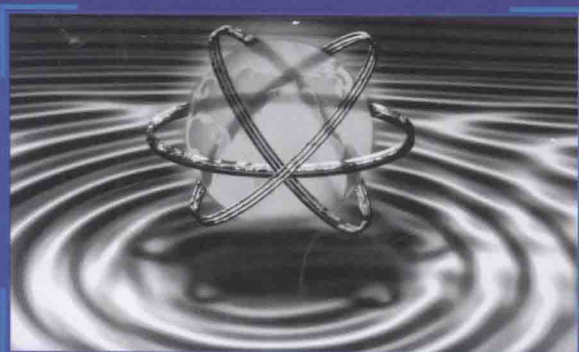


国家级特色专业教材系列

原子及原子核物理

主 编 郭 江
副主编 赵晓凤 罗培燕
张传瑜 彭直兴



科学出版社

国家级特色专业教材系列

原子及原子核物理

主 编 郭 江
副主编 赵晓凤 罗培燕
张传瑜 彭直兴



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书整合了原子物理及原子核物理的内容,使其在保持原有各门课程知识体系相对完整的基础上,又组成新的知识结构体系,从而达到融合两门相对独立的课程的目的,使学生只花较少的时间就能够初步掌握这两门课程的基本内容.它以阐述原子及原子核的结构、特性和变化为中心,重点内容包括原子物理、原子核物理两大部分.

全书共分18章,各章均附有习题.第1~8章为原子物理部分,从原子的核式结构、波粒二象性、碱金属原子和电子自旋、原子的壳层结构、磁场中的原子、X射线、分子等方面的实验事实总结出的规律汇总到原子结构的全貌.第9~17章为原子核物理部分,主要包括低能核结构模型、原子核的放射性衰变、 α 衰变、 β 衰变、 γ 衰变、核反应、核裂变、核聚变和原子能的利用展望等.第18章为粒子物理学的介绍.

本书可以作为工科相关专业原子及原子核物理学的综合性教材或近代物理教材,也可以作为物理学相关专业原子物理学的教材,可供物理专业以及其他专业学生或相关科技人员参考.

图书在版编目(CIP)数据

原子及原子核物理 / 郭江主编. —北京:科学出版社,2014.1

国家级特色专业教材系列

ISBN 978-7-03-039416-3

I. ①原… II. ①郭… III. ①原子物理学-高等学校-教材 ②核物理学-高等学校-教材 IV. ①O562 ②O571

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第310973号

责任编辑:王 刚 昌 盛 / 责任校对:张凤琴

责任印制:阎 磊 / 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>

化学工业出版社印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年1月第一版 开本:787×1092 1/16

2014年1月第一次印刷 印张:15 1/2

字数:350 000

定价:32.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

本书是在国防工业出版社 2010 年出版的《原子及原子核物理》(第一版)的基础上修订而成的。目前,国内各大专院校使用的原子物理和原子核物理学课程现有的教材,几乎均是分开单独编写,需要较多的学时数,而当前很多理工科专业往往要求用较少的学时完成原子物理和原子核物理学两门课程的教学内容,针对此情况,作者结合自己长期讲授“原子及原子核物理”和“近代物理概论”课程的教学实践经验和教改研究成果,编写了这本原子及原子核物理学的综合性教材。本书通过对原子物理学及原子核物理学两门课程的科学的、合理的整合与调整,使其在保持原有各门课程知识体系相对完整的基础上,又组成新的知识结构体系,从而达到重新融合两门相对独立的课程的目的,使学生只花较少的时间就能够初步掌握这两门课程的基本内容。在本次修订过程中增加了分子结构和光谱等内容,对相关学科前沿研究新动态做了一定介绍。它既可以作为工科相关专业原子及原子核物理学的综合性教材,也可以作为物理学相关专业原子物理学的教材以及目前越来越多专业所开设的近代物理概论的教材。

原子及原子核物理学或近代物理课程,是学生认识和研究微观领域的开始,所以在本教材的编写中,作者从实验事实出发,按照由现象到本质、由实验到理论的过程,结合一些物理学史的介绍,让学生了解在原子分子、原子核领域中经典物理遇到的主要困难,以及为克服这些困难而引入的一些全新的分析方法和推理方法,帮助学生建立起量子物理的基本概念;使学生了解如何由分析物理实验结果出发建立物理模型,进而建立物理理论体系的过程,引导学生进入微观世界;让学生对物质在原子分子及原子核层次上的微观结构、特性和变化有较清楚的认识,了解微观物理学对现代科学技术的重大影响和各种应用,了解并适当涉及正在发展的学科前沿,扩大视野,引导学生勇于思考、乐于探索发现,养成良好的自学习惯,培养良好的科学素质,学习物理学家们那种创造性研究问题的思想和方法,以培养自己的创新能力。

本书主要以阐述原子分子及原子核的结构、特性和变化为中心,重点内容包括原子物理、原子核物理两大部分。全书共分 18 章。第 1~8 章为原子分子物理部分,作者将从光谱学、电磁学、X 射线、分子光谱等方面的实验事实总结出的规律汇总到原子分子结构的全貌。第 9~17 章为原子核物理部分,主要包括低能核结构模型、原子核的放射性、 α 衰变、 β 衰变、 γ 衰变、核反应及核能和放射性的应用等。第 18 章为粒子物理学的介绍。若将其作为工科专业的原子及原子核物理学的综合性教材,“*”和“**”号内容为选讲,约需 50 学时;若作为物理学专业原子物理学的教材,第 1 篇除“**”外为全部讲授内容,第 2 篇为原子核物理部分,可根据情况有选择地讲授或综合讲授,约需 56 学时;若作为近代物理概论的教材,第 1 篇“*”号内容为选讲,第 2 篇可综合讲授,约需 56 学时。本教材也可作为物理专业以及其他专业学生或相关科技人员的参考书。

由于作者学识所限,书中难免会有缺点和错误,恳请读者批评指正。

郭 江

2013 年 9 月于成都

目 录

前言

绪论	1
----	---

第 1 篇 原子物理

第 1 章 原子的核式结构及氢原子的玻尔理论	5
1.1 原子的基本状况	5
1.1.1 原子的质量	5
1.1.2 原子的大小	6
* 1.2 原子的核式结构	6
1.2.1 α 粒子的散射实验	7
1.2.2 原子的核式结构模型	8
* 1.3 卢瑟福散射公式	8
1.3.1 库仑散射公式	8
1.3.2 卢瑟福散射公式	9
1.3.3 原子核半径的估算	11
* 1.4 氢原子玻尔理论的历史背景	11
1.4.1 卢瑟福原子核式结构模型的困难	11
1.4.2 黑体辐射	11
1.4.3 光电效应	14
1.4.4 氢原子光谱的规律	16
1.5 氢原子的玻尔理论	18
1.5.1 氢原子的玻尔理论	18
1.5.2 光谱项	21
* 1.5.3 原子能级的实验验证——弗兰克-赫兹实验	21
1.6 类氢系统的光谱	23
* 附录:数值算法	25
习题	26
第 2 章 量子力学初步	28
* 2.1 波粒二象性 德布罗意物质波	28
2.1.1 德布罗意假设	28
2.1.2 德布罗意波的实验验证	28
2.1.3 德布罗意波的统计解释	30
* 2.2 不确定关系	30

* 2.3	波函数 薛定谔方程	32
2.3.1	波函数 概率密度	32
2.3.2	薛定谔方程	33
2.3.3	力学量的算符和平均值	34
2.3.4	薛定谔方程应用举例	35
2.4	量子力学对氢原子的处理	37
* 2.4.1	氢原子的薛定谔方程	37
* 2.4.2	能量和角动量	39
* 2.4.3	电子被发现的概率的分布	41
2.4.4	三个量子数的物理意义	44
	习题	45
第3章	碱金属原子和电子自旋	47
3.1	碱金属原子的光谱和能级	47
3.1.1	碱金属	47
3.1.2	碱金属原子的光谱和能级	47
3.2	原子实的极化和轨道贯穿	49
3.2.1	原子实	49
3.2.2	原子实的极化	49
3.2.3	轨道的贯穿	50
3.3	原子的精细结构	51
3.3.1	碱金属原子光谱的精细结构	51
3.3.2	原子中电子轨道运动的磁矩	52
3.4	电子自旋	54
3.4.1	电子自旋的假设	54
3.4.2	电子自旋磁矩	55
3.4.3	自旋—轨道相互作用,原子精细结构的定量考虑	55
3.5	单电子辐射跃迁的选择定则	58
3.6	氢原子光谱的精细结构	59
3.6.1	氢原子能级的精细结构	59
3.6.2	氢光谱精细结构的观测	60
	习题	61
第4章	多电子原子	63
4.1	氦及周期表第二族元素的光谱和能级	63
4.1.1	氦的光谱和能级	63
4.1.2	镁的光谱和能级	64
4.2	具有两个价电子的原子的原子态	65
4.2.1	电子组态	65
4.2.2	一种电子组态构成不同的原子态	65

4.3	泡利不相容原理	69
4.3.1	泡利不相容原理	69
4.3.2	等效电子形成的原子态	70
4.4	复杂原子光谱的一般规律	72
4.4.1	光谱和能级的位移律	72
4.4.2	多重性的交换律	72
4.5	辐射跃迁的选择定则	73
4.5.1	电子组态变化的规则	73
4.5.2	原子辐射跃迁的选择定则	74
	习题	74
第5章	原子的壳层结构	76
5.1	元素性质的周期性	76
5.2	原子的电子壳层结构	77
5.2.1	决定原子壳层结构的两条准则	77
5.2.2	原子中电子的壳层结构	77
5.2.3	电子组态的能量——壳层的次序	78
5.2.4	原子基态的电子组态及元素周期表	79
5.2.5	原子基态光谱项的确定	83
	习题	85
第6章	磁场中的原子	86
6.1	原子的磁矩	86
6.1.1	单电子原子的总磁矩	86
6.1.2	两个或两个以上电子的原子磁矩	87
6.2	磁场对原子的作用	87
6.2.1	拉莫进动(旋进)	87
6.2.2	原子受磁场作用附加的能量	88
6.3	几个证明磁场中能级分裂的典型实验	89
6.3.1	施特恩-格拉赫实验的再分析	89
6.3.2	顺磁共振	90
6.3.3	塞曼效应	91
	习题	95
第7章	X射线	97
7.1	X射线的产生及波长和强度的测量	98
7.1.1	X射线的产生	98
7.1.2	X射线波长和强度的测量	98
7.1.3	X射线在晶体中衍射的应用	100
7.2	X射线发射谱及特征	101
7.2.1	X射线的发射谱	101

7.2.2	连续谱——韧致辐射	101
7.2.3	标识辐射的特征	102
7.3	原子内壳层电子电离的能级——X射线标识谱产生机制	104
7.3.1	产生标识辐射的先决条件	104
7.3.2	X射线标识谱产生机制和标识谱的标记方法	105
7.3.3	俄歇电子	106
7.4	X射线的吸收	106
7.4.1	光子与物质的相互作用	106
7.4.2	X射线的吸收	107
7.4.3	吸收限	108
7.4.4	X射线吸收过程的应用	109
	习题	111
** 第8章	分子结构和光谱	112
8.1	原子间的键联与分子的形成	112
8.1.1	离子键	112
8.1.2	共价键	114
8.2	分子的能级与光谱	120
8.2.1	分子内部运动的三种形式	120
8.2.2	双原子分子的转动能级和光谱	121
8.2.3	双原子分子的振动能级和光谱	123
8.2.4	双原子分子的振转能级和振转光谱	124
8.2.5	双原子分子的电子态	126
8.3	拉曼散射和光谱	127
8.3.1	拉曼散射及主要的实验结果	127
8.3.2	拉曼散射的理论解释	129
	习题	131

第2篇 原子核物理

第9章	原子核的基本性质和结构	135
9.1	原子核的电荷、质量和半径	135
9.1.1	原子核的电荷	135
9.1.2	原子核的质量	135
9.1.3	原子核的半径	135
9.2	原子核的组成	136
9.2.1	原子核的组成	136
9.2.2	核素和核素图	136
9.3	质量亏损和结合能	138
9.3.1	$1+1\neq 2$	138

9.3.2	平均结合能	139
9.4	原子核的角动量和磁矩	140
9.4.1	原子核的角动量(核自旋)	140
9.4.2	原子核的磁矩	142
9.4.3	原子核的电四极矩	142
9.5	原子核的统计性和宇称	143
9.5.1	原子核的宇称	143
9.5.2	原子核的统计性	143
9.6	核力	144
9.6.1	核力的一般性质(今已了解的)	144
9.6.2	核力的介子论	145
9.7	原子核结构模型	147
9.7.1	原子核的液滴模型和结合能的半经验公式	147
9.7.2	原子核的壳层模型	149
*9.7.3	原子核的集体模型	153
	习题	156
第 10 章	原子核放射性衰变	157
10.1	放射性衰变及其规律	157
10.1.1	放射性衰变及类型	157
10.1.2	单独存在的放射性物质的衰变规律	157
10.2	4 个放射系	159
10.2.1	铀系(铀-镭系)	159
10.2.2	锕系($4n+3$ 系)	162
10.2.3	钍系($4n$ 系)	162
10.2.4	镎系($4n+1$ 系)	162
	习题	162
第 11 章	α 衰变	163
11.1	α 衰变的条件及能量分配	163
11.1.1	α 衰变的条件	163
11.1.2	衰变能及其分配	163
11.2	α 能谱的精细结构与核能级	164
11.2.1	α 能谱的精细结构	164
11.2.2	能谱精细结构与核能级的关系	165
11.2.3	α 衰变机制	166
11.3	长射程 α 粒子	167
	习题	167
第 12 章	β 衰变	168
12.1	β 衰变的 3 种形式	168

12.1.1	β^- 衰变	168
12.1.2	β^+ 衰变	168
12.1.3	电子俘获和俄歇效应	169
12.2	β 衰变面临的难题	170
12.2.1	β 能谱的连续性	170
12.2.2	β 衰变面临的难题	170
12.2.3	中微子假说	170
12.3	β 衰变纲图和 β 衰变三种形式的比较	172
12.3.1	β 衰变纲图	172
12.3.2	β 衰变三种形式的比较	172
	习题	173
第 13 章	γ 衰变	174
13.1	γ 射线的一般性质	174
13.1.1	γ 射线的性质	174
13.1.2	γ 跃迁中的能量分配	174
13.2	内变换(IC)	174
13.2.1	内变换现象	174
13.2.2	内转换电子的能量谱	175
13.2.3	电子偶内变换	176
13.3	同质异能素	176
13.4	穆斯堡尔效应	177
13.4.1	原子核内光子的共振吸收	177
13.4.2	穆斯堡尔效应	178
	习题	180
* 第 14 章	射线与物质的相互作用	181
14.1	重荷电粒子与物质的相互作用	181
14.1.1	电离和激发	181
14.1.2	射程(R)	182
14.2	快速电子与物质的相互作用	184
14.2.1	非弹性散射(电离和激发)	184
14.2.2	韧致辐射	184
14.2.3	弹性散射	184
14.2.4	切伦科夫辐射	185
14.2.5	正负电子的湮灭	185
14.2.6	β 射线的吸收和射程	185
14.3	γ 射线同物质的相互作用	186
14.3.1	原子截面	186
14.3.2	γ 射线在物质中的吸收	187

14.4	放射性的应用	188
14.4.1	示踪原子的应用	188
14.4.2	地质考古中的应用	188
	习题	189
第 15 章	原子核反应	190
15.1	核反应及遵循的守恒定律	190
15.1.1	概述	190
15.1.2	核反应遵守的一系列守恒律	191
15.2	核反应中的能量	191
15.2.1	反应能 Q	191
15.2.2	Q 方程	192
15.2.3	核反应的阈能	193
15.3	核反应截面	195
15.3.1	反应截面 σ	195
15.3.2	总截面、分截面	196
15.3.3	微分截面	196
15.4	核反应的三阶段描述	197
15.5	核反应的复合核模型	198
15.5.1	复合核模型的基本假设	198
15.5.2	复合核的能级宽度	198
15.5.3	核共振	199
15.5.4	截面的连续区	200
15.6	原子核的光学模型	200
	习题	201
第 16 章	原子核的裂变和原子能的利用	202
16.1	原子核的裂变现象	202
16.1.1	裂变现象	202
16.1.2	裂变能	203
16.2	裂变理论	203
16.2.1	重核的稳定性(原子核的稳定性)	203
16.2.2	原子核势能与核形变的关系	204
16.2.3	激活能(裂变阈能)	204
16.3	链式反应和原子反应堆	205
16.3.1	链式反应	205
16.3.2	维持链式反应的必要条件	206
16.3.3	原子反应堆	206
16.3.4	原子武器	207
	习题	208

第 17 章 原子核的聚变和原子能的利用展望	209
17.1 原子核的聚变	209
17.1.1 核聚变	209
17.1.2 实现自持聚变的条件	209
17.2 等离子体的约束	210
17.2.1 引力约束	210
17.2.2 磁约束(MCF)	211
17.2.3 惯性约束(ICF)	212
* 第 18 章 粒子物理简介	214
18.1 粒子和粒子的相互作用	214
18.1.1 4 种基本相互作用	214
18.1.2 早期粒子的分类	214
18.1.3 奇异粒子的发现和奇异数 S	215
18.1.4 同位旋和盖尔曼-西岛关系	216
18.1.5 对称原理(粒子在 C, P, T 操作下的对称性)	216
18.2 共振态	217
18.2.1 重子共振态	217
18.2.2 介子共振态	218
18.3 粲性粒子的发现	219
18.4 夸克模型	220
18.4.1 粒子的内部结构	220
18.4.2 夸克模型	220
18.5 标准模型及“基本”粒子的分类	222
18.5.1 标准模型中的基本相互作用	222
18.5.2 按标准模型对粒子的分类	223
习题	225
附录	226
附录 I 常用物理常数	226
附录 II 一些核素的性质	227
习题参考答案	231
参考文献	234

绪 论

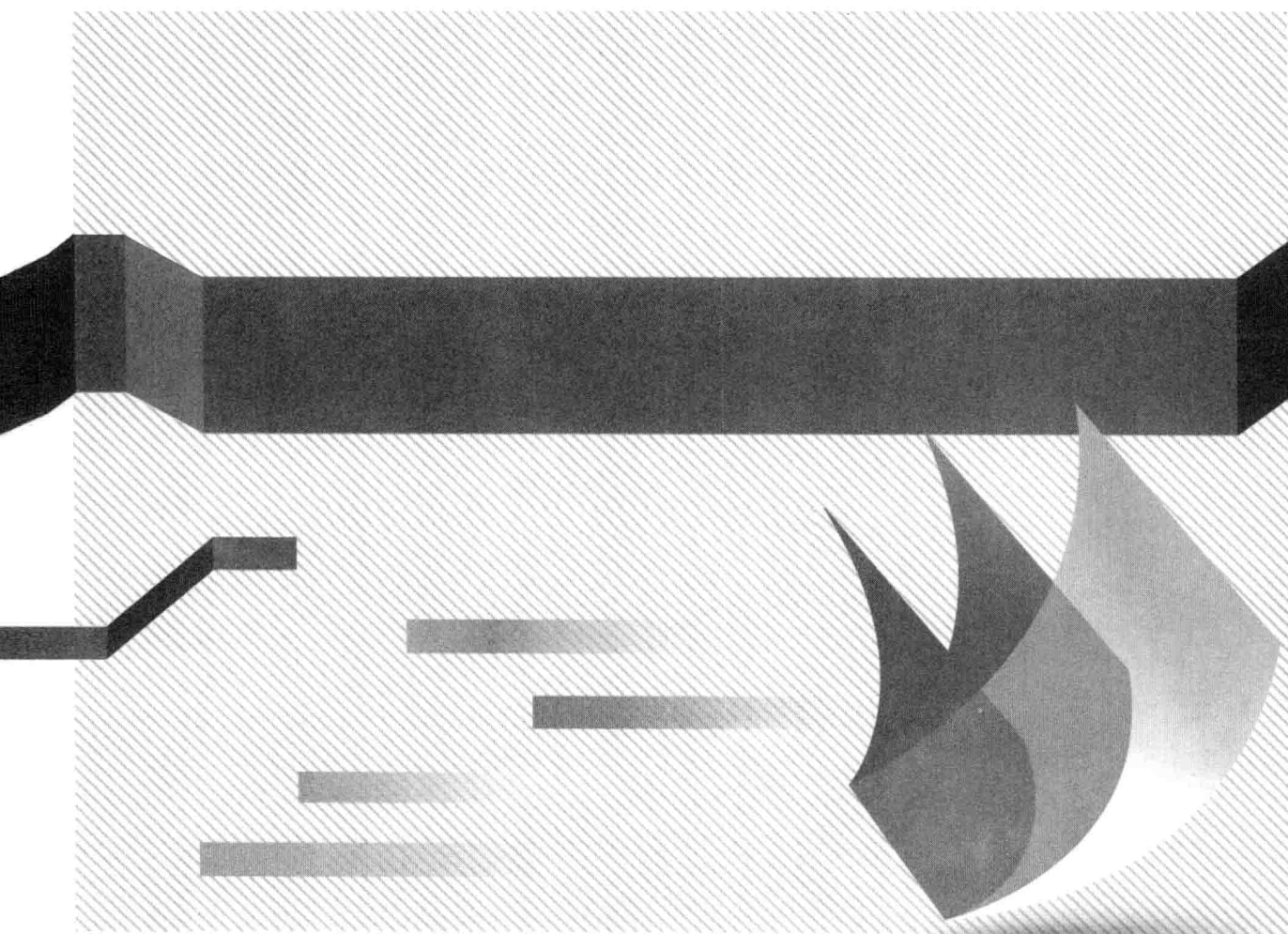
物理学是研究物质运动的最一般的规律和物质基本结构的学科. 物质的结构按空间尺度分成一个一个层次. 原子及原子核物理学研究空间尺度在 $10^{-15} \sim 10^{-10} \text{ m}$ 之间的物质层次, 由原子物理和原子核物理两大部分结合而成, 是关于物质微观结构的一门科学. 其研究对象分别为物质结构的原子 (10^{-10} m) 和原子核 (10^{-15} m) 层次. 它主要研究原子、原子核结构与性质及有关问题, 即研究物质在原子和原子核层次是由什么组成、这些组成体如何相互作用、这些组成体是怎么运动的.

尽管人们提出原子的概念已有两千多年的历史, 但原子及原子核物理学, 准确来说都是在 19 世纪末、20 世纪初, 随着近代物理学的发展而迅速发展的. 特别是人类在 1895 年、1896 年、1897 年的三大发现 (X 射线、放射性和电子的发现), 拉开了近代物理的序幕, 掀起了原子物理、原子核物理发展的新篇章.

原子及原子核物理学课程, 上承经典物理, 下接量子力学, 属于近代物理的范畴. 但在内容体系上, 采用了普通物理的描述风格讲述量子物理的基本概念和物理图像. 本教材在原子物理部分, 从原子光谱入手, 提出假设, 建立模型, 研究价电子的运动规律; 以实验为基础研究磁场对原子的作用; 从元素周期律和 X 射线入手研究内层电子的运动规律和排布; 然后再进行实验验证, 最后形成理论. 通过学习, 学生应建立正确的原子结构图像 (原子的量子态、电子自旋、壳层结构等), 掌握原子物理学的研究方法, 以及基本概念和原理, 掌握原子光谱、能级和能级跃迁的基本规律, 了解在原子领域中经典物理遇到的主要困难, 以及为克服这些困难而引入的一些全新的分析方法和推理方法、一些与经典物理不同的新概念, 辩证认识经典与近代物理的基本关系. 本教材的教学重点放在对有关概念和规律的物理分析和阐述上, 严格的理论处理留待量子力学等后继课程去完成.

由于原子核是典型的量子多体复杂体系, 其中包含了丰富的内秉自由度与最多种类的基本相互作用, 所以利用射线轰击原子核引起核反应的方法以及利用原子核的放射性衰变特性是研究原子核的主要手段. 借助原子核的放射性衰变 (α 衰变、 β 衰变、 γ 衰变)、核反应等大量的科学实验, 我们将归纳总结稳定的核素和放射性核素的基态和较低激发态的性质, 并通过理论分析建立各种唯象模型, 讨论核子在核内的运动和核衰变、核反应机制, 对实验事实给出理论解释. 原子核物理是与整个科学技术发展紧密相连的, 以兴建若干大科学工程为标志, 对它的研究与开发需在全球范围开展合作竞争, 以及较大的公共资源投入, 是典型的大科学. 同时, 原子核物理具有接近实际、依赖实验、唯象成分较多的特点, 在学习与研究中应留意.

第1篇 原子物理



第 1 章 原子的核式结构及氢原子的玻尔理论

1.1 原子的基本状况

随着科学的发展,人们已经证实了原子的存在.现在,我们已经证明原子不是如同古人所想象的那样简单而不可分割,而是有复杂的结构和运动,并且是可以击破的.化学已经阐明各种物体是由元素构成的;原子是元素的最小单元;各种元素的原子结构是有差异的.例如碳和铁是不同类型的原子,它们的最小单元就是碳原子和铁原子,这两种原子有各自的结构和特征,它们都可以被击破,但击破后分出的粒子不再具有碳或铁的特征,已经不是碳或铁了.各种原子均由几种基本粒子组成.这几种基本粒子怎样构成多种多样的、具有各种元素特征的原子,我们将逐步说明.本节先介绍原子的一般情况.

1.1.1 原子的质量

不同原子的质量不同,在化学和物理学中常用到它们质量的相对值.我们把碳在自然界中最丰富的一种同位素 ^{12}C 的质量定为 12.000 个单位作为原子量的标准,即一个 ^{12}C 原子质量的 $1/12$ 为 1 个原子质量单位 u ——碳单位(是 unit 的缩写). $1u = ^{12}\text{C} \times 1/12$,其他原子的质量同 ^{12}C 比较,定出质量相对值,称为相对原子质量.于是氢的原子量是 $1.0079u$,碳是 $12.011u$,氧是 $15.999u$,铜是 $63.54u$ 等.相对原子质量可用化学方法测定.

u 和 g 的换算关系推算如下:按阿伏伽德罗定律,1mol 原子的物质中,不论哪种元素,都含有同一数量的原子.这个数称为阿伏伽德罗常量 N_A .如 1mol 的 ^{12}C ,或 $12g^{12}\text{C}$ (^{12}C 的原子质量以 g 为单位)含有 N_A 个 ^{12}C 原子,则碳原子质量以 g 为单位为 $12/N_A(g)$;现在把它定义为 $12u$,故 u 和 g 的换算关系为 $12u = 12/N_A(g)$,即

$$1u = \frac{1}{N_A}g = 1.6605387 \times 10^{-27} \text{kg}$$

所以,知道了原子质量,可以求出原子质量的绝对值.如果以 A 代表原子质量, N_A 代表阿伏伽德罗常量, M_A 代表一个原子的质量绝对值,那么

$$M_A = \frac{A}{N_A}(g) \quad (1-1)$$

式中, A 是以克(g)为单位的 1 摩尔(mol)原子的质量,只要 N_A 知道, M_A 就可以算出.

测定 N_A 的方法有好几种,现在列举一种.

从电解法可以测得法拉第常量 F

$$F = 96486.70\text{C/mol}$$

F 表示 1mol 带单个电量的离子所带的总电量.如果原子的原子价为 n ,则显然有

$$N_A = 1\text{mol 的原子数}$$