

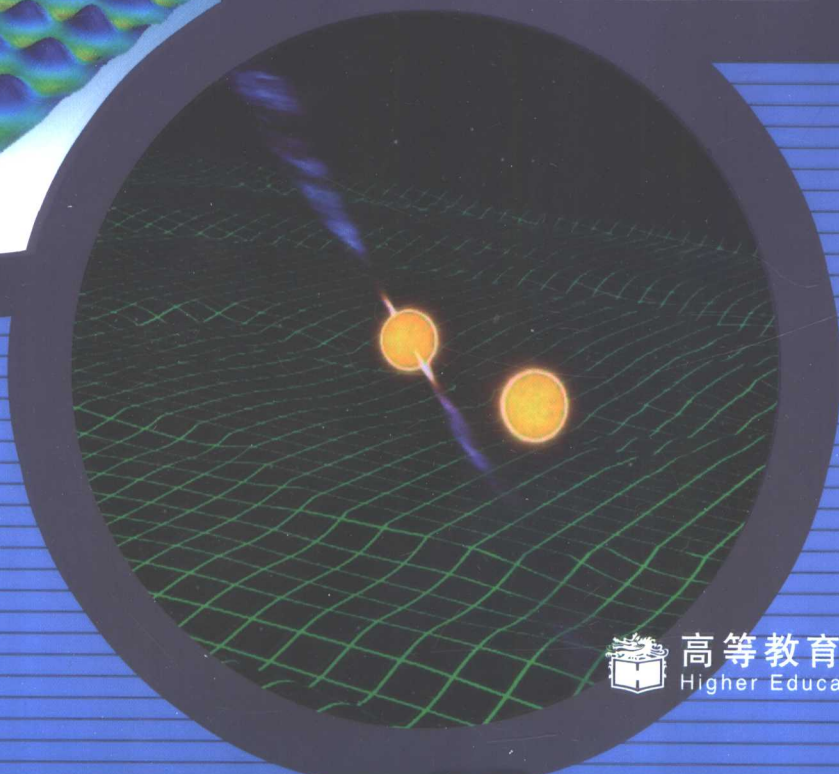
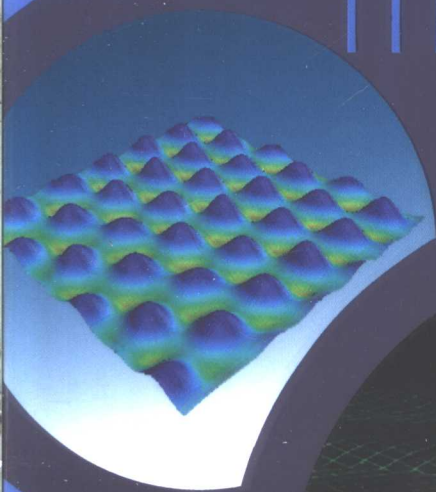


普通高等教育“十五”国家级规划教材

# 近代物理学

## Modern Physics

■ 王永昌 主编



高等教育出版社  
Higher Education Press

普通高等教育“十五”国家级规划教材

# 近代物理学

Modern Physics

王永昌 主编  
王永昌 黄丽清 编

高等教育出版社  
Higher Education Press

## 内 容 简 介

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材,是作者根据多年来为应用物理等专业讲授“近代物理学”课程的教学实践经验悉心编写而成的。书中吸取了近年来国内外出版的近代物理教材的优点,也包含了作者长期的教学体验和科研心得。全书用量子力学的基本概念和语言,以普通物理的风格深入浅出地讲述量子物理学的实验基础和物质微观结构的各个层次。本书力求贴近国内教学实际,在内容选取上深广度适当,并着重于加强课程体系结构的连贯性和基本概念清晰性。

全书共分九章,内容包括:物质的微观结构,量子物理学的实验基础,薛定谔方程,氢原子和碱金属原子,多电子原子,磁场中的原子,分子,原子核和粒子物理学。结合上述内容有选择地介绍了现代物理的一些前沿发展和在高新技术中的应用。书中还包含了精心绘制的插图和富有启发性的例题、思考题和习题。

本书可作为高等学校应用物理、光信息科学与技术、材料物理等专业的近代物理学教材,也可供物理专业和其他相关专业选用。

### 图书在版编目(CIP)数据

近代物理学/王永昌主编. —北京:高等教育出版社, 2006.5

ISBN 7-04-020203-4

I. 近... II. 王... III. 物理学-高等学校-教材 IV. O41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 131184 号

---

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	<a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>
总 机	010-58581000		<a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	<a href="http://www.landaco.com">http://www.landaco.com</a>
印 刷	北京新丰印刷厂		<a href="http://www.landaco.com.cn">http://www.landaco.com.cn</a>
		畅想教育	<a href="http://www.widedu.com">http://www.widedu.com</a>
开 本	787×960 1/16	版 次	2006 年 5 月第 1 版
印 张	24.25	印 次	2006 年 5 月第 1 次印刷
字 数	450 000	定 价	25.40 元

---

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 20203-00

# 前 言

本书是根据作者多年来在西安交通大学为应用物理、光信息科学与技术及材料物理等专业讲授“近代物理学”课程的讲稿修改和补充而成的。

传统上近代物理学(原称原子物理学)与力学、热学、电磁学、光学合称普通物理学,是应用物理等专业第四学期的一门基础课程,它既是普通物理学的最后一部分,也是学生学习近代物理学的开始。

以相对论和量子力学为理论基础,研究物质结构各层次基本单元的性质、相互作用及运动规律是近代物理学的主要内容。根据现行教学计划的安排,有关相对论方面的基本内容分别放在力学和电动力学中讲授。因此本书主要用量子力学的基本概念和图像分析物质微观结构各层次的实验现象,讲述在此基础上形成的理论分析和处理方法。简而言之,本书主要讲述微观物理学。

20世纪发生的科学技术革命主要源于近代物理学的发展,从21世纪科学技术发展的总趋势来看,物理学对其他科学技术领域,如生物、信息、材料和能源等学科的辐射渗透力很大程度上仍将来来自于近代物理学。可以毫不夸张地说,上述学科成熟性的标志之一在于应用量子物理学的水平。因此近代物理学课程,不仅为学生进一步学习量子力学和固体物理学等后续课程打好基础,而且对他们科学思维方法的训练、分析问题和解决问题能力的提高以及探索精神的培养起着重要作用。

基于这种精神,本书并不是完全按照近代物理历史发展的轨迹来安排教学内容,而主要根据近代物理学本身的逻辑规律来编写,目的是为了加强课程理论的系统性和连贯性,给学生一个合乎逻辑的统一的知识结构。

本书第一章扼要介绍了物质微观结构的全貌,它是近代物理学的基本内容,也是本书以后各章讨论的内容的精缩。第一章的最后通过历史回顾一节向读者说明物理学家在建立了适用于宏观现象的经典物理学后,必然向微观领域挺进,并在这个过程中产生了一系列新概念、新原理和新方法,导致了一个新的科学概念体系——量子物理学的产生。第二章着重讲述量子物理学的实验基础,从表现辐射的粒子性和实物粒子的波动性的实验事实出发,说明微观粒子的状态用波函数描述的必然性。原子是物理上研究的第一个微观系统,通过 $\alpha$ 粒子对原子的散射实验和原子光谱的观测建立起来的两个模型——卢瑟福有核模型和玻尔模型是量子物理学早期阶段所建立的唯象理论,它们所遇到的不可克服的困难,成为量子力学波函数的概率诠释和薛定谔波动方程建立的突破口。第三章在上述基础上进一步讲述了量子力学中海森伯的不确定关系和薛定谔波动方

程。波函数的概率诠释和薛定谔波动方程是量子力学最核心的两个基本假设。波函数的叠加原理和海森伯不确定关系作为量子力学的基本原理,可以看作是基本假设出发得出的逻辑结果和推论。在近代物理学课程中,我们只局限于对量子力学的基本假设做一些入门性的介绍。从第四章开始,深入浅出地介绍量子力学对原子、分子、原子核和粒子物理各微观结构层次的分析 and 处理。

本书强调用普通物理风格来讲述近代物理学。近代物理学不是量子力学,在内容、结构和教学方法上与量子力学有很大不同。本书从实验事实出发,注重实验所揭示的物理现象,注重如何去探测微观粒子的内部结构及其相互作用,如何测定一些重要的物理量。近代物理学不要求严格解决问题,而是关注现象背后的物理根源。除了必要的内容要作定量的计算外,常采用定性或半定量的分析方法,目的是培养学生习惯于使用量子力学方法去思考,善于利用物理直觉和物理图像去理解和分析物理问题。物理学是从实验中产生的,科学实验是物理新概念和新理论的源泉,对一些在近代物理学建立过程中起过重大作用的实验,我们尽力作出准确而翔实的分析,指出实验的设计思想和关键所在,以唤起学生对物理实验的高度重视。

本书由王永昌教授主编,第一章至第七章、第九章及附录由王永昌教授编写,第八章由黄丽清教授编写。作者感谢吴寿镛教授、李福利教授、张胜利教授、陈光德教授、赵军武教授和朱键副教授在本书编写过程中给予的支持和关心。作者曾就教材中的一些问题请教过兰州大学钱伯初教授、南开大学葛墨林教授、南京大学柯善哲教授、复旦大学王志松教授,西安交通大学李福利教授、张胜利教授和吴寿镛教授,在此对他们致以衷心的感谢。

承蒙华中科技大学杨建邺教授惠赠阿伯拉罕·派斯(美国)所著的《基本粒子物理学史》中译本,美国麻省理工学院江磊博士惠赠有关近代物理学方面的国外教科书,作者向他们深表谢意。

本书在完成过程中,刘佳誉同学和李普选老师为本书制作了大量的精美插图,刘佳誉、王军、潘华强、颜丙海、赵延瑞、杨杨、杨晓红、赵荣阔、郭超慧等同学曾为本书的完成做了许多工作,在此一并致谢。

最后感谢西安交通大学和高等教育出版社在本书出版过程中给予的大力支持。由于编写者水平有限,书中错误及不当之处请读者批评指正。

王永昌

2006年7月于西安交通大学

# 目 录

<b>第一章 物质的微观结构</b> .....	1
§ 1.1 物质的微观结构层次 .....	2
§ 1.2 物质微观结构各层次的基本特征 .....	4
§ 1.3 单位和物理常量 .....	6
1.3.1 单位 .....	6
1.3.2 物理常量 .....	8
§ 1.4 历史回顾 .....	10
<b>第二章 量子物理学的实验基础</b> .....	16
§ 2.1 经典物理学和量子物理学 .....	17
§ 2.2 经典物理学中的粒子和波 .....	18
2.2.1 经典物理中的粒子 .....	19
2.2.2 经典物理中的波 .....	19
§ 2.3 辐射的粒子性 .....	25
2.3.1 黑体辐射 .....	25
2.3.2 光电效应 .....	34
2.3.3 康普顿效应 .....	39
2.3.4 光子的引力效应 .....	49
2.3.5 光的双缝干涉实验 .....	51
§ 2.4 实物粒子的波动性 .....	53
2.4.1 德布罗意假设 .....	53
2.4.2 电子的晶体衍射实验 .....	54
2.4.3 电子的双缝干涉实验 .....	58
2.4.4 波函数的统计诠释和态叠加原理 .....	60
§ 2.5 研究原子结构的实验 .....	62
2.5.1 $\alpha$ 粒子散射实验和卢瑟福的原子有核结构模型 .....	62
2.5.2 原子光谱实验和玻尔的氢原子模型 .....	77
2.5.3 弗兰克-赫兹实验 .....	95
2.5.4 玻尔模型的局限性 .....	98
思考题 .....	99
习题 .....	100

<b>第三章 薛定谔方程</b>	102
§ 3.1 不确定关系	103
§ 3.2 薛定谔方程	107
3.2.1 薛定谔方程的建立	107
3.2.2 几个典型的定态问题	110
§ 3.3 量子力学中的力学量	122
3.3.1 力学量的平均值	122
3.3.2 力学量的本征值和本征函数	124
思考题	126
习题	126
<b>第四章 氢原子和碱金属原子</b>	128
§ 4.1 氢原子	129
4.1.1 氢原子的定态薛定谔方程及其解	129
4.1.2 电子概率密度分布	134
4.1.3 三个量子数的物理意义	138
4.1.4 定态的字称	142
4.1.5 跃迁的选择定则	143
§ 4.2 碱金属原子	145
4.2.1 碱金属原子光谱的实验规律	145
4.2.2 碱金属原子能级的粗结构和允许跃迁	146
4.2.3 碱金属原子光谱的解释	147
§ 4.3 电子的自旋与磁矩	150
4.3.1 电子轨道运动的磁矩	150
4.3.2 施特恩-盖拉赫实验	151
4.3.3 电子的自旋与磁矩	153
§ 4.4 光谱的精细结构	156
4.4.1 原子的总角动量	156
4.4.2 自旋-轨道相互作用	157
4.4.3 碱金属原子光谱的精细结构	159
4.4.4 氢原子光谱的精细结构	161
4.4.5 兰姆移位	163
思考题	165
习题	165

<b>第五章 多电子原子</b>	167
§ 5.1 中心力场近似	168
§ 5.2 泡利不相容原理	169
5.2.1 全同粒子与波函数的交换对称性	169
5.2.2 泡利不相容原理	170
§ 5.3 原子的壳层结构	171
5.3.1 原子的电子组态	171
5.3.2 原子中电子的壳层结构	173
5.3.3 元素周期表	176
§ 5.4 多电子原子能级的精细结构	179
5.4.1 剩余非中心库仑作用和自旋-轨道相互作用	179
5.4.2 $LS$ 耦合	180
5.4.3 $jj$ 耦合	188
§ 5.5 多电子原子的光谱	190
5.5.1 电偶极辐射跃迁的选择定则	190
5.5.2 氢原子的光谱	191
5.5.3 汞原子的光谱	193
§ 5.6 内壳层电子跃迁和特征 X 射线谱	194
5.6.1 原子的 X 射线能级	194
5.6.2 原子的 X 射线特征发射谱	195
5.6.3 X 射线的吸收	199
§ 5.7 激光原理	203
5.7.1 爱因斯坦辐射理论	203
5.7.2 激光原理	207
思考题	211
习题	212
<b>第六章 磁场中的原子</b>	214
§ 6.1 原子的磁矩	215
6.1.1 单电子原子的磁矩	215
6.1.2 多电子原子的磁矩	216
§ 6.2 磁场对原子的作用	217
6.2.1 拉莫尔进动	217
6.2.2 原子在磁场中的附加能量	218
§ 6.3 原子光谱的塞曼效应	219



6.3.1 正常塞曼效应 .....	220
6.3.2 反常塞曼效应 .....	222
6.3.3 帕邢-巴克效应 .....	227
§6.4 磁共振 .....	228
6.4.1 电子顺磁共振 .....	229
6.4.2 核磁共振 .....	231
思考题 .....	234
习题 .....	234
<b>第七章 分子</b> .....	<b>236</b>
§7.1 化学键 .....	237
7.1.1 离子键 .....	237
7.1.2 共价键 .....	240
§7.2 分子的能级和光谱 .....	246
7.2.1 分子内部运动的三种形式 .....	246
7.2.2 双原子分子的转动能级和光谱 .....	248
7.2.3 双原子分子的振动能级和光谱 .....	251
7.2.4 双原子分子的振转能级和振转光谱 .....	253
7.2.5 双原子分子的电子态 .....	255
§7.3 拉曼散射和光谱 .....	258
7.3.1 拉曼散射的主要实验结果 .....	259
7.3.2 拉曼效应的理论解释 .....	260
思考题 .....	262
习题 .....	263
<b>第八章 原子核</b> .....	<b>264</b>
§8.1 原子核的基本性质 .....	265
8.1.1 原子核的电荷和质量 .....	265
8.1.2 原子核的组成和大小 .....	265
8.1.3 原子核的自旋和磁矩 .....	267
8.1.4 原子核电四极矩 .....	268
8.1.5 原子核的统计性 .....	270
8.1.6 原子核的宇称 .....	271
8.1.7 原子核质量亏损和结合能 .....	271
§8.2 核力及核结构模型 .....	273

8.2.1 核力 .....	273
8.2.2 核结构模型 .....	274
§8.3 原子核的放射性衰变 .....	282
8.3.1 放射性衰变的一般规律 .....	282
8.3.2 $\alpha$ 衰变 .....	286
8.3.3 $\beta$ 衰变 .....	289
8.3.4 $\gamma$ 衰变和内转换 .....	293
8.3.5 穆斯堡尔效应 .....	294
§8.4 原子核反应、裂变和聚变 .....	297
8.4.1 原子核反应 .....	297
8.4.2 原子核的裂变 .....	302
8.4.3 原子核的聚变 .....	307
8.4.4 磁约束聚变装置和惯性约束聚变装置 .....	310
思考题 .....	313
习题 .....	314

## 第九章 粒子物理学 .....

§9.1 粒子物理学的崛起 .....	317
§9.2 四种基本相互作用 .....	318
§9.3 粒子的分类 .....	319
9.3.1 规范玻色子 .....	319
9.3.2 轻子 .....	319
9.3.3 强子 .....	324
§9.4 守恒量和守恒定律 .....	334
9.4.1 守恒量 .....	334
9.4.2 对称性与守恒定律 .....	338
§9.5 强子的夸克模型 .....	341
9.5.1 强子的八重态和十重态 .....	341
9.5.2 强子的夸克模型 .....	343
§9.6 色相互作用与色禁闭 .....	348
§9.7 粒子物理的标准模型 .....	349
思考题 .....	352
习题 .....	352

## 附录 A 基本物理常量 .....

附录 B 原子和核素的数据	356
附录 C 能量与相应的频率、波数及热力学温度 之间的换算	368
附录 D 电磁波谱	369
参考文献	370
习题答案	371

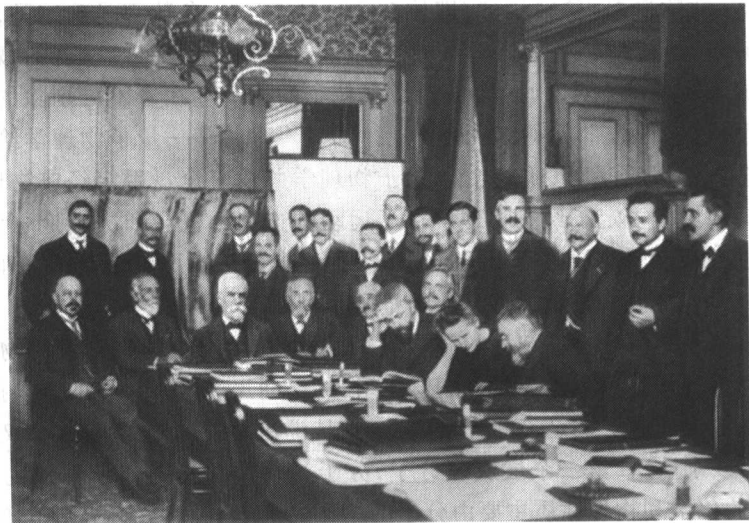
# 第一章



## 物质的微观结构



本章扼要介绍物质微观结构的全貌,说明物质微观结构链每一层次是由什么基本单元组成的,这些基本单元之间是如何相互作用的,具有什么样的基本特征,各层次之间又是怎么相互连接的.在微观领域内,经典物理学已经失效,描述物质微观结构、相互作用及运动规律的基本理论是量子物理学.全部内容涉及物理学的多个分支——分子、原子、原子核及粒子物理,是近代物理学的基本内容,也是本书以后各章阐述和讨论的内容.本章的最后,简要地介绍了人类探索物质微观结构的历史,这段历史告诉我们,从古希腊哲学家德谟克利特把构成物质的最小基元称为“原子”算起,人类经过了二千多年才认识到物质是由原子组成的,又经过了约一百年,建立了大爆炸宇宙模型和粒子物理的标准模型,但它们也只是人类探索宇宙起源和物质本质的重要里程碑,还有许多未解之谜等待着人们去揭开.



1911年10月29日在布鲁塞尔召开的第一届索尔威国际物理会议

在这次会议上,普朗克作了辐射能量量子化假设用于解释黑体辐射实验规律的报告.图中左起坐者:能斯特、布里渊、索尔威、洛伦兹、瓦伯、佩林、维恩、居里夫人、庞加莱;站立者:哥茨米特、普朗克、鲁本斯、索末菲、林德曼、德布罗意<sup>①</sup>、克努曾、海申诺尔、霍斯特勒、赫森、金斯、卢瑟福、卡末林-昂内斯、爱因斯坦、朗之万

<sup>①</sup> M. de Broglie 是电子具有波动性的提出者 L. de Broglie 之兄.

## § 1.1 物质的微观结构层次

物理学作为一门最基础的自然科学,以揭示物质的结构、相互作用和运动的基本规律作为自己的研究目标.由于一百多年来物理学在实验和理论方面所取得的巨大进展,人们现在已确切地知道物质的结构是分层次的,而且每一层次都有它自己的基本单元(以下简称基元)、相互作用类型和运动规律.物质结构的层次通常根据其基元存在的空间尺度来划分.总体上可分为宇观、宏观和微观三个大层次<sup>①</sup>.一般来说,如果我们在分子、原子尺度下研究各种物理现象,我们就进入了物质的微观层次,或如通常所说的进入了物质的微观世界.在这里研究宏观世界物质运动所使用的概念和图像不再适用,或者更确切地说,以牛顿(I. Newton, 1642—1727)力学和麦克斯韦(J. C. Maxwell, 1831—1879)电磁理论为基础的经典物理学对微观粒子的描述已经失效.正如本书后面的各章节要着重讲述的,微观粒子本身具有波粒二象性,它的坐标和动量不能同时确定,在位形空间中微观粒子不存在经典力学意义上的连续轨道运动,微观粒子的状态要用波函数(或称概率幅)来描述.即使整个实验的全部参数都是确定的,人们还是不能确定地预知单个微观粒子的观测结果,但每种结果可能出现的概率却可以通过波函数精确地计算出来,表明微观粒子的运动存在着不可剔除的统计性因果关系.这就是描述微观粒子运动规律的基本理论——量子物理学给物理学基本观念所带来的深刻变化.当然,量子物理学并没有全盘否定经典物理学,它只在微观领域内否定了经典物理学粒子运动的连续性概念和决定论思想.通过以后的学习,我们将看到,适用于宏观世界的经典物理学不过是量子物理学的极限形式,从本质上讲,整个物理学属于量子物理学.

本章将着重讨论物质结构的微观层次.根据迄今为止物理学家对物质微观结构研究所得到的基本认识,沿着基元存在的空间尺度愈来愈小的方向探索,物质的微观结构往深层次是不断分割的,也就是说在微观这个大层次内,又可以进一步分为几个层次.第一个层次是分子,分子是物质保持其化学性质的基本单元,物质的化学和物理性质主要由分子的结构决定.分子由若干个原子通过化学键结合而成.原子是第二个层次的基本单元.原子是化学元素的最小单元,一种化学元素是不能用化学方法再进行细分的纯物质,元素的所有原子具有相同的核电荷.迄今人们已知的元素达到114种之多,其中93号元素以后的元素为人

<sup>①</sup> 从行星到整个宇宙属于宇观层次,起支配作用的是粒子之间的万有引力作用,属于宏观层次的凝聚态体系则是粒子之间的电磁相互作用占支配地位.例如,参见:王正行,近代物理学.北京:北京大学出版社,1995. 527.

工合成的元素.原子是由若干电子和原子核组成的体系.原子核是第三个层次的基本单元.原子核主要由质子和中子组成,所以第四个层次的基本单元是强子,强子是参与强相互作用粒子的统称,各种介子和重子都属于强子,重子又分为核子(质子、中子)和超子.按照当今粒子物理的标准模型,强子由各种夸克构成,夸克的自旋为 $\frac{1}{2}$ ,是费米子,还有一些也是费米子的粒子,但不能参与强相互作用,称为轻子,轻子包括电子、 $\mu$ 子、 $\tau$ 子和各种中微子.夸克和轻子是更深层次的基本单元.直到目前为止,实验上尚未看到夸克和轻子有内部结构的迹象,夸克和轻子是否还有更深层次的结构,是物理学前沿研究正在探索的问题.

值得提到的是:物质的宏观和微观两个大层次之间并不是界线分明的,它们之间存在着过渡区域.近来,介于原子、分子与宏观块状固体之间的原子团簇(atomic clusters)和纳米微粒(nanoparticles)的研究取得了显著的进展.原子团簇,简称团簇,其空间尺度在0.1 nm至1 nm范围内,纳米微粒则是指尺度在1~100 nm的超微颗粒,它们是由几个乃至几千个原子通过各种化学键相结合构成的相对稳定的聚集体,许多性质既不同于单个原子分子又不同于块状固体(bulk),显示出许多奇异特性,如表面效应、量子尺寸效应、小尺寸效应和幻数结构<sup>①</sup>等.人们把团簇和纳米微粒看成介于原子、分子与宏观固体之间的物质结构的新层次,现已发展成为融合物理学、化学、生物学及材料科学等许多领域的交叉学科.如果通过适当的物理或化学方法,设法保持团簇和纳米微粒的原有特性,将它们镶嵌于某些基质内,再压成块体或做成薄膜,或将它们有序地排列,组装成为具有纳米结构的体系,便可制成具有各种独特性能的结构和功能器件,这已成为当今纳米科学与技术研究的目标.不过总体来说,团簇和纳米微粒的研究远未达到明朗化的成熟阶段,还有待实验和理论的进一步发展.

近年来在低温下对线度为 $10^{-6}$  m至 $10^{-7}$  m的低维样品的研究中发现了载流子波函数的干涉效应.载流子的非弹性散射平均自由程 $L_e$ .定义为相位相干长度,其意义是载流子在距离 $L_e$ 内不会遭遇非弹性散射而保持其相位相干性.线度接近或小于 $L_e$ 的系统,称为介观系统(mesoscopic system)<sup>②</sup>.这种准宏观系统,尺度在微米和亚微米量级,大于上面说的纳米微粒,并且可用宏观的手段测量系统的电流和电压等性质,但测量的结果却反映出载流子的量子力学特征.研究介观系统的介观物理学,除本身所具有的科学意义外,也将为下一代微电子学

<sup>①</sup> 相对稳定的团簇中所包含的原子个数称为幻数(magic number),如碳的团簇 $C_{60}$ 包含60个碳原子,外形像足球, $C_{70}$ 包含70个原子,类似于橄榄球形.它们所有的碳原子处在球表面上.1991年发现的碳纳米管是由碳六环组成的类似于石墨的平面一片片卷叠而成的圆筒形结构,它具有独特的孔隙结构,大的比表面(每克物质的表面积),呈现出高抗张强度、高电导率和高热稳定性等特性.

<sup>②</sup> 阎胜胜,甘子钊.介观物理.北京:北京大学出版社,1995.前言.

的发展奠定理论基础.

## § 1.2 物质微观结构各层次的基本特征

表征物质微观结构各层次的基本特征是其结构基元存在的空间尺度. 分子种类繁多, 从简单的无机分子到复杂的生物大分子, 其空间尺度大约分布在  $10^{-9}$  m 至  $10^{-4}$  m 之间, 分子典型的空间尺度是  $10^{-9}$  m. 原子和原子核的尺度分别为  $10^{-10}$  m 和  $10^{-14}$  m 量级, 质子、中子等强子的尺度与原子核相比要小, 为  $10^{-15}$  m 量级. 高能物理实验结果表明夸克和轻子的空间尺度小于  $10^{-19}$  m, 即小于原子尺度的十亿分之一. 图 1-1 为物质微观结构链及各层次的空间尺度.

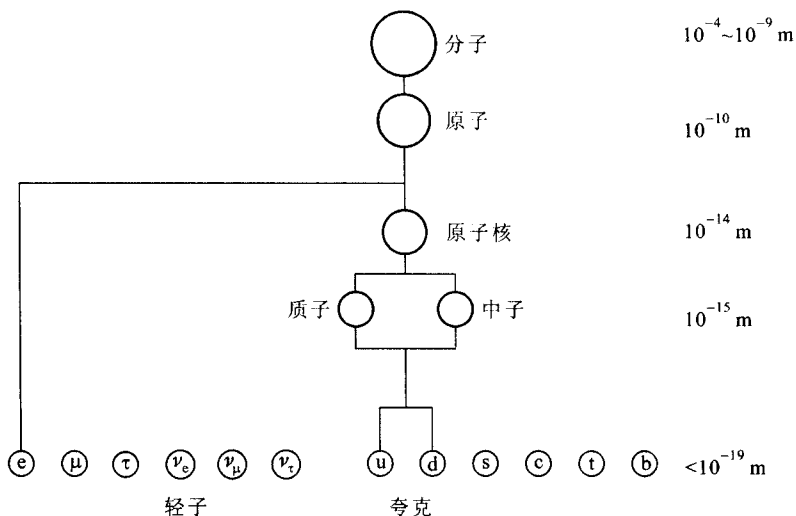


图 1-1 物质的微观结构链及各层次的空间尺度

每一层次结构基元之间的相互作用类型是另一重要基本特征. 现在已了解所有粒子之间的相互作用可归为四种类型: 引力相互作用、弱相互作用、电磁相互作用和强相互作用, 它们之间强度之比约为  $10^{-39}: 10^{-5}: 10^{-2}: 1$ . 对原子和分子层次, 起支配作用的是电磁相互作用; 原子核主要由中子和质子组成, 质子和中子统称为核子, 核子之间靠强大的核力紧密地束缚在一起, 核力属强相互作用, 具有短程性质, 只在  $10^{-15}$  m 距离内才起作用. 原子核内质子之间也存在库仑静电排斥作用, 但比核力弱二至三个数量级. 强子的结构基元是夸克, 夸克之间的相互作用为强相互作用, 标志夸克强相互作用性质的强荷就是夸克的色态, 又称色荷, 所以这种强相互作用又称为色相互作用. 色相互作用具有“禁闭”的性质, 它使得夸克相距越远则作用越强, 以至于不能把单个夸克从强子中分离出

来. 核子没有色荷, 是色中性粒子, 但当一个核子内的夸克与另一个核子的夸克靠得很近, 达到  $10^{-15}$  m 量级时, 就有强相互作用, 所以核力具有短程性. 轻子只参与弱相互作用, 电磁相互作用和引力相互作用, 不参与强相互作用. 弱相互作用是极短程相互作用, 只在  $10^{-19}$  m 这样小的距离内出现, 它在粒子的衰变过程中起作用. 在微观层次内, 与其他三种类型的相互作用相比, 引力相互作用太弱, 通常不予考虑. 图 1-2 为物质微观结构链各层次起支配作用的相互作用.

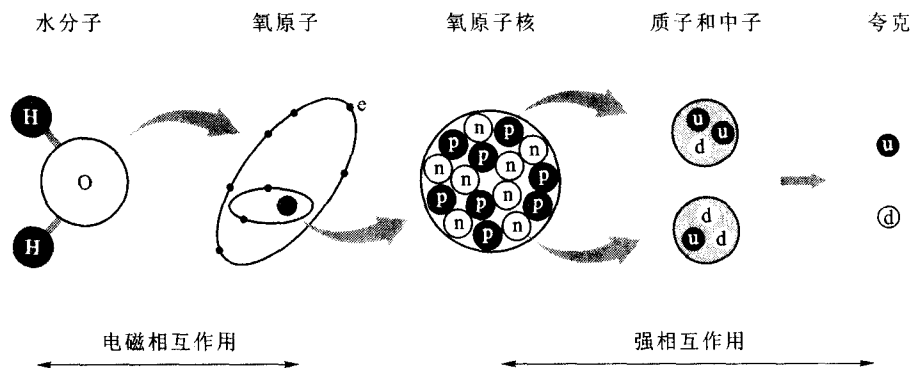


图 1-2 物质微观结构链各层次起支配作用的相互作用

由以上讨论可以看出, 微观层次的结构基元的空间尺度愈小, 结构基元之间的相互作用愈强. 以后我们将看到这是由于微观粒子具有波粒二象性, 遵循不确定关系的结果. 按照不确定关系, 把一个粒子束缚在空间尺度愈小的范围里, 粒子的平均动能愈大, 为了束缚它, 结构基元之间的结合能将愈来愈大, 例如分子内原子间的结合能约为几个电子伏(eV), 原子内外层电子和内层电子的结合能为 eV 至 keV 量级, 原子核内每个核子的平均结合能则高达 MeV 量级. 现在已经知道, 各层次基本结构基元的空间尺度和相互作用类型不同, 每一层次有它自己的基本运动规律, 也就是说, 物质结构往深层次的不断分割并不是简单地重复. 例如原子的有核模型结构到原子核已不复存在, 到了夸克层次更有新的特点. 迄今为止, 实验上并没有直接观察到自由的夸克. 正如前面已说过的, 夸克之间的相互作用具有“禁闭”性质, 夸克相距越远则作用越强, 从而使得最终把夸克分开所需的能量成为无穷大, 实际上在外界提供的能量远不到无穷大时就发生了新的情况. 把质子打碎后看到的不是夸克, 而是夸克强化后的各种强子和共振态, 质子的碎片与质子本身一样大. 可见在这样的情况下, 说质子“是可分割的”, 已不具有其字面上的意义, 至少其“分割”的含义已与分子、原子和原子核层次的“分割”大不相同了. 人们可以用实验手段将分子分离成各个原子或离子, 将原子或离子分离成电子和原子核, 将原子核分离成质子和中子, 如果原则



上不能把夸克从强子内分离出来,则物质结构的根本观念就会发生重大变化,很可能从夸克和轻子往下,物质更深层的结构不再是由若干组分粒子组合起来的。总之,沿着空间尺度减小的方向,物质微观结构的复杂性大大增加了,每一层次都有自己的新概念和新规律,而且一般说来,每一层次的运动规律并不能从更深层次的规律得到。按照当今的**大爆炸宇宙模型**,宇宙起源于 100 至 200 亿年以前的一次大爆炸,由此产生了物质、空间与时间,当产生后的宇宙开始膨胀和冷却下来的时候,很像在微观上经历了从夸克轻子层次到原子分子层次的每个台阶,在宏观和宇观上经历了由大量原子分子形成的凝聚态物质逐渐演化出星体和星系的过程,并发展到地球或其他行星上出现生命现象,而且在演化过程的每一台阶上都产生了别具一格的物质图景和多姿多彩的复杂性。大爆炸宇宙模型将物质结构链的最小微观层次和最大的宇观层次奇妙地联系起来,近代物理学的两大支柱——量子物理学和相对论在这里共同起作用,四种相互作用在这里和谐地统一起来。不过这幅神奇的宇宙演化图景还笼罩着厚厚的神秘面纱,还有许多未解之谜等待着人们去揭开。

物质微观各层次的基本特征除了结构基元的空间尺度和相互作用类型外,还有各层次结构基元的质量、自旋、平均寿命、同位旋和内禀宇称等重要物理量以及有关相互作用过程的对称性和守恒定律,我们将在本书以后各章作进一步描述。

## § 1.3 单位和物理常量

### 1.3.1 单位

本书中物理量的单位采用国际单位制,即 SI。SI 中以长度(m,米)、质量(kg,千克)、时间(s,秒)、电流(A,安培)、热力学温度(K,开尔文)、物质的量(mol,摩尔)和发光强度(cd,坎德拉)等 7 个量作基本量,相应于这 7 个量的单位为 SI 的基本单位,其他物理量则根据定义或物理方程表示,称为导出量,它们的单位称为导出单位。如 SI 中能量和功的单位为 J(焦耳),或采用 SI 允许使用的电子伏(eV)为单位。

$$1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J} \quad (1.1)$$

纵观宇宙之大( $\sim 10^{26}$  m),夸克和轻子之小( $< 10^{-19}$  m),数量级相差  $10^{45}$  倍之多,因此在不同物质结构层次使用一种度量单位去进行数值计算显然是不方便的。国际单位制的基本单位是针对我们日常所接触的宏观物质体系而选定的,对不同微观层次,物理学家根据其结构基元存在的空间尺度和相互作用能量大小,选用了相适应的十进制倍数度量单位。为了清楚起见,表 1.1 列出了国际