

现代物理知识

徐行可 荣 健 等编

西南交通大学出版基金资助

西南交通大学出版社

成 都

图书在版编目(CIP)数据

现代物理知识/徐行可等编. —成都: 西南交通大学出版社, 1999. 12
ISBN 7-81057-301-2

I. 现… II. 徐… III. 物理学-高等学校-教材
IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第46506号

现 代 物 理 知 识

徐行可 荣健 等编

出 版 人 宋绍南

责任编辑 毛文义

封面设计 郑宏

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段111号 邮政编码: 610031 发行科电话: 7600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

E-mail: cbs@center2.swjtu.edu.cn

成都市报华印装厂印刷

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 16.625

字数: 400千字 印数: 1~1000册

1999年12月第1版 1999年12月第1次印刷

ISBN 7-81057-301-2/O · 103

定价: 23.00元

前 言

我们处于一个科学技术高速发展,急剧变革的时代。其变化的显著特点是各门学科间的交叉渗透,科学与技术的密切结合,科学技术转化为生产力的周期缩短。这要求我们所培养的21世纪的科技人才有宽厚的基础和更强的适应性。他们需要了解现代科技的最新成果、思想方法和发展方向,以取得较高的立足点和广阔的视角,才能跟上不断进步和变化的时代。

物理学是自然科学的基础,也是推动技术进步的重要源泉。物理学的思想方法已经广泛地渗透到各种自然科学技术领域,甚至管理科学、社会科学、行为科学之中。物理学所体现的不懈追求、求实创新的科学精神是社会发展和人类进步的一种基本推动力。

作为物理教师,我们深感在工科大学中仅开设“大学物理”、“物理实验”课程不足以起到物理教育在人才素质培养中应起的作用。每当课程结束,我们总有言犹未尽的感觉;每送走一批毕业生,我们总是为未能向他们提供了解物理学最新成就的机会,以致造成他们知识能力结构的缺陷感到内疚,特别是为数学、社科、管理等专业的学生在校时所接受的物理教育几乎是“空白”而不安。为此,我们编写了这本选修课教材。

本书从当前物理学探索的三个主要方面——粒子物理、宇宙学、复杂性研究——来介绍现代物理前沿的基本知识和动态,以生物物理为例介绍学科间的交叉渗透,还从信息技术、能源技术、激光技术等角度阐述物理学与当代高新技术革命的关系。我们力求做到信息量大,资料新,着眼点高和简明通俗。我们相信,这门课程对于学过“大学物理”课的工科各专业的学生和未学过“大学物理”课的数学、经济、建筑、人文、社科各专业学生都是适宜的。

编写本教材的人员是:徐行可(专题一和专题六),王蜀娟(专题二),王莉(专题三),荣健、钟晓春(专题四和专题七),黄泉保(专题五)。本书的初稿曾在西南交通大学93~97 年级试用,各位编者和王祖源、彭海东和张晓老师参加了教学试点。

承蒙四川大学王喜忠教授、西南交通大学袁玉辉教授审阅了本书的部分专题,西南交通大学张庆福教授、黄瑞霖教授审阅了全书。

我们诚恳地期待着来自各方面的宝贵意见,并向指导、帮助我们的王喜忠、张庆福、黄瑞霖、袁玉辉、王祖源、彭海东、张晓等老师以及我们编写中所参阅文献的作者致谢。

本书得到西南交通大学出版基金资助。

编 者

1999 年 10 月

目 录

专题一 物质结构研究的新进展

§ 1. 1 粒子世界	1
一、物质世界的结构层次	1
二、标准模型——基本粒子分类	2
二、标准模型——基本相互作用	6
四、超对称统一理论 超弦	9
§ 1. 2 对称性与对称破缺	10
一、什么是对称性	10
二、对称性原理	13
二、对称性与守恒定律	15
四、对称性的自发破缺	17
§ 1. 3 粒子物理的研究手段和发展方向	20
一、碰撞和衰变	20
二、加速器和粒子探测器	22
二、粒子物理的未知课题	29
四、粒子物理与其他物理学领域及技术的相互影响	29
参考文献	31

专题二 天文学及现代宇宙观

§ 2. 1 天文学概述	32
一、天文学中的几个重要概念	32
二、宇宙概观	33
二、天文学的分支	41
§ 2. 2 宇宙和恒星的起源和演化	42
一、宇宙学的历史	42
二、现代宇宙学——大爆炸宇宙模型	44
二、恒星世界	47
四、恒星的起源和演化	49

§ 2. 3 天文观测及其历史发展 53

 一、古代的天文观测 53

 二、现代天文观测的发展 55

 二、获得天体信息的渠道 56

 四、天体基本物理量的观测确定 56

参考文献 58

专题三 自组织、混沌和分形
——复杂性研究与非线性科学简介

引 言 59

 一、大自然的复杂性 59

 一、什么是非线性科学 60

§ 3. 1 自组织现象及其研究 61

 一、近平衡线性区的工作概述 62

 二、自组织的典型现象 64

 二、自组织现象中的一些基本概念 67

 四、自组织产生的条件 69

 五、非线性分岔与耗散结构 72

 六、自组织动力学 74

§ 3. 2 混沌 77

 一、混沌现象 77

 二、相空间几何与吸引子 80

 二、混沌的数学模型 88

 四、费根包姆常数与普适性和标度性 100

 五、平衡混沌与非平衡混沌 101

§ 3. 3 大自然的几何学——分形与分维 102

 一、分形与分维的基本概念 102

 二、大自然的分形 107

 二、分形的物理模型 114

 四、分形语言 118

 五、分形的意义 122

 六、分形与混沌的关系 122

 七、混沌、分形和自组织的哲学思考 123

参考文献 124

专题四 信息世界

§ 4. 1 什么是信息 125

一、信息的概念	125
二、信息的特征与性质	130
二、信息的度量及其拓展	131
§ 4. 2 什么是信息科学和信息技术	141
一、信息科学	141
一、信息技术	143
§ 4. 3 信息技术的前沿	147
一、卫星通信	147
二、信息高速公路	152
参考文献	161

专题五 能源科学技术

§ 5. 1 能源技术概论	162
一、能源的重要性	162
二、能源的分类	164
二、能源的转化和评价	164
四、能源形势	166
§ 5. 2 能源的开发和利用	168
一、常规能源	168
二、新能源的开发和利用	173
二、新的能量转换技术	188
§ 5. 3 能源与环境 能源与交通	195
一、能源利用与环境的关系	195
二、能源与交通的关系	198
参考文献	199

专题六 生物物理简介

§ 6. 1 物理学与生物学的关系	200
§ 6. 2 生物物理学的主要内容和目标	202
一、生命大厦的基本砖石——生物大分子	202
二、生命信息——遗传和变异	208
二、液晶和生物膜	212
四、感觉和神经的物理学	217
五、生命的热力学基础	220
§ 6. 3 生物工程介绍	221
一、生物工程体系	221
二、生物工程的发展前景	223
二、生物工程面临的社会问题	226

参考文献	227
------------	-----

专题七 激光技术

§ 7. 1 激光的由来与发展	228
一、激光理论的奠基人	228
二、世界上第一台激光器	229
二、中国激光之父——王之江	229
四、中国人的贡献	230
§ 7. 2 激光器的分类及特点	231
一、激光器的分类	231
二、各种激光器的特点	231
§ 7. 3 激光器的基本原理	234
一、激光的产生	234
二、激光器	234
§ 7. 4 激光的关键技术	237
一、调Q技术	237
二、锁模技术	238
二、激光放大技术	239
四、模式选择技术	240
五、稳频技术	242
§ 7. 5 激光的最新应用	242
一、激光与信息处理	242
二、激光与通信	250
二、激光与航空——激光陀螺	255
参考文献	257

专题一 物质结构研究的新进展

§ 1.1 粒子世界

一 物质世界的结构层次

世界是由物质组成的。自然界各种物质既有结构层次的不同,又有运动形式的千变万化。图1.1-1 显示出目前人类所认识的物质客体的空间尺寸,其大小至少跨越了42 个数量级。

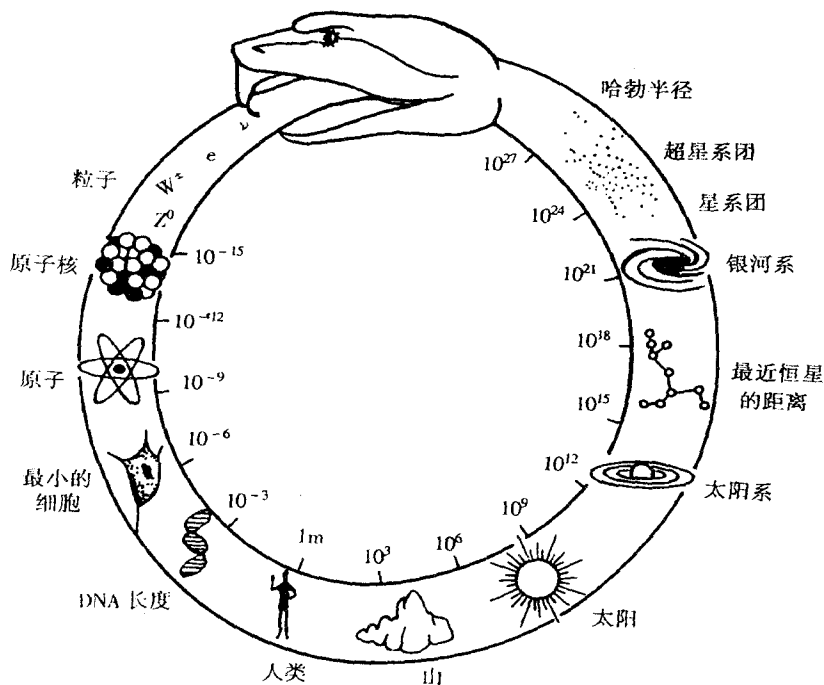


图 1.1-1

人类是认识自然的主体。因此选择了与自身大小相适应的“米(m)”作为长度的基本单位。物理学研究的最小对象是粒子,其尺度在 10^{-15} m 以下。物理学研究的最大对象是整个宇宙,目前最远的观察极限是哈勃半径,尺度达 $10^{26} \sim 10^{27}$ m 的数量级。当代宇宙学的前沿课题是宇宙的起源和演化。20 世纪后半叶建立起来的大爆炸宇宙模型认为宇宙是在一百多亿年前的一次大爆炸中诞生的,粒子在宇宙诞生的瞬间产生出来。于是,早期的宇宙成了粒子物理学研究的对象。物理学中研究最大对象和最小对象的两个分支——宇宙学和粒子物理学竟奇妙地衔接在一起,犹如图1.1-1 中一条怪蟒咬住了自己的尾巴。

在物理学中,大致把尺度在 10^{-7} m 以上的客体称为宏观系统。其下限相当于有机化合物中大分子的尺寸,在普通显微镜下可以观察到。尺度在 10^{-7} m 以下的客体属于微观系统。微观系统和宏观系统最重要的区别在于它们遵从不同的物理规律。一般说来,宏观系统服从因果律,其运动规律可以用牛顿力学(或在更普遍的范围内用相对论力学)来描述;而微观系统服从统计规律,其运动规律要用量子力学来描述。近些年来,随着微结构技术的发展,可以制造出亚微米尺寸的器件。这些线状或环状的样品通常包含 $10^8\sim 10^{11}$ 个原子,基本上属于宏观系统,但是它们在一定条件下表现出量子效应,即物质的微观特性起主导作用。于是又有人把这种呈现出微观特征的宏观系统称为介观系统。还有人把星系、宇宙尺寸的客体称为宇观系统。

二、标准模型——基本粒子分类

自古以来,人们就有一个信念:万物都有共同的本原。古希腊朴素唯物主义把物质归结为水(泰勒斯),归结为火(赫拉克利特),归结为水、火、土、气(亚里士多德),归结为真空和原子(德莫克利特)。在古代中国则有元气说、阴阳说和五行说(金、木、水、火、土)。近代机械唯物主义把物质归结为各种化学元素的原子。而19 世纪末 X 射线、放射性和电子的发现揭示出原子也是有内部结构的。这样,人们为寻找物质的基本构成单位而一步步深入到物质的更深层次。表1. 1-1 记录了人们在进入原子世界以后的探索历程。

表1. 1-1 粒子发现简史

时 间	发 现 的 粒 子	粒子种类
1897 年—1932 年	e^- , ν, p, n	4
1932 年—1947 年	$e^+ , \bar{p}, \bar{n}; \nu, \bar{\nu}; \mu^\pm, \pi^\pm, \pi^0$	14
1947 年—1962 年	奇异粒子(K 介子, $\Lambda, \Sigma, \Theta, \Omega$ 超子), 区分 $\nu_e, \bar{\nu}_e$ 和 $\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$	35
60 年代—70 年代	强子共振态	200 多种
70 年代—90 年代	新粒子, τ 子, 夸克	450 多种

19 世纪 30 年代,人们认为物质微粒结构的最小单元是质子、中子、电子和光子,并称它们为“基本粒子”。后来,又把凡是和这些粒子可以相互作用和相互转化,并在当时的认识水平上认为是同一层次的粒子统称为“基本粒子”。20 世纪 60 年代以后,通过高能加速器发现了大批新粒子,到目前为止已达数百种。人们在对这些“基本粒子”的深入研究中发现某些“基本粒子”并不“基本”,它们有内部结构,而且从内部结构的情况来看,已发现的基本粒子并不都属于同一层次。因此,物理学界已将这些“基本粒子”改称粒子,将“基本粒子物理学”改称粒子物理学。而我们当今所提的基本粒子则指的是人们迄今尚未发现有内部结构的粒子。当然,它们也不一定是构成万物的终极基元,随着人们对物质结构的认识不断深入,“基本粒子”所指的具体对象也将向更深入的层次转移。

目前,粒子物理领域得到公认的最成熟的理论是标准模型理论。标准模型理论是美国物理学家盖尔曼(M. Gell-Mann)在1964 年提出的,盖尔曼因此获得1969 年诺贝尔物理奖。几十年来,用加速器和对撞机进行了大量实验,从多方面对标准模型理论加以检验。1990 年 8 月在新加坡召开的第 25 届高能物理国际会议上总结了检验结果:“标准模型理论成功地经受住了所有实验的检验。超出标准模型理论的实验结果一个也没有得到。”

在标准模型中,基本粒子分为以下几类:

1. 规范粒子

规范粒子是传递其他粒子间相互作用的媒介粒子,共13种。其基本特性如表1.1-2所示。

表1.1-2 规范粒子

名称	符号	静质量(GeV)	电荷(e)	自旋(h)	寿命(s)	种类	传递的相互作用
胶子	(g)	0	0	1	∞	8	强
光子	γ	0	0	1	∞	1	电磁
中间玻色子	$W^\pm$ Z^0	约80 约90	± 1 0	1 1	约 10^{-25}	3	弱
引力子	?	0	0	2	?	1	引力

表1.1-2中传递电磁相互作用的光子是20世纪20年代发现的,传递弱相互作用的 $W^\pm$ 、 Z^0 粒子是20世纪80年代发现的。传递强相互作用的胶子的存在已有充分的实验证据,但尚未观察到自由状态的胶子。由于引力相互作用太弱,对引力子的探测十分困难,目前还没有这方面的实验证据。

2. 轻子

基本粒子的轻子家族是由下面两个性质定义的:

(1) 轻子受引力、电磁力和弱力的影响,但不受强力的影响。

(2) 轻子必定以粒子—反粒子对的形式产生或湮灭。总的轻子数(轻子数减去反轻子数)在我们已知的一切过程中保持不变。

表1.1-3给出了已知的三代六种轻子,加上它们的反粒子,轻子共12种。

表1.1-3 轻子

代	名称	符号	静质量(MeV)	电荷(e)	自旋(h)	寿命(s)
1	电子	e	0.51	-1	1/2	∞
	电子中微子	ν_e	$<5 \times 10^{-9}$	0	1/2	∞
2	μ 子	μ	106	-1	1/2	约 10^{-6}
	μ 子中微子	ν_μ	<0.5	0	1/2	∞
3	τ 子	τ	1776.9	-1	1/2	约 10^{-13}
	τ 子中微子	ν_τ	<160	0	1/2	∞

1897年,汤姆孙(J. J. Thomson)在研究阴极射线时发现了电子。它是人类认识的第一个“基本粒子”。1928年,狄拉克(P. A. M. Dirac)建立电子的相对论性量子力学方程,得出负能解,并由此预言正电子的存在。1932年安德森(C. D. Anderson)在宇宙线中发现了正电子。1936年,安德森又在宇宙线实验中发现了质量约为电子质量206.77倍的 μ 子。而 τ 子的发现则推迟到1975年,美国的马丁·佩尔(M. Perl)因此获得1995年诺贝尔物理学奖。对 τ 子的研究是目前粒子物理的前沿课题之一,表1.1-3中所列 τ 子质量1776.9 MeV是我国北京正负电子对撞机的测量结果,这一结果被李政道博士评价为1990—1992年国际高能物理的最大进

展。三代轻子除质量逐代增大以外,其他性质很相似。“代”是如何产生的?还有没有第四代轻子?这些都是粒子物理的未知课题。

这里要特别提到中微子之谜。中微子是1930年泡利(W. Pauli)为解释 β 衰变中能量守恒貌似被破坏现象提出的假设。1933年,费米(E. Fermi)由此提出了弱相互作用理论。由于中微子与物质相互作用极弱,观测它十分困难。1942年,我国物理学家王淦昌提出了用 ^7Be 的K电子俘获来检验中微子的实验方案,从1942年到1952年,美国物理学家艾伦(J. S. Allen)等采用王淦昌的方案多次实验,证实了中微子的存在。1956年,美国物理学家雷尼斯(F. Reines)终于完成了直接探测中微子的实验,并因此与佩尔分享了1995年诺贝尔物理奖。1962年,莱德曼(L. Lederman)、施瓦茨(M. Schwartz)和斯坦博格(J. Steinberger)又用实验证实 ν_μ 和 ν_e 是两种不同的中微子,并因此荣获1988年诺贝尔物理奖。1990年,在瑞士欧洲核子研究中心大型正负电子对撞机上测定 Z^0 衰变宽度获得43万个事例,推算出中微子种数的上限为3,即只有 ν_e 、 ν_μ 和 ν_τ 三种中微子和它们的反粒子。中微子的存在虽然已经得到证实,但至今人们对中微子的认识仍十分肤浅。围绕着中微子存在许多难解之谜。例如:太阳上质子聚变和其他轻核反应要产生大量中微子,而地球上探测到的太阳中微子数比理论值少得多,并呈周期性变化,其原因是什么?是否存在中微子振荡?又如,天体物理发现,目前所观测到的发光星体质量只占所观测空间物质总质量的一小部分,大部分质量以“暗物质”形式存在着。中微子是暗物质的最自然的候选者。1980年以来,全世界许多实验室致力于中微子质量探测。较近的实验结果是: $m_\nu < 9.4\text{ eV}$ (美国洛斯阿拉莫斯实验室,95%置信度), $m_\nu < 0.25\text{ MeV}$ (1984年,瑞士核研究所,90%置信度), $m_\nu < 84\text{ MeV}$ (1986年,美国斯坦福直线加速中心,95%置信度)。这些实验只得出了中微子质量的上限,并不排除中微子质量为零的结论。中微子质量究竟是否为零?中微子有无磁矩?是否存在无中微子的双 β 衰变?有没有中微子星?这些都还是未解之谜。因为宇宙起源大爆炸遗留下来的中微子至今充满宇宙的每一个角落,平均密度约 300 cm^{-3} ,与光子密度差不多,比其他所有粒子都多数十亿倍,所以中微子对宇宙是举足轻重的。而且,从星球内部发出的光很难穿出庞大的星球,人们观察到的星光、太阳光只是星球、太阳表面发出的光,只有中微子才能畅行无阻地将星球、太阳内部的信息带给我们。因此,解开围绕中微子的各个谜,既是深入认识微观世界的需要,也是认识宇观世界的需要。从应用角度看,中微子通讯、中微子地球断层扫描有可能在21世纪得以实现。

3. 夸克

基本粒子的夸克家族有三代六种“味”,而每种夸克又分“红”、“蓝”、“绿”三种“色”。这样,三代夸克连同它们的反粒子共有36种,如表1.1-4所示。

表1.1-4 夸克

代	名称	符号	静质量(MeV)	电荷(e)	自旋(h)
1	上夸克	u	~300	2/3	1/2
	下夸克	d	~300	-1/3	1/2
2	粲夸克	c	~1 500	2/3	1/2
	奇异夸克	s	~500	-1/3	1/2
3	顶夸克	t	~180 000	2/3	1/2
	底夸克	b	~5 000	-1/3	1/2

1964 年盖尔曼提出标准模型时,用u、d、s 夸克组成强子。强子包括重子(质子、中子、各种超子)和介子。重子由三个夸克组成,介子由一个夸克和一个反夸克组成,如表 1. 1-5 所示。1974 年,美籍华裔物理学家丁肇中和美国物理学家里希特(B. Richter)相互独立地通过发现 J/ Ψ 粒子证实了第四味夸克 c 的存在,他们共同获得 1976 年诺贝尔物理奖。1977 年莱德曼通过发现 Υ 粒子证实了第五味夸克 b 的存在。理论上预言存在的顶夸克也终于在 1995 年由美国费米实验室证实了。

表 1. 1-5 强子的夸克模型

名 称	符 号	静质量(GeV)	组 成
质 子	p	0. 938	2u+d
反质子	$\bar{p}$	0. 938	2 $\bar{u}$ + $\bar{d}$
中 子	n	0. 940	u+2d
正 π 介子	π^+	0. 140	u+d
正K 介子	K^+	0. 494	u+s
J/ Ψ 粒子	J/ Ψ	3. 097	c+c
Υ 粒子	Υ	9. 460	b+b

夸克具有分数电荷。1910 年密立根(R. A. Millikan)著名的油滴实验中曾记载了一个分数电荷(2/3)e 的事例。1977 年,美国斯坦福大学的一个小组用超导铌球重做密立根“油滴”实验,发现有一个铌球的电荷为(0. 337 $\pm$ 0. 09)e,这正是e/3,但目前尚无别的实验室重复得出他们的实验结果。

迄今为止,几乎所有试图产生或发现自由夸克的实验均遭到失败,所以目前认为夸克间的强相互作用具有“渐近自由”和“红外奴役”的特性。即夸克之间的关系类似于用链条连在一起的囚犯:当他们靠得较近,链条松弛时,各自的行为可以是独立自由的,但活动范围增大到一定限度时,链条会拉紧。标准模型理论用“色荷”来解释夸克间强作用的性质:在间距变短时,由于真空的屏蔽效应使“色荷”减弱。目前的实验条件还无力破坏夸克之间的“链条”,夸克始终是被奴役、被禁闭的,所以见不到自由夸克。

按照标准模型,物质的结构层次如图1. 1-2。图1. 1-3 表示出从电子、夸克到分子的结构模型和尺度的数量级。

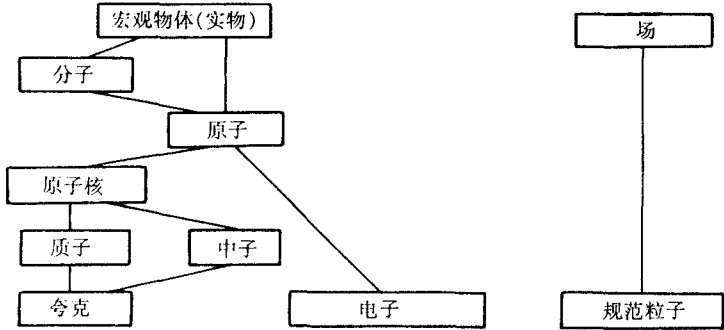


图 1. 1-2

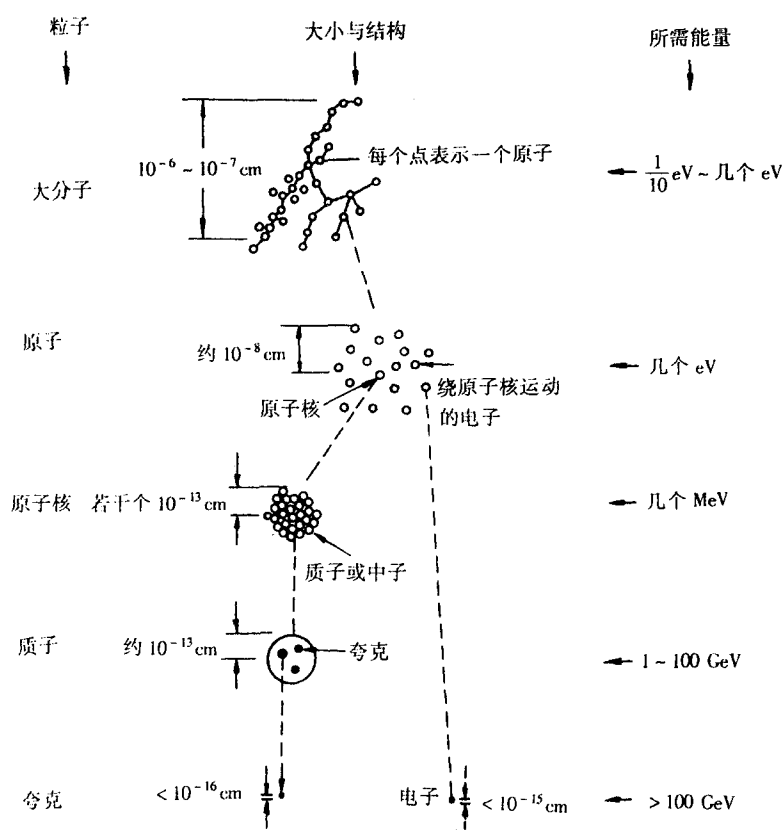


图 1.1-3

4. 希格斯粒子

人们把自旋量子数为 $1/2$ 的粒子称为费米子,把自旋为整数 $1,2$ 的粒子称为玻色子。它们各自遵从不同的统计规律:费米子遵从费米—狄拉克统计规律,服从泡利不相容原理;玻色子遵从玻色—爱因斯坦统计规律,不服从泡利不相容原理。标准模型理论还要求自然界存在一种自旋量子数为零的特殊粒子,称为希格斯粒子。从实验上寻求希格斯粒子是当前粒子物理实验的中心课题之一。

总起来说,按照标准模型理论,基本粒子世界由 62 种粒子构成:13 种规范玻色子,48 种费米子(包括 12 种轻子和 36 种夸克)和 1 种希格斯粒子。其中引力子和希格斯粒子的存在尚未由实验证实。

三、标准模型——基本相互作用

1. 四种基本相互作用

基本粒子是依靠它们间的相互作用结合在一起,组成各种形态的物质的。按照标准模型理论,粒子间的相互作用有四种基本形式:强作用、电磁作用、弱作用和引力作用。粒子间的相互作用是通过交换媒介粒子来实现的。四种基本相互作用的情况如表1.1-6 所示。

表1. 1-6 四种基本相互作用

种 类	作用对象	媒介粒子	力程(m)	相对强度	主要理论
强相互作用	夸克	胶子	$<10^{-15}$	1	量子色动力学
电磁相互作用	带电粒子	光子	∞	10^{-2}	量子电动力学
弱相互作用	大多数粒子	中间玻色子	$<10^{-17}$	10^{-13}	量子味动力学
引力相互作用	全部粒子	引力子(?)	∞	10^{-38}	广义相对论, 量子引力理论

强作用由于其强度大和力程短而成为粒子间最重要的相互作用。它在粒子间距离为 $10^{-15} \sim 0.4 \times 10^{-15}$ m时表现为引力, 距离再减少就表现为斥力。正是强力将夸克束缚在一起组成质子和中子, 并将质子和中子束缚在一起组成原子核。研究强作用的理论是量子色动力学(QCD)。

电磁作用只存在于带电粒子之间, 它是一种长程力, 在宏观和微观范围都起作用。电子和原子核就是通过电磁作用结合为原子的。日常生活和工程技术中常见的相互接触物体间的弹力和摩擦力, 以及流体的压力和浮力等就其本质而言都可归结为分子间的电磁相互作用。迄今为止, 电磁相互作用是四种基本相互作用中被认识得最清楚的一种。其主要理论有经典电动力学和量子电动力学(QED)。

弱作用力程比强作用更短, 力也更弱。它制约着放射性现象, 只在 β 衰变等过程中才显示其重要作用。研究弱作用的理论是量子味动力学(QFD)。

引力作用是一种长程力, 在所有物质间均存在。因为引力作用在四种基本相互作用中是最弱的, 粒子质量又很小, 所以在粒子世界中引力作用可以忽略不计。在宏观领域, 尤其是在天体问题中, 由于涉及的质量很大, 则引力起着主要作用。引力作用是人类认识得最早, 但至今认识得最不充分的一种相互作用。关于引力作用的主要理论有万有引力定律、广义相对论、量子引力理论等。

2. 粒子与场的相互关系

现代物理认为, 物质间的四种相互作用都是由场来传递的, 是依靠交换规范玻色子来实现的。量子场论认为:

(1) 每种粒子都有相对应的场, 场没有不可入性, 对应各种粒子的场互相重叠地充满全空间。

(2) 某种场能量最低的状态称为该种场的基态。基态场不能通过状态变化释放能量、输出信号, 从而不显示直接的物理效应。这表现为察觉不到存在粒子。

(3) 场处于激发态时表现为出现相应的粒子, 场的不同激发态表现为粒子的数目和运动状态不同。

(4) 当所有的场都处于基态时, 任何一个场都不可能释放能量而给出信号, 都不显现出粒子, 这就是物理上的真空。所以真空并不是真的空无一物, 而是充满了各种基态场。

(5) 无论是处于基态的场还是处于激发态的场都与其他场相互作用, 这就是粒子间相互作用的来源。

图1. 1-4、1. 1-5 表示了真空、粒子、中子衰变过程的场论图象。

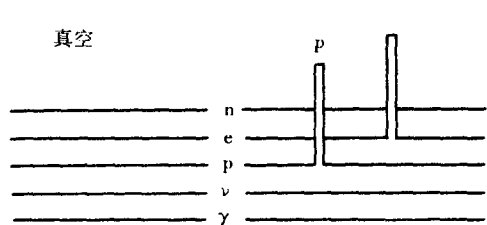


图1.1-4 根据场论给出的真空和粒子基本物理图象

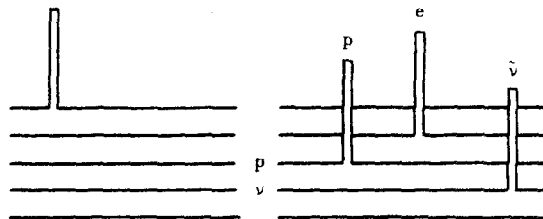


图1.1-5 中子衰变过程的场论图象

3. 相互作用的统一理论

牛顿(I. Newton)说:“自然喜欢简洁。”爱因斯坦(A. Einstein)说:“物理上真实的东西一定是逻辑上简洁的东西。”物理学家们都相信:自然界是复杂的,但这种复杂性是由简单性演化而来的。许多伟大的物理学家都以简洁、和谐、对称、统一作为他们对物理理论探索的指导原则。从牛顿时代以来,物理学发展中一条鲜明的主线,就是执着地追求自然规律的统一性,认为表面上不同的各种力可能只是同一种普遍力的不同表现形式,期望把它们统一于一种一般的理论之中。在古希腊,亚里士多德(Aristotle)认为“天上”的运动和地面的运动完全不同,牛顿打破了延续千年之久的传统观念,把这两种运动纳入统一的经典力学框架,成功地完成了物理学史上的第一次统一。电、磁和光曾经被认为是毫无关联的现象,麦克斯韦(J. C. Maxwell)的电磁场理论把它们统一到一起。爱因斯坦的相对论实现了高速运动与低速运动的统一,并将力学现象与电磁学现象纳入统一的时空框架。爱因斯坦后半生致力于统一引力和电磁力,但未取得成功。爱因斯坦失败的原因在于物理学发展的条件尚不成熟,当时人们只认识到电磁作用和引力作用的宏观规律,而尚未认识在微观领域内发挥作用的短程力:强作用和弱作用。粒子物理学的发展表明,首先成功地统一起来的是弱作用和电磁作用。1961年,美国物理学家格拉肖(S. L. Glashow)首先提出弱电统一模型。1967年和1968年,美国物理学家温伯格(S. Weinberg)和巴基斯坦物理学家萨拉姆(A. Salam)在此基础上各自独立地将这个模型发展完善。他们三人共同获得了1979年诺贝尔物理奖。弱电统一理论认为,弱相互作用和电磁相互作用本来属于具有同一种对称性的相互作用,在能量较低的范围内,这种对称性自发地破缺了统一的弱电相互作用分解为现在所观察到的电磁相互作用和弱相互作用。

弱电统一理论的成功促进了大统一理论的探索研究。大统一理论是指把强相互作用和弱电相互作用统一起来的理论。20世纪70年代以来,国际上提出了许多种大统一理论,各有不同特点,但迄今为止,尚无任何一个大统一理论得到实验判定性检验。弱电统一理论本身还暗示了夸克与轻子之间的联系,这两类粒子都分三代,在目前分辨力范围内都是无内部结构的“点”粒子。大统一理论的基本策略是完全对称地处理夸克和轻子,将夸克家族和轻子家族相匹配,形成新的扩充了的家族,并认为同组中的粒子可以互相变换。质子不稳定是大统一理论的重要预言。但1986年在美国俄亥俄州盐矿的地下600 m深处,用8 000 t纯净水和2 000多只光电倍增管进行实验,得出质子寿命大于 10^{32} 年,与大统一理论的预言不符。这说明大统一理论尚有许多问题有待解决。

图1.1-6 表示了相互作用统一理论的发展进程。

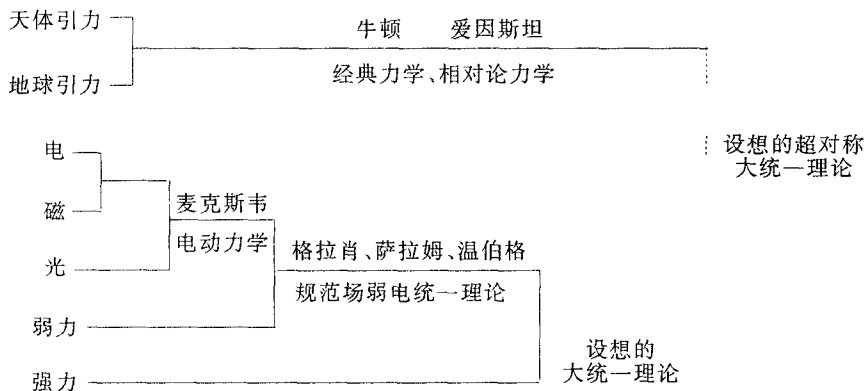


图 1.1-6 物理理论的发展趋向统一

四、超对称统一理论 超弦

近十多年来，粒子物理理论的一个重要探索方向是关于超对称统一理论的研究。其目标一是把大统一理论扩大到包括万有引力在内，从而把四种基本相互作用统一到一起；二是探索夸克和轻子的内部结构，提出“亚夸克”模型，从而把自旋为半整数的费米子和自旋为整数的玻色子统一到一起。这方面的理论研究十分活跃，但在实验中还未能有所进展。

在超对称统一理论的发展过程中，最雄心勃勃和最具有革命性的思想是由约翰·希瓦茨(J. Schwarz)和麦克·格林(M. Green)等提出的超弦理论。这种理论认为宇宙万物都是由弦构成的。也就是说，组成宇宙的所有基本粒子都是一些非常短的超对称的弦，而不是长期以来人们所认为的“点”粒子。超弦的特征尺度是普朗克长度的尺度 10^{-33} cm。一个基本粒子表现为一小段振动弦，如果该小段弦比我们探测仪器的分辨率短得多，它就显得像一个“点”粒子。弦振动的方式不同，看起来就好像是不同的粒子。超弦可分为开弦和闭弦，开弦有两个端点，而闭弦自身首尾相接为环状。图1.1-7 表示出开弦、闭弦以及它们的世界片。在超弦理论中，弦本身虽然是一个延展客体，但弦的相互作用却是局部的，图1.1-8 表示出弦的合并和相互作用。

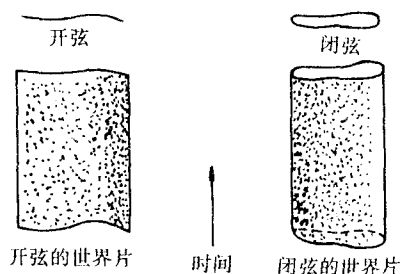


图 1.1-7

超弦模型要求 10 维时空。通过空间紧化的观点，高维空间可以和日常经验一致起来。一般认为，多于三维空间和一维时间的其他维数被弯卷到非常小的尺度，人们根本无法觉察它们。就像一根非常细的毛细管，它是二维的圆柱面，但对于停在其上的一只蚂蚁，它只是一条一维的直线，蚂蚁太大了，进入不了毛细管，它感觉不到第二维的存在。也就是说，在非常小的尺度下，空间—时间是 10 维的，并且是高度弯曲的，但在更大的尺度下，就看不见曲率或额外的维数，多余的六维空间紧化后就得到四维闵可夫斯基(Minkowski)时空。

超弦理论已经具备作为一个基本理论应有的一切要素，而且超弦理论的浪潮已涌向物理学的其他领域。人们期望通过超弦理论来实现爱因斯坦及其后继者们超统一的梦想，但超弦理

论的价值还需要实验来证实。

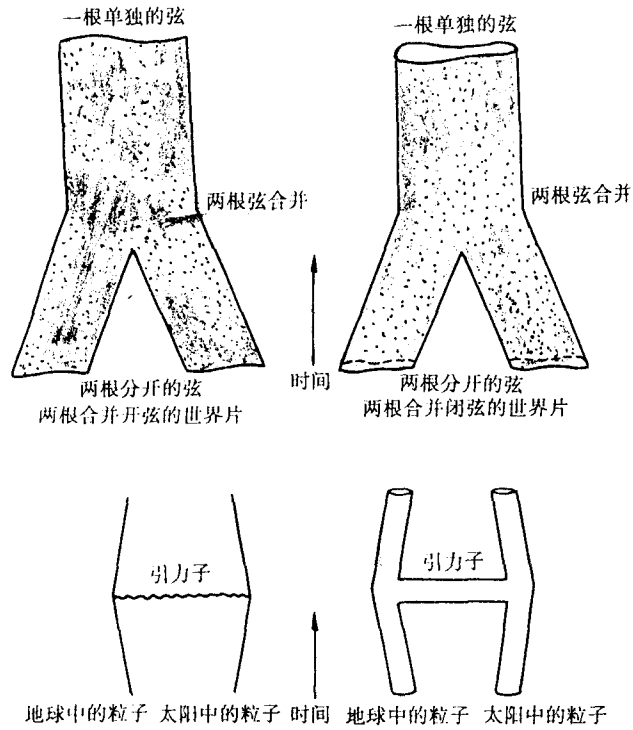


图 1.1-8

§ 1.2 对称性与对称破缺

粒子物理理论研究中重要的指导原则是对称性原理,描述对称性的数学语言是群论。

物理学是研究物质世界最基本、最普遍规律的科学。爱因斯坦曾说:“我想知道上帝是如何创造这个世界的。这个或那个现象,这个或那个元素的谱我不感兴趣。我想知道的是他的思想,其他的都是细节问题。”物理学家们不满足于建立胡克(R. Hooke)定律、欧姆(G. S. Ohm)定律、气体实验定律这类唯象定律,也不停留于建立像牛顿定律、麦克斯韦方程这样的在一定范围内具有指导意义的综合性定律,他们梦寐以求的目标是对自然界更高层次的描述。物理学家们相信自然的基本设计是美的、简单的,并且将美、简单和统一跟对称性联系在一起。

一 什么是对称性

物理学中的对称性指的是:如果一个操作能使某体系从一个状态变换到另一个与之等价的状态,即体系的状态在此操作下保持不变,则该体系对这一操作对称,这一操作叫做该体系的一个对称操作。