



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

中国科学技术大学国家基础科学人才培养基地物理学丛书

主编 杨国桢 副主编 程福臻

原子物理与量子力学

[上册]



(第二版)

朱栋培 陈宏芳 石名俊 编著



科学出版社

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
中国科学技术大学国家基础科学人才培养基地物理学丛书
主 编 杨国桢 副主编 程福臻

原子物理与量子力学(上册)

(第二版)

朱栋培 陈宏芳 石名俊 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书根据普通物理与理论物理的内在联系和各自特点,将原子物理和量子力学两部分内容放在一个统一的框架下统筹安排,从理论与实际的结合上讲清科学规律的发现、归纳与应用的整个过程,加强整体性和系统性,避免不必要的重复。

本书分上、下两册,上册内容包括原子和量子,状态和薛定谔方程,力学量和算符,带电粒子在电磁场中的运动,原子核、粒子和宇宙演化。

本书可作为普通高等院校物理或应用物理专业本科生学习原子物理学和量子力学的教材,也可供相关专业的师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

原子物理与量子力学.上册/朱栋培,陈宏芳,石名俊编著.—2版.

—北京:科学出版社,2014.12

中国科学技术大学国家基础科学人才培养基地物理学丛书/杨国桢主编

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

ISBN 978-7-03-041641-4

I. ①原… II. ①朱…②陈…③石… III. ①原子物理学-高等学校-教材
②量子力学-高等学校-教材 IV. ①O562 ②O413.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 190411 号

责任编辑:窦京涛 王 刚 / 责任校对:蒋 萍
责任印制:徐晓晨 / 封面设计:迷底书装

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>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008年7月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2014年12月第 二 版 印张:21 1/2

2014年12月第三次印刷 字数:457 000

定价:43.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

第二版丛书序

2008年这套丛书正式出版,至今使用已五年,回想当初编书动机,有一点值得一提.我初到中国科学技术大学理学院担任院长,一次拜访吴杭生先生,向他问起科大的特点在哪里,他回答在于它的本科教学,数理基础课教得认真,学生学得努力,特别体现在十年CUSPEA考试(中美联合招收赴美攻读物理博士生考试)中,科大学生表现突出.接着谈起一所大学对社会最重要的贡献是什么,他认为是培养出优秀的学生,当前特别是培养出优秀的本科生.这次交谈给了我深刻的印象和启示.后来一些参加过CUSPEA教学的老教师向我提出,编一套科大物理类本科生物理教材,我便欣然同意,并且在大家一致的请求下担任了主编.我的期望是,通过编写这套丛书将CUSPEA教学的一些成果能保留下来,进而发扬光大.

应该说这套书是在十年CUSPEA班的教学内容与经验基础上发展出来的,它所涵盖的内容有相当的深度与广度,系统性与科学的严谨性突出;另外,注重了普通物理与理论物理的关联与融合、各本书物理内容的相互呼应.但是,使用了五年后,经过教师的教学实践与学生的互动,发现了一些不尽如人意的地方和错误,这次能纳入“‘十二五’普通高等教育本科国家级规划教材”是个很好的修改机会,同时大家也同意出版配套的习题解答,也许更便于校内外的教师选用.为大学本科生教学做一点贡献是我们的责任,也是我们的荣幸.盼望更多的使用本套书的老师和同学提出宝贵建议.

杨国桢

2013年10月于合肥

第一版丛书序

2008 年是中国科学技术大学建校五十周年. 值此筹备校庆之际, 由几位长年从事基础物理教学的老师建议, 编著一套理科基础物理教程, 向校庆五十周年献礼. 这一建议在理学院很快达成了共识, 并受到学校的高度重视和大力支持. 随后, 理学院立即组织了在理科基础物理教学方面有丰富教学经验的老师, 组成了老、中、青相结合的班子, 着手编著这套丛书, 并以此进一步推动理科基础物理的教学改革与创新.

中国科学技术大学在老一辈物理学家、教育家吴有训先生、严济慈先生、钱临照先生、赵忠尧先生、施汝为先生的亲自带领和指导下, 一贯重视基础物理教学, 历经五十年如一日的坚持, 现已形成良好的教学传统. 特别是严济慈和钱临照两位先生在世时身体力行, 多年讲授本科生的力学、理论力学、电磁学、电动力学等基础课. 他们以渊博的学识、精湛的讲课艺术、高尚的师德, 带领出一批又一批杰出的年轻教员, 培养了一届又一届优秀学生. 这套丛书的作者, 应该说都直接或间接受到过两位先生的教诲. 出版这套丛书也是表达作者对先生的深深感激和最好纪念.

这套丛书共九本:《力学与理论力学》(上、下)、《电磁学与电动力学》(上、下)、《光学》、《原子物理与量子力学》(上、下)、《热学 热力学与统计物理》(上、下). 每本约 40 万字, 主要是为物理学相关专业本科生编写的, 也可供工科专业物理教师参考. 每本书的教学学时约为 72 学时. 可以认为, 这套丛书系列不仅是普通物理与理论物理横向关联、纵向自洽的基础物理教程, 同时更加适合我校理科人才培养的教学安排, 并充分考虑了与数学教学的相互配合. 因此, 在教材的设置上,《力学与理论力学》(上、下)、《电磁学与电动力学》(上、下)中, 上册部分分别是普通物理内容, 而下册部分为理论物理内容. 还要指出的是, 在《原子物理与量子力学》(上、下)、《热学 热力学与统计物理》(上、下)中, 考虑到普通物理与理论物理内容的界限已不再那样泾渭分明, 而比较直接地用现代的、实用的概念、物理图像和理论来阐述, 这确实不失为是一种有意义的尝试.

这套丛书在编著过程中, 不仅广泛吸取了校内老师的经验, 采纳了学生的意见, 而且还征求了中国科学院许多相关专家的意见和建议, 体现了“所系结合”的特点. 同时, 还聘请了兄弟院校及校内有丰富教学经验的教授进行双重审稿, 期望将其错误概率降至最低.

历经几年,在科学出版社大力支持下,这套丛书终于面世,愿她能在理科教学改革与创新中起到一点作用,成为引玉之砖,共同来促进物理学教学水平的提高及其优秀人才的培养,并望广大师生及有关专家们继续提出宝贵意见和建议,以便改进。最后,对方方面为这套丛书编著与出版的完成所付出艰辛努力及其给予关心、帮助的同志表示深切感谢!

中国科学院大学理学院院长

杨国桢 院士

2007年10月

第二版前言

本书在 2008 年出版后,除中国科学技术大学外,一些兄弟院校也在教学中使用,反馈了很好的意见.

现在再版,除了改正编排等方面的错漏外,主要有两处大的变动.

测量是量子物理中非常基础、内容丰富而又充满疑猜的部分.本版专门加写了量子测量方面的内容,作为第 10 章.

对原来的“量子态的非定域性和纠缠特性”作了改写和更新,按内容顺序变为第 11 章,标题也改为“量子态的非定域性和量子关联”.

虽然在实际教学中不断发现一些错漏并做了改正,但书中不当之处依然存在,恳请读者继续指正.

编者

2014 年 1 月

第一版前言

本书的基础是作者在中国科学技术大学讲授原子物理和量子力学两门课程的讲义。

原子物理和量子力学是普通高校物理专业学生必修的两门基础课,分属普通物理和理论物理,过去都是分开教学.这两门课实际是实验与理论、基础与提高的关系.本书根据普通物理与理论物理的内在联系和各自特点,将这两门课有机地贯通在一起讲授,加强整体性和系统性,避免不必要的重复,提高教学质量.

本书包括原子物理(近代物理)与量子力学的内容,现在是放在一个统一的框架下,授课教师可统筹安排,从理论与实际的结合上讲清科学规律的发现、归纳与应用的整个过程.这样的安排可能更加符合科学的历史和实际.

本书一般需要讲两个学期.对于只需了解原子物理、近代物理基础和量子力学基本框架的学生,只需学习上册就可以了.而对于需要学习上、下两册的学生,在教学安排上,可以把上册的第5章(原子核、粒子和宇宙演化)安排在最后讲.

现在这种写法,只是我们的一种尝试,不当之处在所难免,恳请读者提出批评和建议.

编者

2008年2月

目 录

第二版丛书序	1
第一版丛书序	1
第二版前言	1
第一版前言	1
第 1 章 原子和量子	1
1.1 原子学说	1
1.1.1 思辨的原子论	1
1.1.2 化学原子论	1
1.1.3 物理原子论	2
1.2 电子和汤姆孙模型	4
1.2.1 电子的发现	4
1.2.2 汤姆孙模型	6
1.3 原子的核式结构	8
1.3.1 放射性的发现	8
1.3.2 α 射线	8
1.3.3 α 粒子散射实验	9
1.3.4 卢瑟福核式模型	11
1.3.5 卢瑟福散射公式	11
1.3.6 原子核的大小	16
1.3.7 高能散射实验	16
1.4 黑体辐射与能量子	17
1.4.1 黑体辐射实验	17
1.4.2 基本结果	18
1.4.3 经典理论的解释	20
1.4.4 普朗克公式	21
1.4.5 能量子	22
1.5 光电效应与光量子	24
1.5.1 光电效应	24
1.5.2 爱因斯坦关于光电效应的图像	26
1.5.3 光电效应方程的实验验证	27

1.5.4	爱因斯坦关系	28
1.5.5	康普顿效应	29
1.5.6	光的波粒二象性	33
1.6	原子光谱与玻尔模型	35
1.6.1	原子光谱	35
1.6.2	玻尔氢原子理论	38
1.6.3	弗兰克-赫兹实验	47
1.6.4	玻尔理论的局限	51
1.7	物质的波粒二象性	52
1.7.1	德布罗意假设	52
1.7.2	实验验证	54
1.7.3	物质的波粒二象性	58
第2章	状态和薛定谔方程	59
2.1	状态和波函数	59
2.1.1	微观系统运动状态	59
2.1.2	归一化	60
2.1.3	态叠加原理	62
2.1.4	动量空间波函数	64
2.2	薛定谔方程	65
2.2.1	薛定谔方程	65
2.2.2	定态	68
2.2.3	概率守恒定律	69
2.3	一维无限深方势阱	70
2.3.1	方势阱	70
2.3.2	分区解	71
2.3.3	连接条件	72
2.3.4	能级和波函数	73
2.3.5	物理意义	73
2.4	隧道效应	75
2.4.1	一维散射	75
2.4.2	散射边界条件	76
2.4.3	反射系数与穿透系数	77
2.4.4	隧道效应	78
2.5	氢原子	79
2.5.1	有心力场	79

2.5.2	球谐函数	80
2.5.3	径向波函数	84
2.5.4	库仑势	87
2.5.5	氢原子	91
2.5.6	电子云	94
2.6	谐振子	96
2.6.1	简谐振子	96
2.6.2	能级和波函数	98
2.6.3	半谐振子	99
第3章	力学量和算符	100
3.1	力学量的平均值	100
3.1.1	坐标平均值	101
3.1.2	动量平均值	102
3.1.3	算符	103
3.2	算符	104
3.2.1	算符运算	104
3.2.2	对易关系和反对易关系	105
3.2.3	线性算符	107
3.2.4	本征值和本征波函数	107
3.2.5	本征谱与简并度	107
3.2.6	厄米算符	108
3.2.7	厄米算符的重要性质	110
3.2.8	力学量用线性厄米算符代表	112
3.3	均方差和本征态	113
3.3.1	均方差	113
3.3.2	本征态	114
3.3.3	代表力学量的算符的线性	115
3.4	常用算符	116
3.4.1	坐标算符	116
3.4.2	动量算符	117
3.4.3	海森伯代数	119
3.4.4	动量算符的物理意义	120
3.4.5	角动量算符	120
3.4.6	一般力学量	124
3.4.7	能量算符	125

3.4.8	宇称算符	126
3.5	力学量本征态的完备性	127
3.5.1	叠加态的分布	127
3.5.2	本征态的完备性	129
3.5.3	连续谱情形	130
3.5.4	一般谱	131
3.5.5	完备性关系	132
3.5.6	量子力学第三假定	132
3.6	态空间和表象	133
3.6.1	态空间	133
3.6.2	力学量的表示	134
3.6.3	矩阵表示	135
3.6.4	狄拉克记号	137
3.6.5	酉变换	139
3.6.6	物理性质的表示无关性	142
3.7	状态的完全确定	142
3.7.1	自由度问题	142
3.7.2	共有完备本征态条件	144
3.7.3	完全力学量组	147
3.7.4	定态系统的形式解	147
3.7.5	守恒量	148
3.8	不确定关系	150
3.8.1	实验分析	150
3.8.2	两种分布	152
3.8.3	理论证明	154
3.8.4	应用	155
3.9	粒子数表象中的谐振子	156
3.9.1	吸收算符和发射算符	156
3.9.2	粒子数算符的本征态	157
3.9.3	各算符的矩阵形式	159
3.9.4	谐振子谱	161
3.9.5	状态波函数	161
第4章	带电粒子在电磁场中的运动	164
4.1	玻姆-阿哈拉诺夫效应	164
4.1.1	哈密顿量	164

4.1.2	运动方程	165
4.1.3	概率守恒	165
4.1.4	玻姆-阿哈拉诺夫效应	166
4.2	朗道能级	169
4.2.1	不对称规范	169
4.2.2	对称规范	171
4.3	原子磁矩和塞曼效应	172
4.3.1	原子磁矩	172
4.3.2	塞曼效应	174
4.3.3	理论解释	175
4.4	电子自旋	176
4.4.1	施特恩-格拉赫实验	176
4.4.2	钠原子光谱线的精细结构	179
4.4.3	电子自旋假设	180
4.4.4	自旋波函数	181
4.4.5	自旋算符	182
4.4.6	自旋在任意方向投影的波函数	185
4.4.7	泡利方程	186
4.4.8	自旋磁矩在磁场中的转动	187
4.5	角动量理论	188
4.5.1	角动量算符的本征值和矩阵表示	189
4.5.2	自旋角动量算符	193
4.6	角动量的耦合	194
4.6.1	两个角动量的耦合	194
4.6.2	矢量耦合系数	199
4.6.3	自旋态的耦合	201
4.7	自旋轨道耦合和能级精细结构	202
4.7.1	托马斯耦合	202
4.7.2	CSCO	202
4.7.3	角向本征波函数——球旋量	203
4.7.4	一般解	204
4.7.5	能级修正	205
4.7.6	相对论动能修正	206
4.7.7	波函数零点值修正	208
4.7.8	光谱项符号	209

4.8	自旋电子的塞曼效应	210
4.8.1	原子总磁矩	210
4.8.2	总磁矩在总角动量方向投影	211
4.8.3	自旋电子的塞曼效应	211
4.8.4	反常塞曼效应	214
4.8.5	帕邢-巴克效应	215
4.9	元素周期表	216
4.9.1	泡利原理	216
4.9.2	原子的壳层结构	219
4.9.3	自旋轨道耦合	220
第5章	原子核、粒子和宇宙演化	225
5.1	原子核的基本性质	225
5.1.1	原子核的组成	226
5.1.2	原子核的大小	228
5.1.3	核物质密度	230
5.1.4	原子核的自旋和核磁矩	230
5.1.5	电四极矩	232
5.1.6	原子核的字称	232
5.2	核力	233
5.2.1	原子核的结合能	233
5.2.2	核力	235
5.3	原子核结构的模型	238
5.3.1	原子核的稳定性	238
5.3.2	原子核的结构	239
5.3.3	液滴模型	240
5.3.4	壳模型	241
5.3.5	集体模型	245
5.4	核衰变	246
5.4.1	核衰变及放射性	246
5.4.2	原子核衰变的一般规律	246
5.4.3	放射系	248
5.4.4	α 衰变	249
5.4.5	β 衰变	252
5.4.6	γ 衰变	257
5.4.7	放射性的应用	258

5.4.8 穆斯堡尔效应及其应用	260
5.5 核反应	263
5.5.1 核反应	263
5.5.2 原子核的裂变	268
5.5.3 原子核的聚变	271
5.6 粒子的基本性质和分类	273
5.6.1 粒子的基本性质	274
5.6.2 粒子的分类	277
5.6.3 反粒子	284
5.7 强子的夸克模型	286
5.7.1 夸克的基本性质	288
5.7.2 重子和介子的夸克组成	292
5.8 基本相互作用与守恒律	295
5.8.1 电磁相互作用	295
5.8.2 弱相互作用	296
5.8.3 电弱统一	298
5.8.4 强相互作用	301
5.8.5 守恒定律与对称性	303
5.9 粒子物理标准模型	311
5.9.1 粒子物理的标准模型简述	311
5.9.2 其他物理理论模型	313
5.10 宇宙演化	315
5.10.1 宇宙学标准模型	315
5.10.2 三大验证	317
5.10.3 恒星的演化	320
5.10.4 太阳的一生	323
5.10.5 问题和挑战	323

第 1 章 原子和量子

1.1 原子学说

世界是物质的,物质是运动的,运动是有规律的,规律是能被人认识和应用的,这是学习自然科学者的基本认识.但是什么是物质,它由什么组成,相互作用如何,等等,这些都不是简单的问题,是人类长期科学研究的内容.

在《费恩曼物理学讲义》的第一卷的第一章第二节,美国物理学家费恩曼(R. Feynman, 1918~1988)提出了这样一个问题:

“假如由于某种大灾难,所有的科学知识都丢失了,只有一句话传给下一代,那么怎样才能用最少的词汇来表达最多的信息呢?我相信这句话是关于原子的假设(或者说原子的事实,无论你愿意怎样称呼都行):所有的物体都是由原子构成的——这些原子是一些小小的粒子,它们永远不停地运动着.当彼此略微离开时相互吸引,而过于接近时又互相排斥.只要稍微想一下,你就会发现,在这一句话中包含了大量的有关世界的信息.”

1.1.1 思辨的原子论

原子这个概念最早是在公元前 5~前 4 世纪由希腊的自然哲学家们引入的.在希腊语中“原子”是“不可分割”的意思,即物质最小的组成成分,不可能再作进一步的分割.公元前 5 世纪的古希腊哲学家留基伯(Leucippus)在致力于思考分割物质问题后,得出一个结论:分割过程不能永远继续下去,物质的碎片迟早会达到不可能分得更小的地步.他的学生德谟克里特(Demokritos, 公元前 460~?)接受了这种物质碎片会小到不可再分的观念,并称这种物质的最小组成单位为“原子”.亚里士多德(Aristoteles, 公元前 384~前 322)认为水、火、空气和泥土是构成物质的基本元素,中国古代的哲学家早在周代就提出五行说,即万物都是由金、木、水、火、土五种基本要素构成.这是思辨的原子论阶段.

1.1.2 化学原子论

直到 18 世纪,随着实验化学逐渐地量化,氢和氧的发现,法国化学家拉瓦锡(A. L. Lavoisier, 1743~1794)根据化学的观念,提出存在一些基本的元素,它们是不可分解的.他称这为化学元素或简称元素.任何物质由各种元素或元素的化合

物组成.

18~19世纪,基于一系列的实验事实,在化学反应实验中发现了定比定律(1799年由普劳斯特(J. L. Proust, 1754~1826)提出,一种化合物无论用什么方法制得,其组成的元素间都有一定的质量比). 1803年英国化学家道尔顿(J. Dalton, 1766~1844)发现倍比定律(相同的两种元素生成两种或两种以上的化合物时,若其中一种元素的质量不变,另一种元素在化合物中的相对质量成简单的整数比). 他在此基础上提出了科学的原子论,即物质由分子组成,分子是保持物质化学性质的最小单元,分子又是由一种或几种化学元素的原子组成. 原子是组成化学元素的、非常微小的、不可再分割的物质微粒,在化学反应中原子保持其本来的性质,原子是化学元素的最小单元.

1811年,意大利科学家阿伏伽德罗(A. Avogadro, 1776~1856)在道尔顿的原子论及法国科学家盖吕萨克(J. Gay-Lussac, 1778~1850)的关于化学反应气体的体积有简单的比例关系(如1体积的氮和3体积的氢反应生成2体积的氨)的基础上提出阿伏伽德罗假说(经许多实验证实,后来称为阿伏伽德罗定律),即在同样的温度和压力条件下,同体积的任何气体含有的分子数相同. 在道尔顿的原子说基础上,就可以比较不同原子(分子)的相对质量(称为原子量). 通过化学的方法发现各种元素的原子量都几乎是氢原子量的整数倍,如氮的相对原子量为14,氧为16. 阿伏伽德罗定义1摩尔(mol)物质就是质量对应于相对分子量的克数的物质. 通过各种实验给出,在标准条件下(0℃和101.3kPa),1mol质量气体的体积为22.4L,且在这体积中总是含有一定数目的分子,这个数称为阿伏伽德罗常量. 当时得到的阿伏伽德罗数误差较大, $(40\sim 120)\times 10^{22}\text{ mol}^{-1}$, 现在的实验值为 $N_A = (6.022\ 141\ 5 \pm 0.000\ 001\ 0)\times 10^{23}\text{ mol}^{-1}$. 由摩尔质量和阿伏伽德罗常量就可以得出分子的绝对质量. 自1961年起,国际上统一决定以碳原子 ^{12}C 的原子量定义为12个原子质量单位,所以原子质量单位1u(1 amu)

$$\begin{aligned} 1\text{u} &= \frac{1}{12} \times \frac{A(^{12}\text{C})}{N_A} = (1.660\ 538\ 9 \pm 0.000\ 000\ 3) \times 10^{-27}\text{ kg} \\ &= (931.494\ 04 \pm 0.000\ 08)\text{ MeV}/c^2 \end{aligned}$$

上式最后一个表示式是由爱因斯坦关系 $E=mc^2$ 转换得到的,MeV是能量的度量单位, c 是光速. 以上阶段基本上是从化学方面来探讨物质的原子结构,故可称为化学原子学说.

1.1.3 物理原子论

19世纪以后开始了原子论的物理阶段. 基于原子说,英国物理学家焦耳(J. P. Joule, 1818~1889)用气体分子运动理论,即认为原子(分子)是有一定质量和大小的小球,在气体中原子(分子)间的间隔很大. 在两个分子发生碰撞前,它们各自以