

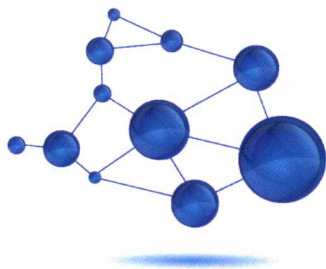
# 经典与近代物理学 核心理论研究

邓洪亮◎著

---

JINGDIAN YU JINDAI WULIXUE HEXIN LILUN YANJIU

---



一级出版社”



中国纺织出版社 “全国百佳图书出版单位”

# 经典与近代物理学 核心理论研究

邓洪亮◎著

## 内 容 提 要

本书按经典与近代物理内容组建全书框架,突出了基本概念和研究思路及方法,并将近代物理知识、观点和物理理论在工程技术上的应用等内容有机渗透到全书各部分。本书主要内容包括:经典与近代物理、狭义相对论、量子力学概论、氢原子和能级、原子核物理、粒子物理、凝聚态物理、天体和宇宙等。本书着重看中基本的实验现象,讲解基本的物理思想和规律,对物理概念力求解释清楚,去掉表面繁杂的、不必要的理论推导,做到说理清楚、重点突出、条理分明,是一本值得学习研究的著作。

### 图书在版编目(CIP)数据

经典与近代物理学核心理论研究 / 邓洪亮著. -- 北京:中国纺织出版社, 2017.11  
ISBN 978-7-5180-3907-4

I. ①经… II. ①邓… III. ①物理学-理论研究  
IV. ①O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 188055 号

---

责任编辑:姚 君

责任印制:储志伟

---

中国纺织出版社出版发行

地址:北京市朝阳区百子湾东里 A407 号楼 邮政编码:100124

销售电话:010-67004422 传真:010-87155801

<http://www.c-textilep.com>

E-mail: [faxing@e-textilep.com](mailto:faxing@e-textilep.com)

中国纺织出版社天猫旗舰店

官方微博 <http://www.weibo.com/2119887771>

虎彩印艺股份有限公司印刷 各地新华书店经销

2017年11月第1版第1次印刷

开本:710×1000 1/16 印张:15.875

字数:287千字 定价:63.50元

---

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社图书营销中心调换

# 前 言

物理学是研究物质与运动基本规律的科学,其内容包括物质的结构、物质间的各种基本相互作用和物质的基本运动形态等。从基本上讲,近代物理学的理论体系主要来源于 20 世纪初的物理学三大成就,即爱因斯坦的相对论、量子理论以及原子核与粒子物理,它们决定了 20 世纪以后的科学技术的全貌。物理学的各分支学科是按物质的不同存在形式和不同运动形式划分的。概括起来主要包括理论物理、粒子物理与原子核物理、原子和分子物理、凝聚态物理、量子物理及天体物理等分支。

近十多年,随着人们对自然界认识的不断深入,一维自旋链以及高维自旋晶格中自旋关联在量子信息领域引起人们广泛兴趣。随着研究的深入,各种可调控相互作用的自旋结构模型被引入用来实现量子通信。除了自旋链以及立方自旋晶格以外,星型强耦合自旋模型就是一个可实现诸多量子信息处理任务的自旋网络结构。位于星型结构中心的自旋和包围它的自旋环存在相互作用,同时自旋环上的各个自旋间也可能存在最邻近相互作用。这种结构与常用于通讯的星型分配网络极为相似,利用星型结构模型实现各种量子通讯任务。在这个星型结构模中,作者研究了自旋星型结构模型中的量子相变、量子存储和量子态传输、量子克隆方案、单自旋测量方案等重要科学内容。在本书中,作者特设专门篇章对量子计算与量子信息作了比较全面的概述,以便读者更加准确地了解这些经典与近代物理学核心理论的成就。

本书共分 8 章。第 1 章为经典与近代物理的概述;第 2 章为狭义相对论,主要介绍了狭义相对论的原理、时空观以及质量、能量和动量等;第 3 章为量子力学概论,主要介绍物理学中的粒子和波、波粒二象性分析、薛定谔方程及应用等;第 4 章为氢原子和能级,主要包括氢原子的玻尔模型、电子自旋和泡利原理以及氢原子能级精细结构和超精细结构等内容;第 5~7 章为原子核物理、粒子物理及凝聚态物理的论述;第 8 章则介绍了天体和宇宙的内容。本书着重看中基本的实验现象,讲解基本的物理思想和规律,对物理概念力求解释清楚,去掉表面繁杂的、不必要的理论推导,做到说理清楚、重点突出、条理分明。

通过本书的介绍,有利于读者在更广的领域从事研究、教学、应用和其他工作提供参考,是作者最大的安慰,也是本书撰写的出发点。

本书在撰写过程中参考了大量书籍和文献,但由于作者能力有限,文中难免出现疏漏之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

2017年5月

# 目 录

<b>第 1 章 经典与近代物理</b> .....	1
1.1 从经典物理到近代物理 .....	1
1.2 近代物理学的基本问题 .....	4
1.3 单位和物理常量 .....	8
<b>第 2 章 狭义相对论</b> .....	12
2.1 狭义相对论以前的力学和时空观 .....	12
2.2 爱因斯坦的假设与洛伦兹变换 .....	15
2.3 狭义相对论的时空观 .....	19
2.4 狭义相对论中的质量、能量和动量 .....	26
2.5 相对论多普勒效应 .....	32
2.6 广义相对论简介 .....	34
<b>第 3 章 量子力学概论</b> .....	42
3.1 经典物理学和量子物理学 .....	42
3.2 经典物理学中的粒子和波 .....	43
3.3 微观粒子的波动性 .....	49
3.4 不确定关系 .....	52
3.5 波函数及其物理意义 .....	54
3.6 薛定谔方程 .....	58
3.7 薛定谔方程的应用 .....	60
3.8 薛定谔方程的若干定性讨论 .....	67
3.9 量子力学中的力学量 .....	69
<b>第 4 章 氢原子和能级</b> .....	72
4.1 氢原子的玻尔模型 .....	72
4.2 能量与角动量大小和取向量子化 .....	80

4.3	薛定谔方程的氢原子问题的解及意义	84
4.4	电子自旋和泡利原理	90
4.5	氢原子能级的精细结构与超精细结构	96
4.6	多电子原子角动量耦合和能级的精细结构	101
4.7	激光	103
<b>第5章</b>	<b>原子核物理</b>	107
5.1	原子核的发现和其基本性质	107
5.2	原子核结构模型	114
5.3	原子核的放射性衰变和基本相互作用	120
5.4	原子核的组成核反应	130
5.5	核能的利用——核裂变和核聚变	134
<b>第6章</b>	<b>粒子物理</b>	142
6.1	基本粒子的发现	142
6.2	粒子的分类与基本性质	147
6.3	粒子的相互作用	153
6.4	强子的夸克模型	156
6.5	粒子物理实验简介	167
<b>第7章</b>	<b>凝聚态物理</b>	173
7.1	凝聚态物理基本概念	173
7.2	晶体的结构	173
7.3	晶格振动理论	185
7.4	能带理论及导体、绝缘体和半导体的区别	195
7.5	金属电导的量子理论	203
7.6	凝聚态物理的新进展	218
<b>第8章</b>	<b>天体和宇宙</b>	221
8.1	天体物理概述	221
8.2	天体物理测量方法	228
8.3	现代宇宙学概论	238
8.4	宇宙膨胀与大爆炸模型	240
8.5	宇宙结局与暗物质	245
	<b>参考文献</b>	248

# 第 1 章 经典与近代物理

20 世纪初,物理学基本观念经历了三次影响深远的革命。作为这三次革命的标志和成果,就是狭义相对论、广义相对论和量子力学的建立。

## 1.1 从经典物理到近代物理

### 1.1.1 狭义相对论

狭义相对论修改了关于时间和空间的观念。在相对论建立之前,物理学关于时间和空间的观念,是牛顿(Isaac Newton)的绝对时空观念。牛顿绝对时空观念,认为时间与空间互相独立,各都具有绝对的含意,与物质和运动的情形无关。而在速度接近光速的高速领域,物理研究的经验表明,时间与空间互相联系,并不互相独立。它们作为统一的四维时空的不同侧面,与惯性参考系的选择有关,只有统一的四维时空,才具有与惯性参考系选择无关的绝对意义。这就是爱因斯坦(Albert Einstein)狭义相对论的时空观念。爱因斯坦于 1905 年提出他的相对性原理和光速不变性原理,在此基础上建立了狭义相对论。按照狭义相对论,只有当所涉及的速率  $v$  比光速  $c$  小得多时,即:

$$\frac{v}{c} \ll 1$$

牛顿绝对时空观念才近似适用,而当所涉及的速度可与光速相比时,应代之以相对论的时空观念。

### 1.1.2 广义相对论

爱因斯坦 1916 年进一步建立了广义相对论。广义相对论的基础是根据惯性质量与引力质量相等提出的等效原理。等效原理认为局部范围的引力场等效于加速的非惯性参考系。把等效原理与狭义相对论相结合,就会



发现时钟与标尺会受到引力场的影响,从而时空性质不仅依赖于参考系的选择,还依赖于物质及其运动的情形,而不具有任何绝对的含义。这就是爱因斯坦广义相对论的时空观念。只有当引力场较弱时,亦即:

$$\frac{G_N M}{c^2 r} \ll 1$$

才能近似忽略物质对时空性质的影响。其中  $G_N$  是万有引力常数,  $M$  是产生引力场的质量,  $r$  是场点到引力中心的距离。

### 1.1.3 量子力学

量子力学是物理学研究的经验扩充到微观领域的结果。它修改了物理学中关于物理世界的描述以及物理规律的陈述的基本观念,影响更深远。

19 世纪末,相继发现天然放射性、X 射线和阴极射线,物理学研究深入到原子结构的微观物理世界。探索微观世界所积累的物理经验逐渐表明,微观现象的基本特征是波粒二象性。对于波粒二象性所包含的物理,玻恩 (Max Born) 于 1926 年提出了波函数的统计诠释,认为描述微观现象波动性的波函数只是用来计算测量结果出现概率的数学工具,不具有实在的物理含意。这就在两个方面改变了物理学的基本观念:一是关于物理世界的描述方式,即物理图像问题;另一是关于物理规律的表达形式,即因果关系问题。

在宏观物理中,原因与结果之间一定可以找到明确肯定的联系,天王星轨道意外的摄动一定对应某种原因。这种观念直接导致了海王星的发现,而这种关于原因与结果之间有决定性联系的因果观念则被称为拉普拉斯 (Laplace) 决定论的因果关系。微观物理则不同。在电子束的双缝衍射中,不可能预言电子将肯定落到屏幕上哪一点。它落到屏幕上任何一点都是可能的,只能预言它落到屏幕上每一点的概率有多大,在钴 60 的  $\beta$  衰变中,不可能预言钴核将肯定在什么时刻放出电子,它在任何时刻都可能衰变,只能预言它在某一时刻衰变的概率有多大。量子力学表达的物理规律是统计性的,在原因与结果之间不再能给出明确肯定的联系,对一定的物理条件,它只能预言可以测到哪些结果,以及测到每一种可能结果的概率是多少。

一个物理过程的作用量  $S$  可以写成:

$$S = \int_{t_1}^{t_2} L(q, \dot{q}, t) dt$$

其中  $L(q, \dot{q}, t)$  称为体系的拉格朗日 (Lagrange) 函数,定义为体系动能与势能之差,作为广义坐标  $q$  与广义速度  $\dot{q}$  的函数。在数量级上,  $S$  大致比例于

能量与时间的乘积,或动量与位移的乘积。量子力学表明,只有当作用量  $S$  比约化普朗克(Planck)常数  $\hbar$  大得多时,亦即:

$$S \gg \hbar$$

才能近似忽略量子效应,而使用轨道的描述和拉普拉斯决定论的因果关系。当所涉及的物理过程其作用量可与约化普朗克常数相比时,微观现象的波粒二象性就很明显,而要代之以波函数的描述和统计性的因果关系。这就是量子力学关于微观世界的物理图像和微观规律的因果关系方面给物理学基本观念所带来的巨大改变。

### 1.1.4 近代物理学

以相对论和量子力学的基本观念作为标准,可以把物理学划分为经典物理学和近代物理学。以牛顿绝对时空观念和拉普拉斯决定论因果关系为基础,能够在时空中给出直观而且实在的描述的物理学,属于经典物理学;以爱因斯坦相对论时空观念或统计性因果关系为基础的物理学,则属于近代物理学。近代物理学按其基本观念又可分成三部分,采用相对论时空观念,但保留时空中的直观描述和决定论因果关系的,称为相对论物理学。采用统计性因果关系和波函数的描述,但保留绝对时空观念的,称为非相对论性量子物理学,既采用相对论时空观念又采用统计性因果关系和波函数的描述的,称为相对论性量子物理学。

经典物理学是在宏观和低速领域物理经验的基础上建立起来的物理概念和理论体系,其基础是牛顿力学和麦克斯韦(Maxwell)电磁学。近代物理学则是在微观和高速领域物理经验的基础上建立起来的概念和理论体系,其基础是相对论和量子力学。表 1-1 给出了这种按领域的划分。

表 1-1 经典物理学和近代物理学

	低速 ( $v \ll c$ )	高速 ( $v \simeq c$ )
宏观 ( $S \gg \hbar$ )	经典物理学	相对论物理学
微观 ( $S \sim \hbar$ )	非相对论性量子物理学	相对论性量子物理学

必须指出,在相对论和量子力学建立以后的当代物理学研究中,虽然大量的近代物理学问题,但也有不少属于经典物理学问题。在这本近代物理学中,我们不讨论这种当代物理前沿中的经典物理问题。此外,当代物理研究前沿中还有一些并不属于传统经典物理的问题。例如关于相变、非平衡态热力学、化学反应过程以及各种物理现象中的孤立波的研究,正在形成

一个被称之为“混沌”的广大领域,或者根据其数学特征而被称之为“非线性科学”的领域。又如把物理的研究方法和思维方式延伸运用于社会乃至人文现象,衍生发展出来的经济物理、金融物理、交通物理和社会物理(Sociophysics)等领域,它们也都不是这本近代物理学所要讨论的范围。

## 1.2 近代物理学的基本问题

近代物理学的主体,是讨论作为近代物理学基础的相对论和量子力学的基本概念和规律,并在此基础上分别讨论从微观到宏观直到宇观的物质结构各个层次的性质和规律。这包括粒子、原子核、原子、分子,固体、液体凝聚态和气体,天体和宇宙等领域,而其中作为近代物理学诞生地和最早研究的领域,是原子物理学。

### 1.2.1 电磁相互作用为主的层次

原子是一个原子核与若干电子构成的体系。把电子束缚在原子核周围的相互作用,主要是原子核的正电荷与电子的负电荷之间的库仑相互作用。分子是一些原子核与若干电子构成的束缚体系,支配分子结构的主要相互作用也是粒子间的库仑相互作用。固体和液体作为大量原子核与电子束缚形成的规则或不规则空间排列体系,主要也是受粒子间库仑相互作用的支配。气体分子间的碰撞和微弱的相互吸引,同样也主要是粒子间库仑相互作用的表现。粒子一般还有磁矩,它们之间还存在磁相互作用,它比粒子间的库仑相互作用要小几个数量级。一般地说,粒子间的电磁相互作用,是从微观原子结构到宏观凝聚态这样广大范围的物质结构中占支配地位的相互作用。

在物质结构的这些层次,粒子的电荷都是基本电荷  $e$  的整数倍。我们把粒子电荷的这一特征称为电荷的量子化。荷电粒子间的库仑相互作用比例于基本电荷的平方。在实际物理问题中,表征电磁相互作用强度的是无量纲组合常数:

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} = \frac{1}{137.0}$$

这里我们采用国际单位制; $\epsilon_0$  是真空介电常数; $\alpha$  被称为精细结构常数,它最早出现于与原子光谱精细结构有关的公式中。

### 1.2.2 万有引力相互作用为主的层次

从天体到宇宙范围的物理世界可称为宇观世界。在宇观世界的物质结构层次,起支配作用的是粒子之间的万有引力相互作用。构成体系的粒子数目达到宇观数量级,正负电荷和不同磁矩方向的混杂,把电磁相互作用屏蔽和局限在宏观的小范围。而粒子数目的增加,使万有引力的作用突出出来。

在引力场较弱的情形下,牛顿万有引力定律近似适用。在引力场较强的情形下,就要代之以爱因斯坦的广义相对论。无论是弱引力场还是强引力场,与电磁相互作用相比,万有引力都是十分弱的一种相互作用。万有引力相互作用的强度比例于相互作用粒子的质量。在宇观层次的实际天体物理问题中,可以用无量纲组合常数:

$$\frac{G_N m_p^2}{\hbar c} = 5.91 \times 10^{-39}$$

来表征万有引力相互作用强度。其中  $m_p$  是质子质量;  $G_N$  是万有引力常数。

### 1.2.3 粒子物理层次

研究各种粒子的性质、变化和相互作用规律,是粒子物理层次的问题。粒子物理的一个基本问题是:粒子间有哪些基本相互作用,它们有什么性质和规律,以及它们如何支配粒子间的作用和变化。现在已经了解,粒子间的基本相互作用有四种,除了电磁相互作用、万有引力相互作用和强相互作用外,还有一种弱相互作用外,它的作用距离很短,它的强度通常是在电磁相互作用与万有引力相互作用之间。

粒子物理的另一基本问题是:粒子是否有结构,如果有的话,它们的组成单元是什么,它们如何由这些结构单元构成。现在的了解和看法是,具有强相互作用的粒子,如核子、核子共振态、各种介子和超子等都有结构,由统称为强子的夸克结构单元以及在夸克间传递强相互作用的胶子构成。而光子和轻子没有结构,它们本身就是最基本的结构单元。

从这种观点看,核子之间的强相互作用是构成核子的夸克之间强相互作用的结果。在这个意义上,核子以及其他各种由夸克构成的强子也属于强相互作用为主的层次。

概括地说,支配各种粒子运动的基本规律是相对论和量子力学,而存在于各种粒子间的基本相互作用有强相互作用、电磁相互作用、弱相互作用和

万有引力相互作用四种。在不同情况下,占支配地位的相互作用不同,这就形成了微观、宏观和宇观的各个物质结构层次。所以,近代物理学就是研究粒子运动的基本规律和粒子间的基本相互作用,以及在这些基本规律和相互作用支配下物质结构各个层次的性质、特点和规律的物理学。宇宙中物质结构各个层次的质量和尺度见图 1-1。

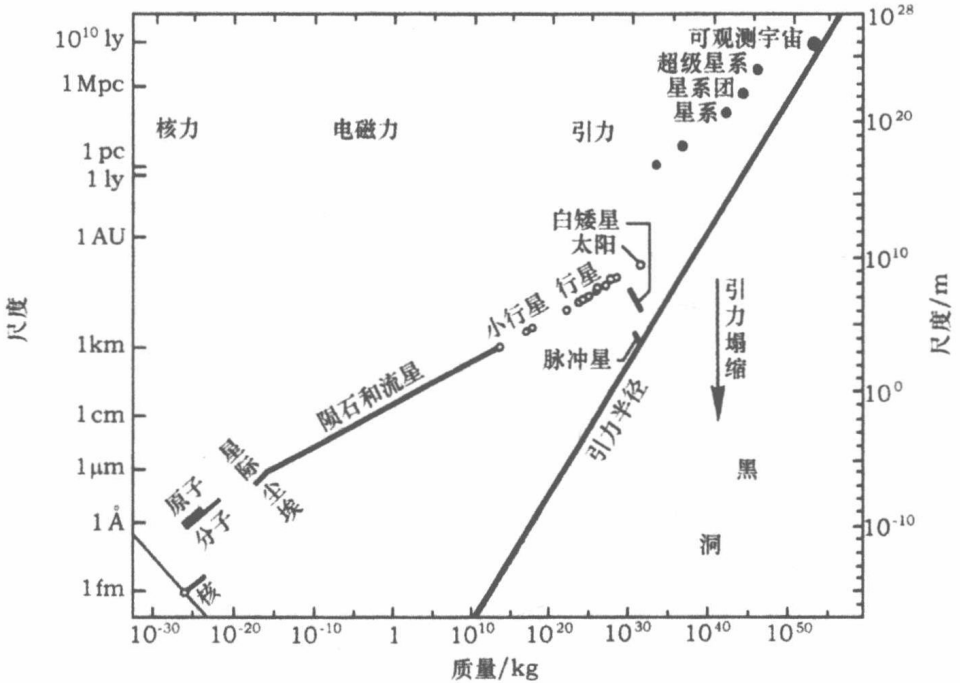


图 1-1 宇宙中物质结构各个层次的质量和尺度

### 1.2.4 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,分子的种类繁多,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  $10^{-9}\text{m}$  至  $10^{-4}\text{m}$  之间,分子典型的空间尺度是  $10^{-9}\text{m}$ 。原子和原子核的尺度分别为  $10^{-10}\text{m}$  和  $10^{-4}\text{m}$  量级,质子、中子等强子的尺度与原子核相比要小,为  $10^{-5}\text{m}$  量级。高能物理实验结果表明夸克和轻子的空间尺度小于  $10^{-9}\text{m}$ ,即小于原子尺度的十亿分之一。图 1-2 为物质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

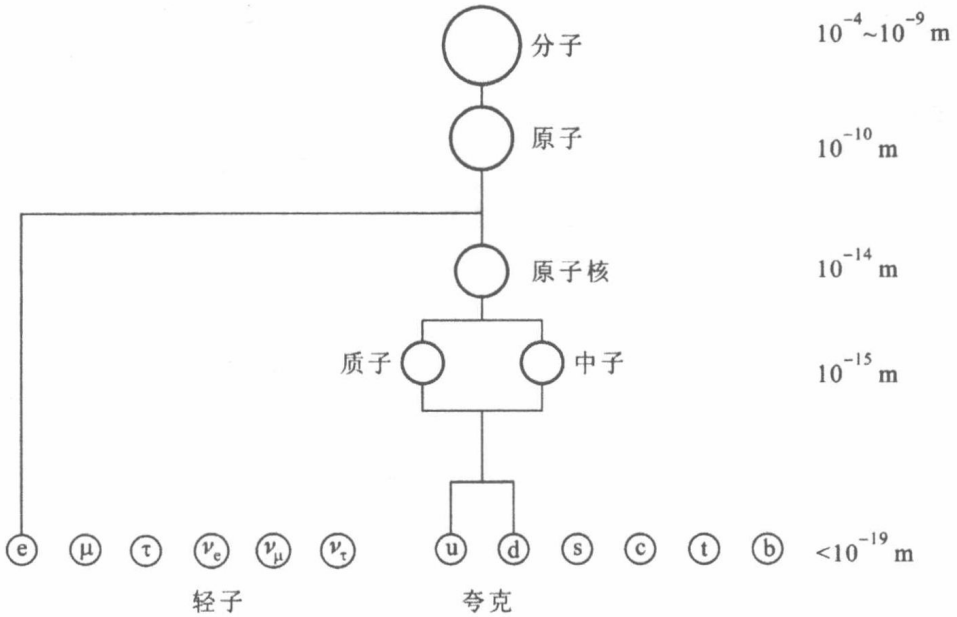


图 1-2 物质的微观结构链及各层次的空间尺度

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  $10^{-5} \text{ m}$  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  $10^{-15} \text{ m}$  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  $10^{-19} \text{ m}$  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 1-3 为物质微观结构链各层次起支配作用的相互作用。

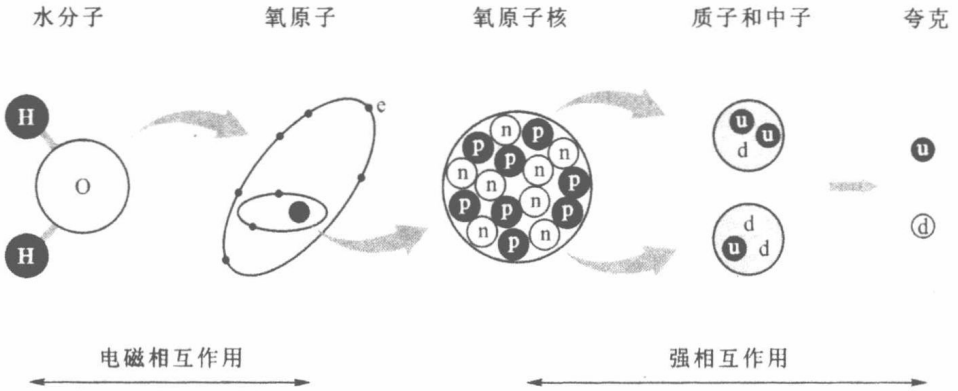


图 1-3 物质微观结构链各层次起支配作用的相互作用

## 1.3 单位和物理常量

### 1.3.1 单位

本书采用国际单位制 SI。在单位的选择上,在物质结构的不同层次,有各自习惯和方便的选择。在宏观凝聚态层次,长度用米(m),能量用焦耳(J),国际单位制的基本单位米、千克、秒等就是针对我们日常生活世界这一宏观物质结构层次而选定的。

在粒子物理和原子核层次,长度单位用飞米(fm),能量单位用兆电子伏(MeV)和吉电子伏(GeV),即:

$$1\text{fm} = 10^{-15}\text{m} \quad 1\text{MeV} = 10^6\text{eV} \quad 1\text{GeV} = 10^9\text{eV}$$

$$1\text{eV} = 1.602176487(40) \times 10^{-19}\text{J}$$

括号中的数值是最后两位的标准偏差。fm 是核子大小的数量级,MeV 是原子核内核子结合能的数量级,而 GeV 是核子静质能的数量级。核物理学家和粒子物理学家习惯上把 fm 称为费米,以纪念著名核物理和粒子物理学家费米(E. Fermi)。

在原子和分子层次,长度单位用埃(Å)或纳米(nm),能量单位用电子伏(eV)和千电子伏(keV),即:

$$1\text{Å} = 10^{-10}\text{m} \quad 1\text{nm} = 10^{-9}\text{m} \quad 1\text{keV} = 10^3\text{eV}$$

Å 是原子大小的数量级,是国际单位制中允许暂时并用的单位。eV 是原子中外层电子结合能的数量级,keV 是重元素内层电子结合能的数量级。

在天体层次,习惯上用太阳半径  $R_{\odot}$  作为长度比较的一个相对标准,用太阳质量  $M_{\odot}$  作为质量比较的一个相对标准,即:

$$1 R_{\odot} = 6.961 \times 10^8 \text{ m}$$

$$1 M_{\odot} = 1.98844(30) \times 10^{30} \text{ kg}$$

在星系层次,国际单位制允许并用的两个方便的长度单位是天文单位(AU)和秒差距(pc)。天文单位是一个质量无限小的物体围绕太阳运行的无摄动圆周轨道半径的长度,其恒星角速度为  $0.017202098950$  弧度/日。这实际就是地球轨道半长径,即:

$$1 \text{ AU} = 1.49597870660(20) \times 10^{11} \text{ m}$$

秒差距是1天文单位所张的角度为1角秒的距离,即:

$$1 \text{ pc} = 3.0856775807(4) \times 10^{16} \text{ m} = 206265 \text{ AU}$$

此外,也常用光年(ly)作为长度比较的相对标准,即:

$$1 \text{ ly} = 9.461 \times 10^{15} \text{ m} = 63240 \text{ AU}$$

### 1.3.2 常数

近代物理学中最基本的两个物理常数,是与相对论相联系的光速  $c$  和与量子力学相联系的约化普朗克常数  $\hbar$ 。约化普朗克常数  $\hbar$  定义为普朗克常数( $h$ )除以  $2\pi$ 。即:

$$c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1.054571628(53) \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

在原子分子层次,占支配地位的相互作用是电磁相互作用,表征电磁相互作用强度的基本电荷  $e$  是一基本物理常数,即:

$$e = 1.602176487(40) \times 10^{-19} \text{ C}$$

此外,还有联系微观物理量与宏观物理量的两个基本常数,即玻尔兹曼(Boltzmann)常数  $k_B$  和阿伏伽德罗(Avogadro)常数  $N_A$ ,即:

$$k_B = 1.3806504(24) \times 10^{23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$N_A = 6.02214179(30) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

实际上,玻尔兹曼常数是微观能量单位开尔文(K)与宏观能量单位焦耳(J)的比值,阿伏伽德罗常数是宏观质量单位克(g)与微观质量单位原子质量单位(u)的比值,所以这两个常数是单位换算常数。1原子质量单位等于碳12原子质量的1/12,即:

$$1 \text{ u} = \frac{1 \text{ g}}{N_A} = 1.660538782(83) \times 10^{-27} \text{ kg}$$



在微观物理量的具体计算中,更方便的是用

$$1\text{u} = 931.5\text{MeV} \cdot \text{c}^{-2}$$

$$k_{\text{B}} = 8.617 \times 10^{-5} \text{eV} \cdot \text{K}^{-1}$$

和下述组合常数:

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} = 14.40\text{eV} \cdot \text{\AA} = 1.440\text{eV} \cdot \text{nm} = 1.440\text{MeV} \cdot \text{fm}$$

$$\hbar c = 1973\text{eV} \cdot \text{\AA} = 197.3\text{eV} \cdot \text{nm} = 197.3\text{MeV} \cdot \text{fm}$$

上述二式中前两个数用于原子分子层次较方便,后一个数用于原子核与粒子层次较方便。这两个数 1.440 与 197.3 的比值,就是精细结构常数  $\alpha = 1/137.0$ 。

在天体和宇宙层次,万有引力相互作用占支配地位,万有引力常数  $G_{\text{N}}$  是一基本物理常数:

$$G_{\text{N}} = 6.67428(67) \times 10^{-11} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$$

在实际计算中,更方便的是用:

$$G_{\text{N}} = 6.70881(67) \times 10^{-39} \hbar c (\text{GeV} \cdot \text{c}^{-2})^{-2} = 5.90613 \times 10^{-39} \hbar c / m_{\text{p}}^2$$

其中后一个数就是前面给出的无量纲组合常数。

### 1.3.3 普朗克单位

可以用  $c$ ,  $\hbar$  和  $G_{\text{N}}$  这三个常数组出量纲为时间、长度和质量的三个量:

$$t_{\text{P}} = \frac{l_{\text{P}}}{c} = \sqrt{\frac{\hbar G_{\text{N}}}{c^5}} = 5.39124(27) \times 10^{-44} \text{s}$$

$$l_{\text{P}} = \sqrt{\frac{\hbar G_{\text{N}}}{c^3}} = 1.616252(81) \times 10^{-35} \text{m}$$

$$m_{\text{P}} = \frac{\hbar}{cl_{\text{P}}} = \sqrt{\frac{\hbar c}{G_{\text{N}}}} = 2.17644(11) \times 10^{-8} \text{kg}$$

分别称之为普朗克时间、普朗克长度和普朗克质量。普朗克用它们作为时间、长度和质量的单位,建立了一个单位制,称为普朗克单位制或自然单位制。在这个单位制中,所有量的单位都可以用它们表示和计算出来,是固定和不能改变的。所以这是没有量纲的单位制。特别是,速度的单位是  $l_{\text{P}}/t_{\text{P}} = c$ ,从而作用量的单位是  $l_{\text{P}}m_{\text{P}}c = \hbar$ 。所以在普朗克单位制中  $c = \hbar = 1$ ,于是还有  $G_{\text{N}} = 1$ 。此外,再用  $k_{\text{B}}$  定义普朗克温度: