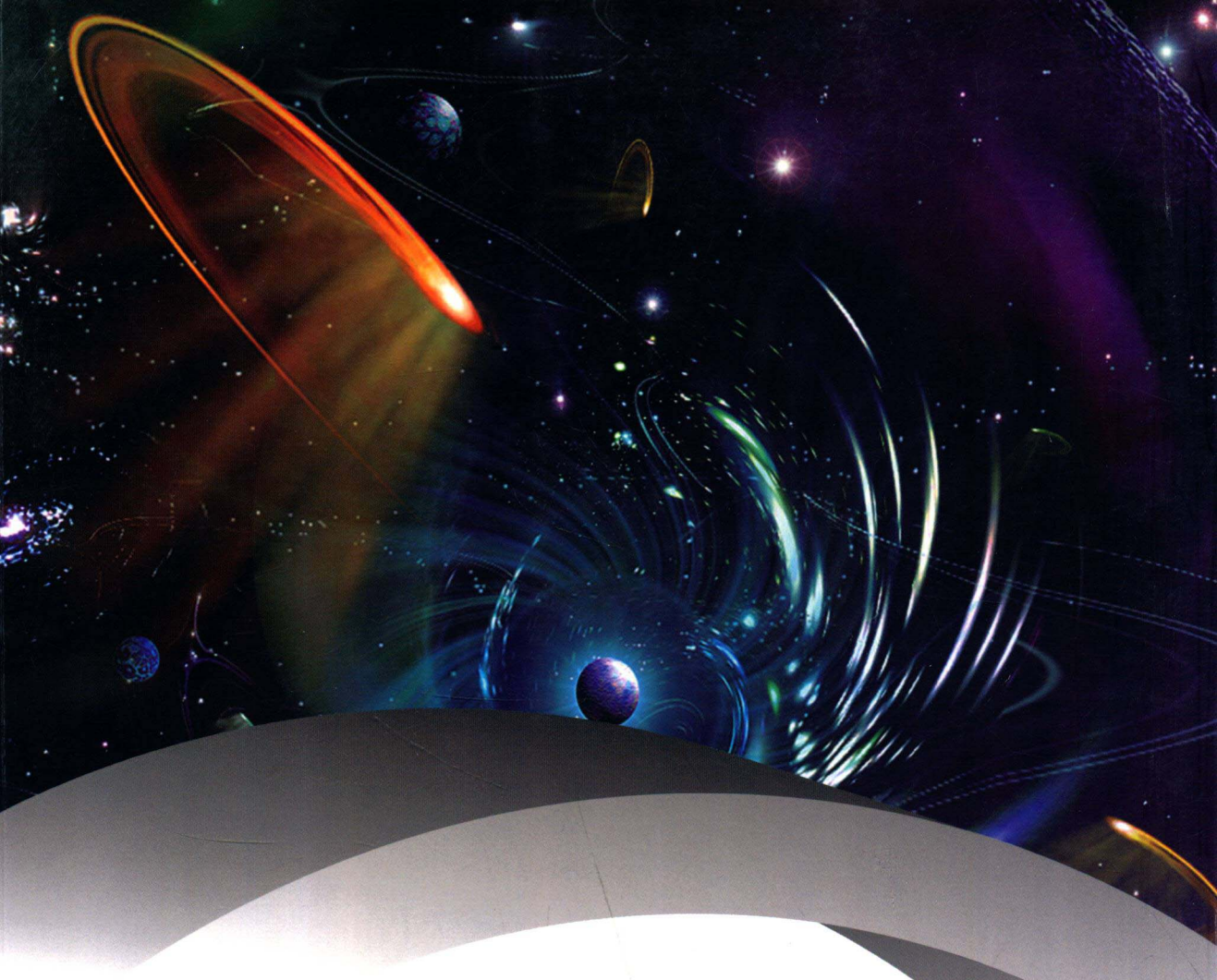




21世纪 物理学

ERSHIYISHIJI WULIXUE

张端明 何敏华 著

 长江出版传媒

 湖北教育出版社

21世纪 物理学

ERSHIYISHIJI WULIXUE

张端明 何敏华 著

(鄂)新登字 02 号

图书在版编目(CIP)数据

21 世纪物理学/张端明,何敏华著.

—武汉:湖北教育出版社,2012.6

ISBN 978 - 7 - 5351 - 5055 - 4

I. 2...

II. ①张...②何...

III. 物理学

IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 048654 号

出版发行 湖北教育出版社

邮政编码 430015 电 话 027 - 83619605

地 址 武汉市青年路 277 号

网 址 <http://www.hbedup.com>

经 销 新 华 书 店

印 刷 武汉中远印务有限公司

地 址 武汉市硚口区长丰大道特 6 号

开 本 787mm × 1092mm 1/16

印 张 21

字 数 445 千字

版 次 2012 年 6 月第 1 版

印 次 2012 年 6 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978 - 7 - 5351 - 5055 - 4

定 价 45.00 元

如印刷、装订影响阅读,承印厂为你调换

前言

21 世纪物理学

《21 世纪物理学》在湖北教育出版社的大力支持下,现在问世了。物理学在 20 世纪经历了革命性的飞跃发展,在 21 世纪又持续保持了其迅猛发展的态势,可谓波澜壮阔,风光无限。要用 40 万字的短短篇幅,全面系统地描绘物理学的壮丽画面,显然是不可能的。因此本书撰写的首要问题就是选材,本书选材的宗旨是瞄准前沿,抓住重点,立足基础。全书分为上、下两编。上编是《20 世纪物理学俯瞰》,简明扼要地阐述了当代物理学的各个分支:粒子物理、核物理和原子物理、分子物理、等离子物理学、凝聚态物理和光物理学发展的基本内容和态势。在上编内容的基础上,本书将主要篇幅放在下编,叙述 21 世纪物理学前沿。包括物质探源的新进展、凝聚态物理与材料科学、复杂系统与复杂网络、光学与激光技术及 21 世纪物理发展态势。内容重点的选择,全凭作者的学术判断,主要参考美国科学院在 20 世纪 90 年代出版的一套高水准的《迈向 90 年代的物理学》和中国物理学会编撰的《物理学学科发展报告》。判断重点的原则是对学科本身发展的重要性程度,或者应用前景的广阔性。

本书的定位是向所有具有中学及以上文化水准的干部、学生、工农兵介绍物理学科的精华,尤其是物理学在 21 世纪发展的基本态势和最新成果。由于物理学涉及面极其广泛,往往熟悉学科的某一分支的人,对于其他领域也不甚了然,因此即使对于物理学比较熟悉的研究生、博士,甚至包括有关教师和科学工作者,本书也应该是十分有价值的参考书。本书的撰写体例大致与美国的《今日物理》、《科学》和我国的《科学》、《物理》相仿。简言之,本书在学术上要求很高,力求准确、简明,反映各个学科的发展态势,包括最新的研究成果。本书的撰写从酝酿到最后成稿前后有 10 余年,其中部分章节内容曾经在华中师范大学、华中科技大学作为大学物理的附录或补充读物,反响不错。

本书的重要任务是向全民(具有中学及以上文化水准)普及物理学前沿进展,弘扬科学精神,因此,要求内容抓住要害,抓住基本的科学图像,抓住应用的广阔前景,尽可能地要言不繁,明白易懂。全书的材料工作十分浩繁,包括图片的收集,主要由何敏华博士完成,最后共同定稿。

简言之,110 年来的物理学的基本框架量子论和相对论并未改变,21 世纪的物理学以越来越丰富的新现象、越来越坚实的实验基础在不断地充实量子论和相对论(尤其是广义相对论)的内容和科学基础。物理学作为一门大学科发展的迅猛态势一直在持续着,其表现为越来越多的学科分支从物理学的主流派生出来,越来越广阔的应用领域成为物理学应用的用武之地;同时物理学与其他基础学科的综合交叉的趋势自 20 世纪下半叶以来愈加明显。我们必须强调,现代物理学不断遇到新问题,不断发现新现象是原来物理学无法解释的。这就是所谓标准模型以外的新物理。现代物理遇到的最大问题就是广义相对论与量子论不相容,一个公认的弯曲时空的量子场论至今没有建立起来;所有包含弯曲时空的量子场论的新理论探索,例如超弦论、圈量子引力理论等等,都缺乏实验根据。本书紧紧围绕现在物理学这个基本格局进行了内容充实、富于说服力的阐述。

本书的出版应该十分感谢湖北教育出版社鞠继元主任和彭永东主任。他们对于科学教育事业的热心,对于出版传媒工作的忠诚,踏实严谨的编辑态度,谦和大度的处事方式给作者留下深刻印象。没有他们的鼓励、督促和支持,本书的顺利完成是不可能的。

CONTENTS

目录 | 21世纪物理学

前言

上篇 20 世纪物理学俯瞰

第一章 物质探源——粒子物理、核物理和原子、分子物理基础研究 002

- 1.1 基本粒子家族 003
- 1.2 标准模型和各种统一理论方案 006
- 1.3 原子核物理现状 011
- 1.4 原子和分子物理前沿扫描 019
- 1.5 富勒烯物理及研究进展 025

第二章 物质探源——粒子物理、核物理和原子、分子物理研究的实验工具 027

- 2.1 高能加速器发展简况 027
- 2.2 微观世界的探测仪器 031
- 2.3 同步辐射和自由激光 033
- 2.4 扫描隧道显微镜 036

第三章 等离子体物理学 040

- 3.1 聚变等离子体物理及其发展展望 040
- 3.2 空间和天体等离子体物理的发展 046
- 3.3 低温等离子体物理和技术 048
- 3.4 等离子体物理与高科技 050

第四章 凝聚态物理 052

- 4.1 凝聚态理论的重大发展 053
- 4.2 准晶态物理进展 056
- 4.3 超晶格与能带工程 061
- 4.4 超导体——21 世纪材料王国的骄子 064

第五章 凝聚态物理续论 069

- 5.1 磁学和磁性材料 069

- 5.2 液态物理 073
- 5.3 纳米物理 080
- 5.4 介观物理 084
- 5.5 单原子开关及其他 089

第六章 光物理学 094

- 6.1 光子学 095
- 6.2 光纤通信与导波光学 098
- 6.3 光计算机与非线性光学 102
- 6.4 量子光学——现代光学的基石 105
- 6.5 原子的光学粘胶冷却术 108

下篇 21 世纪物理学前沿

第七章 物质探源的新进展 114

- 7.1 大型强子对撞机 114
- 7.2 “上帝粒子”的寻找 118
- 7.3 探测暗物质与暗能量 122
- 7.4 探索反物质 127
- 7.5 广义相对论与大爆炸模型 134
- 7.6 大爆炸标准模型——暴胀宇宙论 139
- 7.7 原子核物理最新发展 145
- 7.8 可控热核聚变的研究进展 151

第八章 凝聚态物理与材料科学 157

- 8.1 半导体材料和半导体物理 157
- 8.2 巨磁阻材料和磁隧道结材料 160
- 8.3 拓扑绝缘体和超导体材料 167
- 8.4 纳米科技和纳米材料 172
- 8.5 信息材料 175
- 8.6 软凝聚态物质材料 178
- 8.7 复杂材料体系 182

第九章 复杂系统与复杂网络 187

- 9.1 复杂系统 187
- 9.2 复杂网络理论 191

第十章 光学与激光技术 197

- 10.1 21 世纪光学 197
- 10.2 激光技术应用的若干新进展 204
- 10.3 傅里叶变换光学和 PLD 动力学 210
- 10.4 BEC 的发现和原理 218
- 10.5 BEC 物理研究进展 223

第十一章 21 世纪物理发展态势(一) 229

- 11.1 爱因斯坦与现代物理的基石 230
- 11.2 爱因斯坦与现代量子论 236
- 11.3 相对论的实验检验 240
- 11.4 微扰超弦论(第一次超弦革命) 246
- 11.5 超弦第二次革命与 M 理论 249
- 11.6 圈量子引力 253
- 11.7 量子信息学简介 255
- 11.8 量子纠缠和 EPR 论证 261
- 11.9 量子隐形传态(或量子超空间传输) 264

第十二章 21 世纪物理发展态势(二) 272

- 12.1 物理学与三次产业革命 272
- 12.2 物理学与信息产业集群的兴起 276
- 12.3 物理学与其他自然科学分支的交叉和融合 283

第十三章 从诺贝尔物理学奖看现代物理发展趋势 288

- 13.1 诺贝尔物理学奖获奖者的国籍、学科和年龄分布 288
- 13.2 诺贝尔物理学奖与现代物理学的发展脉络 292
- 13.3 诺贝尔物理学奖与中国 296
- 13.4 结语 301

附录 1998—2010 年诺贝尔物理学奖 303

参考文献 322



上篇

20世纪物理学俯瞰

物质探源——粒子物理、核物理和原子、分子物理基础研究

20 世纪物理学对于微观世界的探索取得了空前的成就。21 世纪初叶物理学的发展并非超越其基本格局。粒子物理、核物理、原子物理与分子物理学都是研究物质的微观结构及其相互作用规律的,它们所研究的是四个不同的微观层次,即分子、原子、原子核和基本粒子,大致研究的空间尺度可见图 1.1。

按照现代物理学的观点,原子构成分子,原子核与核外若干电子构成原子,中子与质子构成原子核,夸克(quarks)构成中子、质子等强子(Hadron)。夸克、轻子(电子是其中一员)和媒介粒子(如光子等传递力的粒子)现代实验未发现它们内部有结构,叫基本粒子。

量子理论有一个重要原理,叫海森堡测不准关系

$$\Delta P \cdot \Delta l \geq h, \quad (1.1)$$

其中 ΔP 是动量不确定量值, Δl

是距离不确定量值。我们知道动能 $E_k = \frac{1}{2m} \Delta P^2$ 。由此可见,可分辨的空间尺度有关系

$$\Delta l \sim \frac{1}{\sqrt{E_k}}, \quad (1.2)$$

就是说,如果我们探索空间尺度 Δl 越小,需要的粒子能量 E_k 越大。在图 1.2 中标明这种情况。图中右边显示的是研究不同微观粒子结构所需要的能量(它应相当“束缚”能)。

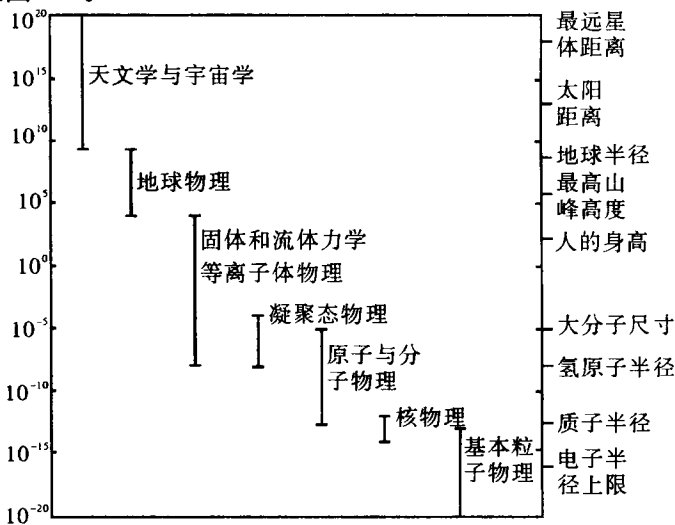


图 1.1 物理学各分支研究尺寸不同的自然界领域

1.1 基本粒子家族

基本粒子物理学是关于物质最小组分及其相互作用的科学。基本粒子就

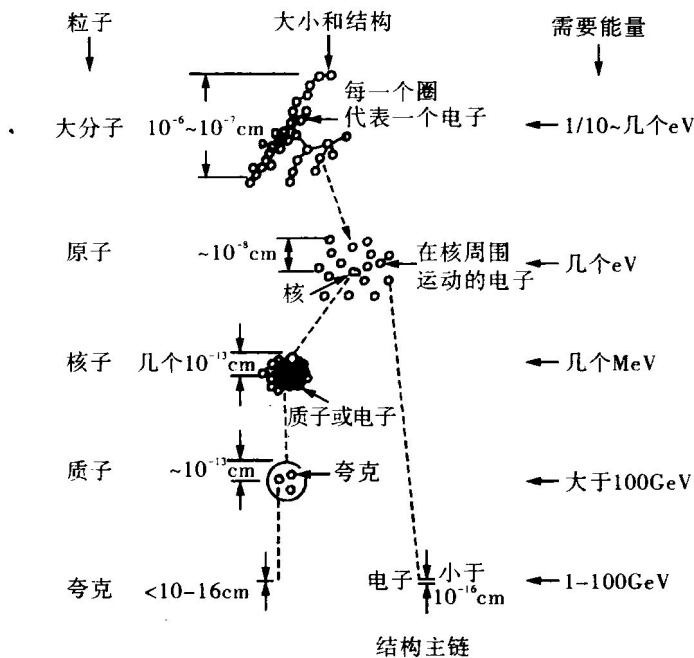


图1.2 分子、原子、原子核、强子(质子)与夸克的尺度、结构与研究相应需要的能量示意图

注意 1eV (电子伏特) $= 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ (焦耳) $1\text{MeV} = 10^6 \text{ eV}$,

$1\text{GeV} = 10^9 \text{ eV}$, $1\text{TeV} = 10^{12} \text{ eV}$.

是物质世界最简单、最基本组分,亦即从现在实验条件下既不能将它们“打碎”,又未“观察”到它们有内部结构。20 世纪中几乎有 50 年之久,人们一直把中子、质子当作基本粒子,而后来人们发现它们有内部结构,是由夸克构成。于是基本粒子的桂冠便由它们头上转而加诸夸克的头上了。亘古以来,无论是希腊文明还是东方文明都传播一个信念,我们的物质世界由极少种类的“基本粒子”构成。希腊人认为构成自然界有四种基本物质:土、空气、火和水。中世纪的哲人和炼丹士又加上以太(aether)、水银、硫、盐等等。1861 年玻义耳定义化学元素的概念,到 1914 年发现元素 85 种(就是当时“基本粒子”数目)。以后发现电子和质子,所有元素均由它们构成。于是“基本粒子”数目一下减小到 2。从 1932 年发现中子,到 50 年代,发现“新粒子”数目增加到接近 100 了。1964 年夸克模型提出,基本粒子数目又猛然减小。基本粒子种类的变化,见图 1.3。

今天公认的三大类基本粒子:夸克、轻子和媒介粒子的尺度大小没有直接实验数据,但间接证据表明,它们均小于 10^{-18} m 。因此研究它们必需极高的能量,才能分辨如此小的时空结构(Δt 和 Δl),才能产生新粒子(按爱因斯坦质能公式是 $E=mc^2$,其中 m 为粒子质量, c 为光速)。于是粒子物理学又叫高能物理。

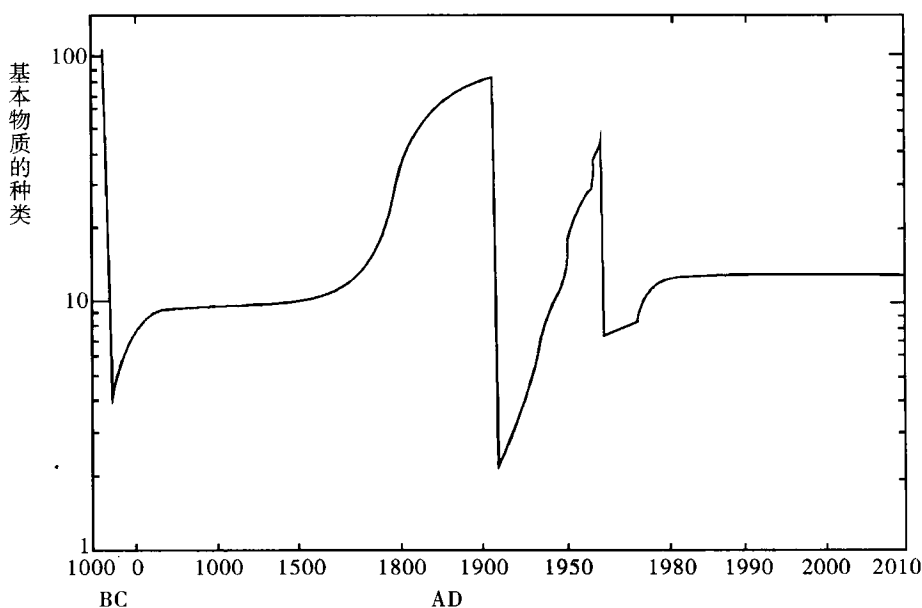


图 1.3 人类认为“基本粒子”数目千年变化图

20 世纪物理学另一个重大成就就是，发现自然界只存在四种基本相互作用。其中引力和电磁相互作用早已发现，它们强度均随距离的平方减少，称为长程力。其余两种系本世纪发现。一种称为核力或强相互作用，其强度极强。原子核之所以如此坚实，其中中子和质子结合如此牢固（尽管质子之间有强大电斥力），完全由核力束缚的缘故，但其力程极短，大致在 10^{-15}m （大概相当于中子、质子或核半径）以外就衰减到几乎察觉不到了。另外一种力称为弱相互作用，力程更短，大约 10^{-18}m ，强度也很小。中子的衰变，许多强子的衰变以及放射性元素的核衰减就是弱力起的作用。像电子、中微子一类的轻子不参与强作用，但受弱作用影响。关于四种基本相互作用大致性质见表 1.1。

表 1.1 四种基本力的性质

力的类别	引 力	弱 力	电磁力	强相互作用(核力)
力程	延展到极远 (长程)	限于 10^{-18}m 内(短程)	延展到极远 (长程)	限于 10^{-15}m 内(短程)
在 10^{-15}m 处与强力强度的比值(相对强度)	10^{-38}	10^{-13}	10^{-2}	1
传递力的媒介粒子	引力子 (未发现)	中间玻色子 W^+ , W^- , Z^0	光子	胶子(八种)。已有间接实验确认，但未发现自由胶子(也许永远不能发现)。
小质量典型强子由于该力而衰变的时间	无	10^{-10} 秒	10^{-20} 秒	10^{-23} 秒
媒介粒子的质量	理论预计为 0 (实际不知)	90GeV 左右($W^\pm=80.6\text{ GeV}$, $Z^0=91.2\text{ GeV}$)	0	理论值为 0

媒介粒子族。从现代量子规范理论来看,所有相互作用均由所谓媒介粒子(或规范粒子)传递。电磁相互作用的媒介粒子“光子”早在 1887 年赫兹(H. Hertz)发现光电效应时人们就已察觉到它的踪迹了。1983 年,欧洲核子中心鲁比亚(C. Rubbia)的 UA1 小组和巴勒尔(M. Banner)的 UA2 小组发现传递弱相互作用的媒介粒子——中间玻色子 $W^\pm, Z^0$ 。按 1993 年数据,其质量分别为 80.6GeV(吉电子伏)和 95GeV。至于胶子(Gluon),在 1979 年,前联邦德国的佩特拉(DESY 的 PETRA)的正负电子对撞机实验中发现一种三喷注(jet)现象,普遍认为这是胶子存在的强有力、但是间接的证据。理论物理学家猜测,引力也有媒介粒子,称之为引力子(Grarition)。目前尚无此种粒子存在的实验迹象,要查明它们实在太困难了,因为在基本粒子之间的引力实在太微弱。

轻子族。目前已知六种轻子,而且它们是成对出现的:一种带电轻子伴同一种中性粒子“中微子”。每一对称为一代(generation)。以往物理学家一般认为中微子质量为零。1980 年,苏联物理学家宣布它们测得电子型中微子的静质量 $14\text{eV} < m_{\nu_e} < 45\text{eV}$,在科学界引起一阵激浪。迄今为止我们未发现三代中微子有静质量的肯定实验证据。在表 1.2 给出目前的实验值上限(实际由实验精度限制确定)。 τ 轻子是质量很大的一种轻子,珀尔(M. L. Perl)等科学家发现于 1975 年。1992 年 8 月,我国科学工作者伴同美国 SLAC 等两个科学单位,在北京正负粒子对撞机测得 τ 轻子质量为 1776.9MeV(1.7769GeV),背景和系统误差为 $+0.4 \pm 0.2\text{MeV}$ 。这是世界上最佳数据。1994 年初,在欧洲核子中心的世界上最大对撞机(e^+e^-)LEP 的四个小组测得其寿命为 293fs(飞秒,即 10^{-13} 秒)。轻子不参与强作用。

表 1.2 三代轻子性质表

	粒子名称	电荷	质量	实验发现年代
第一代	e^- (电子)	-1	0.51MeV	1897(J. J. Thomson)
	γ_e (电子型中微子)	0	$<17\text{eV}$	1956(C. L. Cowon 等)
第二代	μ^- (μ 子)	-1	106MeV	1936($\begin{smallmatrix} \text{C. D. Anderson,} \\ \text{S. H. Neddermeyer} \end{smallmatrix}$)
	γ_μ (μ 型中微子)	0	$<0.27\text{MeV}$	1962(G. Donby 等)
第三代	τ (τ 轻子)	-1	1.7769GeV	1975(M. L. Perl 等)
	γ_τ (τ 子型中微子)	0	$<30\text{MeV}$	间接证据 1975(M. L. Perl 等) m_{ν_τ} 上限由 BES 数据确定(1992)

夸克族已发现 6 种,其中最后发现的是一种 t 夸克。夸克参加所有四种相互作用。迄今未发现自由状态下的夸克。夸克与轻子都不能单个产生,它们遵从所谓“夸克数”与“轻子数”守恒。

1994 年 4 月 26 日美国费米国家实验室 CDF 小组正式宣布,在 TEVATRON 质子—反质子对撞机上从 1992 年 8 月到 1993 年 6 月,他们 10^{12} 次对撞事例中,选取 1.6×10^7 有效事例,经过认真分析后确认,找到 12 个 t 夸克候选者事例。统计误差 1/400。就是说,有 99.75%的可能性或者把握发现 t 夸克。为了进一步提高可靠性,他们在 1995 年 8 月到

1996 年 5 月以前,再积累 5 倍事例,以确认其发现。1996 年 3 月 2 日,美国国家费米实验室向全世界正式宣布,t 夸克已经发现,他们找到 56 个 t 夸克事例。

我们注意,夸克也分三代,而且质量也是一代比一代大,像轻子一样,质量最大的粒子跟质量小的粒子相比,相差悬殊。就带电轻子而言,比值是 3000,对于夸克则是 4×10^5 !

表 1.3 三代夸克性质表

	粒子名称	电荷	质量	“发现”年代
第一代	u(上夸克)	$+2/3$	0.4GeV	1964(M. Gell-Mann)
	d(下夸克)	$-1/3$	0.7GeV	1964(M. Gell-Mann)
第二代	c(粲夸克)	$+2/3$	1.5GeV	1974(丁肇中 B. Richter 等)
	s(奇异夸克)	$-1/3$	0.2GeV	1964(M. Gell-Mann)
第三代	t(顶夸克)	$+2/3$	174GeV	1996(Fermilab)
	b(底夸克)	$-1/3$	5GeV	1977(L. M. Lederman 等)

在表 1.3 中,发现年代应理解为有可靠实验证实的时候。

谈及基本粒子家族时,应该谈谈庞大的强子家族。强子指参与强相互作用的粒子,它们是亚核核子,其中又分重子、介子和超子。重子和超子的自旋为 $1/2$,或 $1/2$ 的奇数倍(单位 $\hbar$),三个夸克由胶子“粘合”(也许还要加“夸克对”——海夸克 Sea-quark)成重子和超子,一个夸克与“反夸克”由胶子“粘合”成介子。介子的自旋为 0 或 Y_2 的偶数倍。例如 2 个 u 夸克加一个 d 夸克构成质子。1 个 u 夸克加上 1 个反 u 夸克($\bar{u}$)构成 π 介子等等。超子是质量极大的粒子,强子中有大量寿命极短($\sim 10^{-23}$ 秒)的所谓“共振态”粒子,总数约 400 余个。

夸克都有对应的电荷(或电荷共轭量子数)相反的伴侣一反夸克,但两者质量相同,这点跟强子均有相应的反强子一样。实际上,正如狄拉克(P. L. Dirac)在 1928 年指出的那样,相对论量子理论要求每种粒子有相应的反粒子。中性粒子与其反粒子往往是其螺旋性(自旋)相反,粒子与反粒子会发生“湮灭”,辐射高能 γ 光子。强子本身尽管不是基本粒子,但是它们在粒子物理学的地位极其重要。首先因为夸克不能以自由状态存在,故有关夸克的实验均系对强子中的夸克进行。其次,强子本身就是物质的一种令人眼花缭乱的结构形式,自有其无可估量的研究价值。

夸克的相互作用依靠传递胶子进行。在运动的夸克中胶子携带一部分能量(大约为总动量的一半),但强子的质量及其他性质确由夸克确定。

对于强子和基本粒子的研究,在实验中有两个途径:一是通过两个粒子的碰撞,然后研究碰撞后产生的粒子(作用力的规律和产物粒子的类型);二是通过研究不稳定粒子自发衰变后产生的质量较小的粒子,如 π 介子衰变为 u 子和中微子($\pi^- \longrightarrow -\bar{u} + \bar{\nu}_d$)。完全稳定的基本粒子只有质子、电子和三种中微子。

1.2 标准模型和各种统一理论方案

20 世纪粒子物理的最高成就可以用标准模型 $SU(3)_c \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y$ 代表,其中 SU

(3)、 $SU(2)$ 、 $U(1)$ 都是表示物理系统对称性的数学(群论)符号。标准模型的灵魂是对称性。

经典物理早就发现物理系统的能量、动量和动量矩守恒定律,原来从对称性的角度来看,不过是系统空间均匀性、时间均匀性和空间各向同性等对称性的反映。对称性跟不变性往往是同义语。空间和时间均匀性就是物理系统的性质不随空间和时间的平移变换而发生变化,空间各向同性意味着在空间旋转下系统性质保持不变。例如,牛顿定律的有效性就不随时间(无论是公元前,还是现在以及 100 世纪以后)、地点(无论是地球,还是太阳以及河外星系)和空间的方向发生变化。此类与时空有关的对称性叫时空对称性。另一类与时空无关的对称性叫内禀对称性,如相对论量子力学方程对于正、反粒子不变,亦即具有正反粒子(或电荷共轭 C)对称性,等等。

自从 1954 年杨振宁、米尔斯(R. L. Mills)提出杨—米尔斯规范理论以来,物理学家逐渐拥有一个坚定信念——所有的相互作用都具有规范不变性。所谓规范不变性是一种内禀对称性,系指物理系统的动力学规律在场量(波函数)发生相位因子变化 $\Psi \rightarrow \Psi' = e^{i\varphi(x)} \cdot \Psi$ 时保持不变。如果相位因子与时空有关,就叫第二类或局域规范变换,如果再加上相位因子彼此不可交换,就叫非阿贝尔(Non-Abelian)规范不变性。规范理论要求有规范粒子(场)存在。

描写电磁相互作用的麦克斯韦理论就是一种简单的规范 $U(1)$ 理论,其中的相位因子可以交换。量子化的电磁理论—量子电动力学(QED)的规范粒子就是熟知的光子。

1973 年,波利策(H. D. Politzer)、格罗斯(D. J. Gross)和维尔泽克(F. Wilzek)等提出描述强相互作用的“量子色动力学”(QCD) $SU(3)_c$, 这里 $SU(3)_c$ 表示 QCD 遵从的规范对称性, C 表示颜色(Colour)。这是一种复杂的非线性理论,也是一种非阿贝尔规范理论。QCD 认为,像电荷是电磁力的“源”一样,“色荷”(Colour charge)是强作用的“源”,基本色有三种:红(R)、绿(G)和蓝(B)(这是 $SU(3)_c$ 中 3 的来源)。夸克带有基本色。胶子则是带有复合色。像电荷有负电荷一样,夸克也有三种反色荷 $\bar{R}$ 、 $\bar{G}$ 和 $\bar{B}$ 。胶子的复合色可表如(其中可以看出胶子系夸克与反夸克复合态):

$$G_{ij} = q_i \bar{q}_j \text{ (其中 } i, j = 1, 2, 3 \text{ 表示红、绿、蓝)}.$$

这样应该有 9 种复合色,但其中有一种复合色

$$G_W = q_R \bar{q}_R + q_G \bar{q}_G + q_B \bar{q}_B$$

相应“白色”,或无色。因此胶子只有 8 种。

QCD 跟 QED 的根本区别在于,后者是线性理论,满足迭加原理,光子之间不产生相互作用(光子不带电),但 QCD 是非线性理论,胶子带“色荷”,彼此有相互作用(自作用)。由于自作用的影响,强相互作用有一种很奇怪的特点——其强度在近距离(因而相应高能域 $\sqrt{\Delta E} \sim \frac{1}{\Delta L}$)时极其微弱,以致可以说在强子内的夸克几乎没有相互作用,这种现象叫渐近自由(Asymptotic Freedom);而距离增大(低能域)作用力急剧增强,以致我们无法看到自由夸克,这种现象我们称为夸克禁闭(quark confinement)。

渐近自由和夸克禁闭应该说正确反映实验事实。但夸克禁闭时,作用强度大,无法用数学(微扰法)严格证明,人们只得退而求其次,用唯象模型,如弦模型、袋模型(Bag Model)等,或用离散化的办法,如威尔逊(K. Wilson)的格点规范理论研究它。

规范理论要求规范粒子的静质量为零。弱相互作用的媒介粒子看来不为零,似乎很难说它们遵守规范不变性。后来从凝聚态物理的研究(J. Goldstone、Y. Nambu 等)中知道,如果引入一种希格斯(P. Higgs)场使真空产生所谓自发破缺,就能使规范粒子获得质量,同时保持规范对称性。温伯格(S. Weinberg)和萨拉姆(A. Salam)等在 1967 年~1968 年间成功地建立起弱相互作用和电磁相互作用统一的理论,叫做 $SU(2) \otimes U(1)$ 对称的规范理论。该理论有四种规范粒子,其中三个 $W^\pm$ 、 Z^0 由于引入希格斯场获得质量,传递弱相互作用,余下无质量规范粒“光子”传递电磁相互作用。 $W-S$ 理论认为有两种耦合“常数”(强度),随着能量增加而变化,其中电磁作用强度会逐渐减少,而弱作用强度则慢慢增加,到达 10^{15} GeV 高能域(或相当 $10^{-24} \sim 10^{-25}$ m 的极短距离),二者合而为一,真正变成一个统一的弱电了。在目前我们可达到的不太高能域内,两者强度不同,看起来就是两种力了。

$W-S$ 理论预言有一种中性流现象,系由 Z^0 传递的,如质子(p) + 中微子(γ_e) $\longrightarrow Z^0 \longrightarrow p + \gamma_e$,以前的理论认为不应该发生,实验上也未发现过。1973 年,欧洲核子中心(CERN)和美国的费米实验室、布鲁海文实验室(Brookhaven)和阿贡实验室(Argonne)发现中性流事件, $W-S$ 理论猛然声名鹊起。1983 年,CERN 发现中间玻色子 $W^\pm$ 、 Z^0 ,而且其质量跟 $W-S$ 理论预言的 83GeV~93GeV 几乎完全一致,更使得 $W-S$ 理论令人信服,随之被称为弱电标准模型。

然而,鲁比亚等宣布发现中间玻色子之际,同时声称,还发现一种“单喷注”现象,而这是与标准模型相矛盾的。自 1989 年到 1993 年,鲁比亚领导的 CERN 实验室,主要任务之一就是用实验更精密检验标准模型。人们发现,单喷注现象完全可以用标准模型解释,并且未发现其他与标准模型矛盾的重大实验事实。

现在的标准模型往往是将 QCD 与弱电模型结合在一起的扩大的标准模型,即 $SU(3) \otimes SU(2) \otimes U(1)$,用 SMT(Standard Model Theory)表示之。模型中有 20 多个参数,其中一半来自黑格斯机制部分。其中一个参数就是中微子的代数 N_γ 。按照从 1989 年秋到 1993 年之间,CERN 的电子对撞机积累的 Z^0 能域的 6×10^6 事例,计算得到

$$N_\gamma = 2.980 \pm 0.240,$$

与目前确定的 3 代中微子完全一致,即按 SMT 不可能有更多“代”中微子发现了。这一点与宇宙学的数据也一致。根据标准的宇宙学大爆炸模型,宇宙中 ^4He 的丰度(即相对含量)与 N_γ 有确定的函数关系。沃克、斯特格曼和斯拉曼(T. P. Walker, G. Steigman 和 D. N. Schramm)由此给出(1991 年)

$$N_\gamma \leq 3.3。$$

这一点也是对 SMT 的一个有力支持。

SMT 认为,有关三代轻子过程中三个弱相互作用耦合强度 G_e 、 G_μ 、 G_τ 应该相同,这就

是所谓 $e-\mu-\tau$ 普适性原理。但是按照 1990 年国际物理学权威机构“粒子数据组织”公布的数据,却是

$$G_{\tau}/G_{\mu}=0.937\neq 1!$$

问题在哪里? 要么普适性不正确,从而 SMT 有大问题,否则就是实验数据有问题。1991 年 10 月,中美科学家利用北京正负电子对撞机重新测量 τ 轻子的质量,误差比原来的小一个数量级。参照 1992 年以来美国和 CERN 的五个实验组的数据,和北京 BES 合作组同期得到的最新数据

$$m_{\tau}=1776.9\pm 0.3\text{MeV},$$

可得

$$G_{\tau}/G_{\mu}=0.996\pm 0.0006。$$

这个数值与 SMT 预计值十分符合。

尽管如此,SMT 理论本身就有严重缺陷。首先是引入的希格斯粒子到底是什么? 从现代实验数据来看其质量范围(最低限度 SMT 模型)

$$53\text{GeV}<m_H<1000\text{GeV}。$$

不同的理论方案,如各种不同非最低限度方案,预言的希格斯粒子就有许多种了。理论中存在自由参数太多,以致不像一个基本理论,倒像一个半唯象理论了。

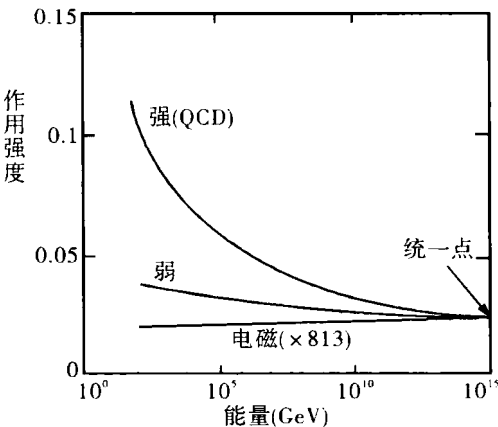


图 1.4 大统一原理图

一般 GUT 认为,大约在 10^{15}GeV 能域处强、弱和电磁三种力就合而为一鉴于弱电理论的成功建立,尤其是人们注意到:a. 夸克与轻子的“代”结构完全一致;b. 弱电 SMT 和强作用 Q、C、D 均为规范场理论;c. 强作用与弱作用的强度随能量(或距离)变化(强作用在高能域随能量增高强度减弱,而弱电作用则有上升或即使下降,其趋势也慢得多),有可能在某能域(如 10^{15}GeV)处合三为一等等。1973 年萨拉姆(时在英国帝国大学任教)与其挚友帕提(Jogesh Pati,时任教于美国马里南大学)提出将强作用、电磁作用和弱作用都统一起来的大统一理论(GUT)。他们的理论叫 $SU(4)\otimes SU(4)$ 规范理论。但在以后陆续出台的众多大统一理论中,最著名的要数格拉肖教授与他的博士后乔治(H. Geogi)在 1974 年提出 $SU(5)$ 的大统一理论。

大统一理论的主要理论预言是质子会衰变。例如