维衍射	54
	习题一	57
<b>第二章</b>	<b>原子的模型和玻尔理论</b>	<b>62</b>
§ 2.1	原子的核式结构	62
2.1.1	汤姆逊模型	62
2.1.2	卢瑟福模型	64
2.1.3	卢瑟福散射公式和散射截面	66

2.1.4	卢瑟福模型的验证	68
2.1.5	背散射的应用	69
§ 2.2	氢原子光谱和玻尔理论	71
2.2.1	氢光谱的实验规律	71
2.2.2	玻尔的基本假设	74
2.2.3	玻尔的氢原子学说	75
2.2.4	对氢原子光谱的解释	78
2.2.5	核运动的影响	81
§ 2.3	夫兰克-赫兹实验	83
§ 2.4	量子力学对玻尔理论的修正	88
2.4.1	索末菲的椭圆轨道	88
2.4.2	玻尔理论的历史作用	91
2.4.3	量子力学的修正	94
§ 2.5	原子的激发	96
2.5.1	实物粒子的碰撞激发	96
2.5.2	热激发	97
2.5.3	光激发	98
* § 2.6	实验室系中的卢瑟福公式	99
2.6.1	实验室系与质心系中的散射截面	99
2.6.2	实验室系与质心系中的粒子动能	100
2.6.3	实验室系中的散射截面公式	101
	习题二	102
<b>第三章</b>	<b>单价原子</b>	<b>106</b>
§ 3.1	碱金属原子的光谱	106
3.1.1	碱金属原子光谱的实验规律	106
3.1.2	碱金属原子的能级	107
3.1.3	电子贯穿和原子实极化	108
3.1.4	跃迁选择定则	112
§ 3.2	角动量的空间量子化	113
3.2.1	原子的磁矩	113

3.2.2	角动量的空间量子化 .....	115
3.2.3	原子的守恒量 .....	118
§ 3.3	电子的自旋 .....	119
3.3.1	斯特恩-盖拉赫实验 .....	119
3.3.2	电子自旋假设 .....	121
3.3.3	电子反常磁矩 .....	124
§ 3.4	角动量合成和谱线精细结构 .....	125
3.4.1	自旋-轨道耦合能 .....	125
3.4.2	角动量的合成 .....	127
3.4.3	碱金属原子能级的分裂 .....	129
3.4.4	碱金属原子谱线的精细结构 .....	133
* § 3.5	氢原子光谱的精细结构 .....	135
* § 3.6	普朗克常数与精细结构常数 .....	139
3.6.1	普朗克常数的意义 .....	139
3.6.2	自然界的基本常数 .....	141
3.6.3	精细结构常数 .....	144
* § 3.7	托马斯进动 .....	146
	习题三 .....	150
<b>第四章</b>	<b>多价原子 .....</b>	<b>154</b>
§ 4.1	不同电子的角动量合成 .....	154
4.1.1	角动量合成的普遍规律 .....	155
4.1.2	$L$ - $S$ 耦合模型 .....	156
4.1.3	氢原子光谱 .....	159
4.1.4	$L$ - $S$ 耦合的跃迁选择定则 .....	160
4.1.5	$j$ - $j$ 耦合模型 .....	165
§ 4.2	塞曼效应 .....	168
4.2.1	塞曼效应的实验现象 .....	168
4.2.2	原子的有效磁矩 .....	170
4.2.3	磁场中原子的附加能量 .....	172
4.2.4	塞曼效应的理论解释 .....	173

4.2.5	帕邢-巴克效应 .....	178
4.2.6	对斯特恩-革拉赫实验的解释 .....	181
* 4.2.7	电子顺磁共振 .....	182
§ 4.3	能级的简并度 .....	185
4.3.1	描写单个电子状态的量子数 .....	185
4.3.2	描写多电子系统的量子数 .....	186
4.3.3	量子数与守恒量 .....	187
4.3.4	能级的简并度 .....	188
4.3.5	简并度对状态分布的影响 .....	190
§ 4.4	原子的电子壳层结构 .....	190
4.4.1	泡利原理和电子的壳层 .....	190
4.4.2	电子壳层的填充 .....	193
4.4.3	闭合壳层的角动量 .....	196
* 4.4.4	同科电子的角动量合成 .....	197
* 4.4.5	洪特定则 .....	203
§ 4.5	X 射线 .....	207
4.5.1	X 射线的获得 .....	207
4.5.2	特征谱与莫塞莱定律 .....	210
* 4.5.3	俄歇效应和 X 荧光分析 .....	215
* 4.5.4	同步辐射 .....	216
习题四	.....	218
<b>第五章</b>	<b>光谱线的宽度和激光</b> .....	<b>222</b>
* § 5.1	光谱线的宽度 .....	222
5.1.1	光谱线的自然宽度 .....	223
5.1.2	时间与能量的测不准关系 .....	226
5.1.3	压力展宽 .....	227
5.1.4	多普勒展宽 .....	228
§ 5.2	自发辐射与受激辐射 .....	231
5.2.1	两种辐射的不同性质 .....	231
5.2.2	爱因斯坦系数间的关系 .....	234

5.2.3 激发态的寿命 .....	235
§ 5.3 激光 .....	236
5.3.1 光的放大 .....	236
5.3.2 激光振荡 .....	238
5.3.3 氦氖激光器 .....	239
5.3.4 自由电子激光器 .....	242
5.3.5 激光束的优良特性 .....	243
习题五 .....	244
<b>第六章 分子光谱</b> .....	<b>246</b>
§ 6.1 离子键与原子键 .....	246
6.1.1 离子键 .....	246
6.1.2 原子键 .....	248
§ 6.2 分子的转动和振动光谱 .....	249
6.2.1 转动光谱 .....	249
6.2.2 振动光谱 .....	253
6.2.3 振转光谱 .....	256
§ 6.3 电子能级跃迁产生的分子光谱 .....	261
6.3.1 分子中电子的状态 .....	261
6.3.2 电子状态变化时的选择定则 .....	263
6.3.3 电子状态变化时的光谱结构 .....	265
6.3.4 分子带状光谱实例 .....	267
* § 6.4 喇曼效应 .....	270
6.4.1 喇曼效应的描述 .....	270
6.4.2 纯转动喇曼光谱 .....	273
6.4.3 振转喇曼光谱 .....	275
习题六 .....	276
<b>第七章 原子核</b> .....	<b>282</b>
§ 7.1 原子核的基本性质 .....	282
7.1.1 原子核的组成 .....	282
7.1.2 原子核的结合能 .....	284



§ 7.2 核力与核模型	286
7.2.1 核力	286
7.2.2 核模型	288
§ 7.3 核自旋与核磁矩	293
7.3.1 核自旋	293
7.3.2 核磁矩	294
7.3.3 光谱的磁超精细结构	297
7.3.4 核磁共振	299
§ 7.4 原子核的放射性	303
7.4.1 $\alpha$ 衰变	303
7.4.2 $\beta$ 衰变	304
7.4.3 $\gamma$ 衰变	308
7.4.4 放射性衰变的规律	308
7.4.5 放射性强度的度量	312
7.4.6 放射性同位素的应用	312
7.4.7 放射性射线的探测	314
§ 7.5 原子核反应	317
7.5.1 核反应能	317
7.5.2 裂变反应和反应堆	321
7.5.3 聚变	325
7.5.4 超铀元素和重离子束的应用	327
* § 7.6 穆斯堡尔效应	329
7.6.1 $\gamma$ 光子对原子核的反冲	329
7.6.2 反冲能的补偿	331
7.6.3 无反冲共振吸收	333
7.6.4 穆斯堡尔效应的应用	334
习题七	338
<b>第八章 粒子</b>	<b>342</b>
§ 8.1 粒子与粒子反应	342
8.1.1 描写粒子的基本物理量	342