

# 物质结构在夸克—轻子层次上的动力学规律 和研究发展趋势\*

黄涛<sup>†</sup>

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

**摘要** 文章综述了粒子物理中标准模型理论的历史发展、面临挑战以及未来的发展趋势。目前阶段物质结构最小组成单元是夸克和轻子,量子色动力学是描述夸克—胶子之间强相互作用的基本理论,它具有渐近自由和夸克禁闭的特点。量子色动力学和电弱统一理论一起构成粒子物理中标准模型理论。标准模型理论成功同时也面临两大挑战:对称性破缺的本质和夸克禁闭难题,这意味着标准模型理论需要发展和突破。人们期望粒子物理学、天文学和宇宙学交叉发展联手解决物质结构和早期宇宙研究中面临的难题,最终揭示超出标准模型的新物理规律。

**关键词** 夸克,轻子,量子色动力学,电弱统一理论,标准模型理论,物质结构

## The dynamics of the quark—lepton level in the structure of matter

HUANG Tao<sup>†</sup>

(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** The history, current challenges, and future development of the standard model in particle physics are reviewed. At the present stage, quarks and leptons are the fundamental constituents of the structure of matter in the universe. Quantum chromodynamics is the fundamental theory of the strong interaction between quarks and gluons, and has two important features: asymptotic freedom and quark confinement. The standard model in particle physics comprises quantum chromodynamics and electro-weak unification theory, and has been very successful. However, it is also challenged by the problems of symmetry breaking and quark confinement. This means that the standard model has to be extended and new breakthroughs are necessary. It is expected that the puzzles of the structure of matter and the early universe can be solved by the interdisciplinary development of particle physics, astrophysics and cosmology in the near future. Eventually, new physics beyond the standard model will be explored.

**Keywords** quark, lepton, quantum chromodynamics, electro-weak unification theory, standard model theory, structure of matter

正值 21 世纪进入第 2 个 10 年的时候,回顾过去 10 年中的诺贝尔物理奖是很有启示的。10 次奖中与深层次物质结构相关的就有 3 次:2008 年,南部阳一郎(Yoichiro Nambu)因为发现了亚原子物理学中的自发对称性破缺机制,小林诚(Makoto Kobayashi)、益川敏英(Toshihide Maskawa)则因有关对称性破缺起源的发现,他们 3 人共同获奖;2004 年,美国科学家戴

维·格罗斯(D. J. Gross)、戴维·波利策(H. D. Politzer)和弗兰克·维尔切克(F. Wilczek)发现了粒子物理强相互作用理论中的渐近自由现象而获诺贝尔物理学奖;2002 年,美国科学家雷蒙德·戴维斯(Raymond

\* 国家自然科学基金(批准号:10975144)资助项目

2011-02-11 收到

<sup>†</sup> Email: huangtao@ihep. ac. cn

Davis)、日本科学家小柴昌俊(Masatoshi Koshiba)和美国科学家里卡尔多·贾科尼(Riccardo Giacconi),因为在“探测宇宙中微子”和“发现宇宙 X 射线源”方面取得的成就获得诺贝尔物理学奖.这 3 次奖说明了 3 个重要问题:(1)2008 年诺贝尔物理学奖肯定了弱电统一模型中自发对称性破缺机制和 CP 对称性破缺起源的正确性;(2)2004 年诺贝尔物理学奖肯定了量子色动力学理论中渐近自由性质的正确性.大家知道弱电统一模型理论和量子色动力学理论是粒子物理标准模型理论的相互关联的两大部分,意味着标准模型理论的巨大成功;(3)2002 年诺贝尔物理学奖中戴维斯和小柴昌俊的成就肯定了中微子有静止质量,而在标准模型中中微子质量为零,这意味着实验揭示了标准模型的局限性,必须被突破.可以用一句话概括这三次诺贝尔物理学奖和当前的发展,即粒子物理学家在实验上进一步检验标准模型理论成功的同时,在努力寻找和揭示超出标准模型的新物理.作者曾在 1998 年出版的《21 世纪 100 个科学难题》这本书中的题为“对深层次物质结构的探索”的文章中(见此书第 6 页),提出对称性破缺的本质和夸克禁闭是 21 世纪探索深层次物质结构面临的两大科学难题.这两大难题的突破必将揭示超出标准模型的,新的物理规律.

## 1 夸克—轻子层次的特点

粒子物理学(或高能物理学)是探索深层次物质结构最小组成成分和性质及其相互作用规律的前沿科学.从历史上看,我们可以追溯到 1932 年查德威克(J. Chadwick)发现中子时的情形.当时人们认为自然界中存在三种基本粒子:质子、中子、电子.原子由原子核和绕核运转的电子组成,自然界万物就是由这三种基本粒子构成的.上世纪 50 年代,随着高能加速器的发展,在加速器实验中发现了一大批直接参与强相互作用的粒子,它们的寿命极短.60 年代初,自然界中已发现的基本粒子多达一百几十种,按照相互作用可以分为两类:一类是直接参与强相互作用的粒子,如质子、中子、 $\pi$  介子、奇异粒子和一系列的共振态粒子等,统称为强子;另一类是不直接参与强相互作用,只直接参与电磁、弱相互作用的粒子,如电子、 $\mu$  子和中微子等,统称为轻子.进一步的高能物理实验揭示了上百种强子并不“基本”,它们是有内部结构的.按照 SU(3)对称性表示方法,可以很好地对众多强子进行分类,这种分类非常像原子按门捷列夫周期表分类.加速器实验的发展还发现了质子不是点粒子而是

有一定大小内部结构的粒子.1964 年,盖尔曼(M. Gell-Mann)和茨维格(Zweig)提出了夸克模型理论<sup>[1]</sup>.当时已发现的强子都是由三种更基本的夸克(上夸克 u、下夸克 d 和奇异夸克 s)组成的.所有这些实验结果都证实了描述强子内部结构的夸克模型.质子、中子、 $\pi$  介子等强子是由更基本的夸克组成的,夸克被看成是物质结构的新层次.1974 年,丁肇中和 Richter(里希特)<sup>[2]</sup>发现了第四种夸克——粲夸克 c;1977 年,莱德曼(Lederman)等<sup>[3]</sup>发现了底夸克 b;1995 年,发现了<sup>[4]</sup>顶夸克 t;加上前三种夸克共有 6 种夸克( $u, d, s, c, b, t$ ).这 6 种夸克及其反夸克就是构成所有数百种强子的“基本”单元.同时轻子的发现也达到了 6 种(电子、电子型中微子、 $\mu$  子、 $\mu$  型中微子、 $\tau$  轻子、 $\tau$  型中微子).这样夸克和轻子就是目前阶段我们所认识的物质结构的最深层次的最小组成成分.人们称上夸克 u、下夸克 d 为第一代夸克,粲夸克 c、奇异夸克 s 为第二代夸克,顶夸克 t、底夸克 b 为第三代夸克:

$$\begin{array}{ccc} \text{第一代} & \text{第二代} & \text{第三代} \\ \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, & \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}, & \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}. \end{array}$$

相应地轻子也有三代,

$$\begin{array}{ccc} \text{第一代} & \text{第二代} & \text{第三代} \\ \begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}, & \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}, & \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}. \end{array}$$

夸克、轻子通过电磁相互作用、弱相互作用、强相互作用和引力等运动规律,构成了自然界万物奥妙无穷、千变万化的物理现象.

夸克模型成功地解释了自然界中数百种强子谱,同时也提出一个问题.组成强子的夸克不能被击出呈自由状态,只能禁闭在强子内部,这就是夸克禁闭问题.

人们为了解释夸克模型中统计性质问题而引入了“色”自由度<sup>[5]</sup>,即假定每种夸克除了内部自由度味( $u, d, s, c, b, t$ )不同外,还具有三种不同颜色:红(R)、绿(G)、蓝(B),由此就可以做到在夸克模型里强子遵从相应的费米和玻色统计.每一种夸克含有内部色空间自由度,即有三种不同的色,不同色夸克之间的强相互作用是通过传递带色的胶子而发生的.轻子不直接参与强相互作用,没有内部色空间.这种“色”自由度的引入立即获得了实验上的证实,例如  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  衰变几率以及  $e^+e^-$  对撞中 R 值的测量,  $R = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{强子})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)}$ , 其中  $\sigma$  是相应过程的碰撞截面.一方面在夸克模型里可以直

接计算  $R = N_c \sum_{i=1}^{N_f} Q_i^2$ , 其中  $N_f$  是夸克的“味”数,  $N_c$  是夸克的“色”数,  $Q_i$  是第  $i$  种夸克的电荷值. 另一方面, 实验上可以在正、负电子对撞机实验中精确地测量  $R$  值. 早期及北京谱仪(BES)近几年来的实验都证实了“色”数  $N_c=3$ .

1967年, 美国斯坦福直线加速器中心(SLAC)在电子打质子的深度非弹性散射实验中发现了标度无关性规律(scaling law). 1990年的诺贝尔物理奖颁发给了这一规律的发现者 J. Friedman, H. Kendall 和 R. Taylor. 布约肯(J. Bjorken)首先认识到标度无关性规律意味着大动量迁移下电子是与质子内许多无相互作用的自由点粒子相互作用. 费曼(R. Feynman)称质子内的这些点粒子为部分子(Parton). 随后的实验和理论研究表明, 这些部分子就是价夸克和海夸克(夸克-反夸克对), 建立了所谓的夸克-部分子模型, 很好地解释了当时的标度无关性实验现象. 这个模型告诉人们, 在动量迁移足够大时, 质子内的部分子具有渐近自由的现象. 实验上标度无关性规律的发现以及布约肯在理论上所做的发展, 意味着夸克之间很强的相互作用在大动量迁移下变弱, 具有渐近自由的特点. 由此可见, 人们对物质结构的认识经历了原子-原子核-强子的过程, 深入到夸克和轻子层次时, 具有以下明显不同的特点: (1) 夸克禁闭在强子内部; (2) 强子内的部分子具有渐近自由现象; (3) 三代夸克和三代轻子具有对称性; (4) 中微子质量不为零且很小.

## 2 量子色动力学(QCD)

人们接下来要提出的问题是, 什么样的强相互作用理论能描述夸克在强子内具有渐近自由和夸克禁闭的特点?

早在1935年, 汤川提出了质子和中子通过交换一种未知的介子(其质量介于质子和电子之间), 形成原子核内很强的束缚力, 这种介子称为  $\pi$  介子, 这种力与交换无质量光子的电磁力不同, 是短程力, 这就开创了强相互作用研究的历史. 1947年, 鲍威尔(C. Powell)发现了参与强相互作用的  $\pi$  介子. 在汤川的强相互作用理论中, 相互作用强度若以  $g$  标记, 则核力实验发现有效相互作用强度远远大于1,  $\frac{g^2}{4\pi} \cong 14 (\gg 1)$ , 这要比电磁相互作用  $\frac{e^2}{4\pi} = \frac{1}{137}$  大很多, 因此微扰理论不再适用, 高阶项的贡献不仅不能

忽略, 而且使得整个微扰理论计算变得无意义. 电磁相互作用的基本理论是量子电动力学(QED), 人们测量到的电荷( $\frac{e^2}{4\pi} = \frac{1}{137}$ )是屏蔽以后的有效相互作用, 即在小动量迁移下(汤姆孙极限)确定的, 在QED理论中, 随着动量转移  $Q^2$  的增加, 有效耦合常数(电荷  $e$ )随之变化而增大. 这样一个行为完全由重整化理论中的  $\beta$  函数确定, 在QED理论中,  $\beta$  函数是正的, 有效耦合常数随能量增加而增大, 正、反电子对屏蔽电荷. 当  $Q^2$  很大时, 探测电荷的波长很短, 直接探测到未被屏蔽的电荷, 其探测到的电荷量自然增大. 因此, QED理论不具有上述渐近自由的特点, 人们推测, 只有具有  $\beta$  函数为负的量子场论才是给出渐近自由特点的强相互作用理论. 1972年, 射曼切克(Symanzik)和特霍夫('t Hooft)在马赛的国际会议上注意到非阿贝尔规范理论(QED是阿贝尔规范理论)有可能具有负  $\beta$  函数的性质. 普林斯顿大学的格罗斯小组和哈佛大学的柯尔曼(S. Coleman)小组研究了所有可能的量子场论, 尝试发现什么样的理论可以具有渐近自由的性质.

1973年春天, 格罗斯、维尔切克和波利策尔分别在 *Phys. Rev. Lett.* 上发表了两篇划时代的论文<sup>[6]</sup>, 提议 SU(3) 色规范群下非阿贝尔规范场论可以作为强相互作用的量子场论, 其  $\beta$  函数是负的, 具有反屏蔽性质, 可以使有效耦合常数  $\alpha_s(Q^2)$  随着  $Q^2$  增大而减小, 即渐近自由性质, 从而建立了量子色动力学理论. 在这一理论中, 强相互作用的媒介子是无质量的胶子. 与此相对比, 在QED理论中, 媒介子是光子, 它是电中性的, 然而这里胶子不是电中性的, 正是由于胶子带色荷, 因此胶子之间有相互作用从而产生反屏蔽效应, 决定了强相互作用的渐近自由性质. 这一性质对认识自然界中强相互作用的本质极为重要. 量子色动力学理论已成为强相互作用的基本理论. 它的基本成分是夸克和胶子, 它们被紧紧束缚在强子内部, 不能被击出成为自由的状态, 只可能间接地由强子实验观测到它们的存在, 例如三喷注的实验结果证实了强子内部存在胶子等. 由于实验上不能直接观察到夸克和胶子, 对QCD理论的检验要远比量子电动力学和弱、电统一模型理论的检验困难得多.

量子色动力学理论中除了夸克和胶子与量子电动力学中电子和光子类似的相互作用以外, 胶子之间还存在三胶子和四胶子相互作用顶点. 正是这些顶点决定相互作用耦合强度  $g_s$ . 随着能量的增加而

减小以及与  $g_s$  紧密相关的  $\beta$  函数为负值. 最终导致强相互作用的有效耦合常数  $g_s$  满足下列等式:

$$\alpha_s(Q^2) = \frac{g_s^2}{4\pi} = \frac{4\pi}{\beta_0 \log \frac{Q^2}{\Lambda^2}},$$

其中  $\alpha_s$  为有效耦合常数, 又称跑动耦合常数,  $\beta_0 = -\left(\frac{2}{3}N_f - 11\right)$  是单圈近似下的  $\beta$  函数值,  $N_f$  是夸克的味数,  $\Lambda$  是 QCD 的标度参量. 从上式可以看到, 当能量  $Q^2$  趋于无穷大时, 有效耦合常数  $\alpha_s(Q^2)$  趋于零, 定量地表达了强相互作用渐近自由的性质. 人们形象地将反映这一特点的耦合常数称为跑动耦合常数. 跑动耦合常数随能量  $Q^2$  增大而呈对数地减小, 这一规律已得到一系列物理过程的实验结果证实. 由图 1 可以看到, 当  $Q^2$  从几个  $\text{GeV}^2$  到  $(100\text{GeV})^2$  范围内变化时, 不同物理过程的实验中测得的跑动耦合常数  $\alpha_s$  都处在理论预言的对数曲线上. 图中阴影部分是由量子色动力学 (QCD) 理论计算中参量  $\Lambda$  的不确定性造成的. 2004 年诺贝尔奖的颁发意味着量子色动力学渐近自由理论成功地得到了 30 多年实验检验, 它已走向精密验证和发展的阶段.

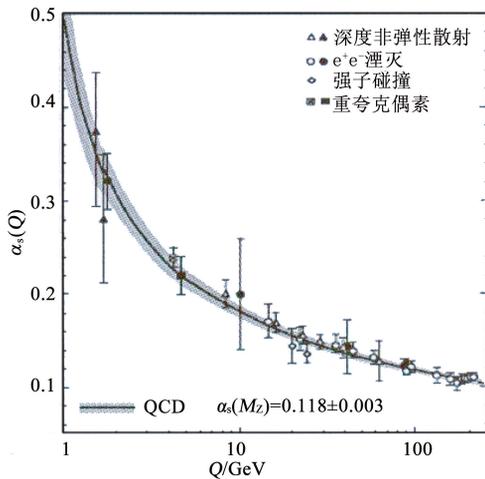


图 1 有效耦合常数  $\alpha_s(Q)$  随  $Q$  变化而改变, 一系列物理过程的实验证实了上面有效耦合常数公式的正确性 (图中  $M_Z$  是中性中间玻色子  $Z$  的质量)

QCD 理论仅在高动量迁移下的物理过程中可以得到应用和实验检验, 而对于低动量迁移的物理过程, 则由于它面对夸克禁闭困难, 因而很难精确计算低动量迁移下物理过程中的强子矩阵元. 自然界的 6 种夸克中前 5 种夸克 (u, d, s, c, b) 只存在于强子束缚态内部, 而最重的顶夸克  $t$  产生以后寿命极短, 很快衰变为底夸克  $b$ . 跑动耦合常数  $g_s$  在动量转移  $Q^2$  变小时逐渐增大, 以致于达到无穷大, 由此可以定性地理理解为什么夸克在强子内部不能以自由状态分离出

来, 因为当 2 个夸克之间的距离增大时, 夸克之间交换胶子的能量  $Q^2$  变小, 跑动耦合常数变大, 以致于耦合强度变为无穷大, 这意味着夸克之间的相互作用随着分开的距离增加而增加, 使得夸克和胶子永远束缚在强子内部, 人们形象地称此物理现象为“夸克禁闭”. 这正像橡皮筋一样, 拉得愈长, 弹回的强度愈大, 永远束缚在一起. 物质结构在新层次下的物理图像与先前原子、原子核的层次完全不一样. 这表明支配下一层次的新的物理规律决定了新的物理图像和观念. 目前在量子色动力学框架里, 虽然定性地解释了夸克囚禁在强子内部的结构图像, 但是要想定量地解释夸克囚禁疑难和强子结构图像仍是高能物理中一个重大的难题. 格点规范理论正试图从量子色动力学理论最终解决夸克禁闭这一难题. 由于格点规范理论本质上是非微扰理论, 其理论方法不依赖于相互作用的强弱, 因此科学家们正努力获得强相互作用的全部解. 渐近自由和夸克禁闭是量子色动力学理论的两个重要特点. 由渐近自由性质决定的微扰量子色动力学理论是建立在微扰真空的基础上, 而量子色动力学物理真空完全不同于微扰真空. 自然界的真空不是一无所有的虚无, 而是充满物质场相互作用的最低能量态, 它可以有真空零点振荡、真空涨落 (如各种虚粒子的产生、湮灭和转化) 和真空凝聚 (如集体激发态的相干凝聚) 等. 真空性质的复杂性及其物理后果都充分表明了真空不空, 它对物理学发展产生了深刻的影响. 南部的对称性自发破缺理论就是基于对真空物质性的认识提出的. 物质与真空中的夸克、反夸克对和胶子不断发生相互作用构造出新的强子结构图像. 因此揭示真空的本质将导致夸克禁闭疑难的解决. 目前在美国的布鲁克海文 (Brookhaven) 实验室, 正在进行相对论重离子碰撞实验, 这个实验就是要从实验上揭示物理真空的性质. 该实验力图在极端条件下将夸克和胶子从质子和中子中解放出来, 形成夸克-胶子等离子体相, 也就是实现从夸克的禁闭相到退禁闭相的跃迁. 只有完全掌握了渐近自由和夸克禁闭这两个特点, 人们才能精确地计算涉及强相互作用的物理过程和强子谱, 因而得到从高能到低能所有能区的实验检验, 才能说对强相互作用有了深刻的理解.

### 3 电弱统一理论

19 世纪末, 麦克斯韦 (Maxwell) 成功地提出了电磁学理论, 将原来分开的电学和磁学统一起来, 预言了电磁波的存在, 并很快获得实验证实. 20 世纪,

电磁学规律已经对工业、农业、科学技术和军事产生了巨大的影响. 1967年, 温伯格(S. Weinberg)和萨拉姆(A. Salam)提出了电磁相互作用和弱相互作用统一理论<sup>[7]</sup>, 并预言了弱中性流的存在以及传递弱相互作用的中间玻色子的质量. 1983年1月和6月, 在欧洲核子研究中心(CERN)的超级质子同步加速器(SPS)上分别发现了带电的和中性的中间玻色子. 实验上测到的中间玻色子的质量与理论预言惊人地一致. 这一发现证实了弱电统一理论的成功, 其意义可以与麦克斯韦将电学和磁学统一起来的理论相比拟. 弱电统一理论与描述夸克之间强相互作用的量子色动力学理论合在一起统称为粒子物理学中的标准模型理论. 在标准模型中, 传递电磁相互作用的媒介子是光子( $\gamma$ ), 传递弱相互作用的是荷电中间玻色子( $W^+$ ,  $W^-$ )和中性中间玻色子( $Z$ ), 传递强相互作用的是8种胶子( $g$ ) (见表1). 夸克、轻子以及传递相互作用的媒介子就是物质世界的基本单元, 它们遵从的规律是标准模型理论.

表1 相互作用力类型和传递相互作用的媒介子

相互作用力类型	传递相互作用的媒介子
电磁相互作用	光子
弱相互作用	中间玻色子, $W^+$ , $W^-$ , $Z$
强相互作用	胶子

电磁相互作用和弱相互作用统一理论将电磁相互作用和弱相互作用统一在格拉肖(Glashow)早年提出的模型<sup>[8]</sup>中, 并预言了弱中性流的存在以及传递弱相互作用的中间玻色子的质量. 在弱电统一理论模型中, 电磁相互作用和弱相互作用分别通过传递光子和中间玻色子而发生, 它们可以用一种统一的量子规范场来描述, 这一规范场与相互作用的夸克和轻子遵从规范不变的内部对称性. 然而精确的规范不变性要求光子和中间玻色子是无质量的, 而传递弱相互作用的中间玻色子质量肯定不为零. 弱电统一理论模型引用了1960—1961年南部阳一郎提出的量子场论中对称性自发破缺机制<sup>[9]</sup>. 南部阳一郎首先认识到, 在某种相互作用形式下, 真空态可能不是唯一的, 可能存在多个最低能量态, 物理上称为简并真空态, 此时可能发生真空对称性自发破缺, 即物理真空只选取了多个简并真空的一个态. 在他的模型中, 引入了黑格斯(Higgs)场(标量场)的自作用形式, 以导致电弱对称性的自发破缺, 由此机制使得中间玻色子获得质量, 并得到实验证实.

对称性破缺最早是1956年李政道和杨振宁提出的宇称(左右)对称性在弱相互作用下破缺, 即宇称不守恒规律. 这就打破了人们在历史上一贯认为的对称

性守恒是物理学中基本规律的观念. 1964年, 人们在实验上首先从K介子系统中又发现宇称(P)和电荷共轭(C)的联合(CP)也是对称性破缺的. 人们逐渐认识到对称性和对称性破缺才是自然界中的基本规律. 日本科学家小林诚、益川敏英在1973年提出CP对称性破缺的起源并预言了自然界至少存在三代夸克<sup>[10]</sup>. 最近B介子工厂的实验证实了B介子中存在CP不守恒现象. 近年来, 关于中微子混合的实验结果也促使人们进一步探讨轻子系统中存在CP不守恒现象的可能性. 对称性自发破缺和CP对称性破缺还具有更深远的科学意义, 它提供了解释宇宙起源和今日宇宙存在的可能性. 宇宙大爆炸理论预言了早期宇宙很可能处于高度对称状态, 经过冷却和相变才变成今日之世界, 这就对应于一系列的对称性自发破缺过程.

在弱、电统一模型成功的同时预言了一种称为黑格斯粒子的中性标量粒子的存在. 迄今大量实验支持电弱统一理论中的 $SU(2) \times U(1)$ 规范作用部分, 但一直未找到黑格斯粒子, 目前实验确定黑格斯粒子的质量下限是115GeV. 这就成为近20年来粒子物理中的一个令人不解的谜——黑格斯粒子在哪里? 如果黑格斯粒子不存在, 那么对称性破缺的机制是什么? 在欧洲核子研究中心已开始运行的大型强子对撞机(LHC), 历时10多年的投资达几十亿美元, 其物理目标之一就是要回答对称性破缺的本质这一疑难.

在标准模型中, 不仅中间玻色子的质量是通过对称性破缺获得的, 而且夸克和轻子的质量也是通过引入黑格斯场汤川型耦合给出的. 然而轻子和夸克的质量谱从几电子伏特(eV)一直到180GeV ( $1\text{GeV} = 10^9\text{eV}$ ), 可以相差11个数量级, 即使同一层次的夸克也从几MeV到180GeV, 相差上万倍, 其质量的起源困扰着高能物理学家们. 这样宽广的质量谱很可能反映有更深层次的物质结构. 中微子质量不为零且很小, 它们的质量起源以及可能存在的CP破坏已成为粒子物理学家和天体物理学家们关注的热点问题.

引入基本黑格斯场给标准模型带来极大成功的同时也存在理论本身的缺陷. 这就是所谓的平庸性和不自然性问题. 若假定标准模型适用于整个能量范围, 则标准模型的高阶修正会使得黑格斯场的有效自作用强度实际为零, 这意味着不可能产生对称自发破缺. 这称为此理论的平庸性. 如果标准模型不能应用到整个能量区域, 而是在某个能标 $\Lambda$ 以下才适用, 一个自然的 $\Lambda$ 是引力变得重要时的普朗克能标, 则要求

标准模型的参量准确到 34 位数才能得到符合实验的 W 玻色子质量. 这种要求在物理学中是难以实现的, 这称为此理论的不自然性. 此外, 标准模型中有 19 个可调参量. 可见, 标准模型并不是基本理论而是更深层次(新能标)动力学规律下的有效理论.

前面介绍的夸克、轻子层次的量子色动力学和弱、电统一模型理论构成现阶段描述物质结构的标准模型理论. 标准模型理论是近半世纪以来探索物质结构研究的结晶, 是 20 世纪最重要的成就之一. 上世纪 70 年代到世纪末, 这一理论已经成功地经受了实验检验并继续发展. 这一成就可以与上世纪初的玻尔原子模型相比. 正是有了玻尔原子模型, 才有 20 世纪 20 年代末量子力学理论的建立. 可以相信, 标准模型理论的发展必将导致深层次新的动力学规律的发现和建立.

#### 4 深层次物质结构研究发展趋势

标准模型理论成功的同时也面临两大挑战: 对称性破缺的本质和夸克禁闭, 这意味着标准模型理论需要发展和突破. 关键的问题是实验. 深层次物质结构研究在新的 10 年中发展趋势有 3 点值得重视: (1) 大型强子对撞机(LHC)实验上的新发现; (2) 天文观测实验和其他非加速器实验室(空间、地下等)的新数据; (3) 密切注视低能精密实验中出现对标准模型理论的偏离. 这三方面的实验结果都可能会揭示出超出标准模型的新物理.

欧洲大强子对撞机(LHC)机器目前运行在束流为 3.5 TeV, 2014 年将达到设计能量 7 TeV, 人们期待着黑格斯粒子、超对称伴随子或更多新物理发现. 同时, 粒子物理学家也正在与宇宙学家和天体物理学家联手从天文观测和宇宙起源、演化中发展新观念和新理论. 近年来, 天文观测中给出宇宙中物质成分: 普通重子物质只占 4%, 而 23% 是非重子的暗物质, 73% 是暗能量. 暗能量是近年来宇宙学研究的一个里程碑性质的重大成果. 目前理论还不能揭示暗能量的真实本质, 科学家们试图用真空结构和真空能量来解释, 但目前的量子场论计算结果之差之太远, 受到了严重的挑战. 国际上包括我国科学家在内, 也在发展地下实验室和空间卫星物理实验, 并与天文观测相结合, 探讨自然界的奥秘.

过去的 30 年, 人们曾从理论上尝试了许多扩充和发展标准模型的新物理模型和理论. 它们大致可分为两类不同的途径. 一类是设想新物理的能标在 1 TeV 附

近. 例如保留标准模型的现有结构, 引入新对称性和新粒子来抵消黑格斯场所带来的缺陷. 弱电统一理论告诉我们, 弱相互作用和电磁相互作用在能量远高于中间玻色子质量时, 它们是统一的, 在低能时, 弱电对称性自发破缺表现出两种不同的相互作用. 人们很自然地要问, 当能量更高时, 弱电统一的相互作用与强相互作用是否会形成更大的统一理论? 超对称大统一理论就是一种尝试, 对称性破缺构成低能现实世界的不同类型的相互作用规律. 最流行的是最小超对称模型(MSSM). 此模型设想拉氏量具有超对称性(费米-玻色对称性), 因而每个现有的粒子都有一个与它自旋相差 1/2 的超对称伙伴; 并由黑格斯的超对称伙伴来抵消标准模型的缺陷. 目前实验上没有发现超对称伙伴, 所以超对称伙伴只能很重, 即超对称性是破缺的. 这样标准模型缺陷的抵消就不是完全的. 剩余缺陷必须小到不严重的程度此模型才可被接受. 这就要求模型的能标约为 1 TeV. 此外, 这理论中有 5 个可观的黑格斯粒子, 其中最轻的质量不超过 135 GeV. 超对称理论试图将夸克、轻子以及传递 4 种相互作用的媒介子统一起来描述, 虽然它具有很美丽的对称性形式, 然而由它预言的另一半是尚未发现的超对称伴随子(如粒子物理学家猜测超对称中的中性伴随子很可能是宇宙中的暗物质), 至今一个超对称伴随子也没有在实验中被发现, 这是走向 4 种相互作用统一理论面临的最大挑战. 另一类是 20 世纪 80 年代基于量子场论发展起来的超弦理论, 能标大大超过 TeV, 是在普朗克标度( $10^{19}$  GeV), 将物质粒子描述为弦的各种不同振动模式, 而量子引力可以自然地包含在超弦理论中. 引力相互作用存在于自然界的万物之中, 经典引力相互作用是由爱因斯坦的广义相对论来描述, 引力场方程联系了时间、空间和物质. 自 20 世纪 60 年代以来, 人们尝试建立量子引力理论都遇到了无穷大的困难, 通常量子场论中的重整化方法不能解决量子引力中出现的无穷大困难. 引力子是传递引力相互作用的媒介子, 它的自旋为 2, 质量为零. 引力场方程量子化的困难很可能不仅仅是数学上的困难, 而需要对时间、空间、物质和能量观念的更新. 弦理论提供了一个包含引力在内的 4 种相互作用的有量子理论. 近十多年来发展的 11 维时空中的 M 理论是以“对偶性”概念为核心对超弦的非微扰研究, 它自治地统一了 5 种超弦理论, 原来看起来基本结构很不相同的 5 种微扰弦理论是对偶的, 非微扰等价的. 值得注意的是, 超弦是在一个 10 维时空中的自治理论, 那么额外的 6 维时空与普通物质粒子的关系是什么? 一个普遍的看法是, 额外的 6 维时空紧致化

为普朗克标度的一个很小的空间,大大超出目前实验能量的范围,物质粒子实际所处的时空仍是4维时空.那么很自然地要问,这紧致化的额外时空对物质粒子在4维时空中运动产生的物理效应是什么?如何观察?超弦理论的研究工作,在力图深入了解夸克禁闭现象,建立正确的量子引力理论,统一4种基本相互作用和发展近代数学需求的刺激下,沿着非微扰及大范围性质的研究方向发展,取得了一系列重要进展.如1994年,Seiberg—Witten关于4维时空超对称规范场论模型的非微扰研究取得了突破性进展.他们充分应用对偶性及全纯性,证明了此模型具有禁闭性质,并对数学界四维流形微分结构的研究产生了极为轰动的影响.又如1996年,在M理论及D膜技术的基础上,成功地计算出了一类极端黑洞的熵,其结果与宏观上由热力学得出的著名的Bekenstein—Hawking熵结果一致,给出了黑洞物理学定量上一致的微观解释.近十多年来发展起来的额外维空间理论将能标降到了TeV量级.因此超弦理论的新发展可能会与早期宇宙联系起来,发展成为弦宇宙学,也有可能未来的高能加速器实验相结合,从而为超弦理论的发展展现出新的前景.

物理学毕竟是一门实验科学,只有经过实验检验的理论才是正确的理论.粒子物理学是研究小到物质最深层结构,大到宇宙的最前沿科学;是揭示时间、空间、物质和能量本质的新理论,它也必然会在新的

实验结果推动下得到发展.粒子物理学对物质结构的探索,从低能量加速器到高能加速器以及理论上追求不同能量标度的大统一理论,正是与宇宙演化过程反向的,两者探讨的物理相联接,粒子物理与宇宙学的交叉也是必然的.21世纪20年代,人们将密切关注欧洲大强子对撞机实验结果、天文观测装置以及非加速器(空间、地下)实验室的新进展,注重粒子物理学、天文学和宇宙学交叉发展并联手解决面临的难题,最终揭示超出标准模型的新物理规律.

### 参考文献

- [1] Gell-Mann M. Phys. Rev. ,1962,125:1067; Phys. Lett. ,1964, 8:214; Zweig G. CERN-TH-412,1964,401
- [2] Aubert J J *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1974,33:1404; Augustin J E *et al.* (SLAC-SP-017 Collaboration), Phys. Rev. Lett. , 1974,33:1404
- [3] Herb S W *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1977,39:252
- [4] Abe F *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1995,74:2626; Abachi S *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1995,74:2632
- [5] Gell-Mann M. Acta Phys. Austriaca Suppl. 9, 1972, 733; Fritzsche H, Gell-Mann M. Proc. XVI Int. on High Energy Physics (eds Jackson J D, Roberts A), Fermilab, 1972, 2:135
- [6] Gross D J, Wilczek F. Phys. Rev. Lett. , 1973, 30: 1343; Politzer H D. Phys. Rev. Lett. ,1973,30:1346
- [7] Weinberg S. Phys. Rev. Lett. ,1967,19:1264; Salam A. In: Elementary Particle Theory (Ed. Svartholm N). Almqvist and Forlag, Stockholm, 1968
- [8] Glashow S. Nucl. Phys. ,1961,22:579
- [9] Nambu Y. Phys. Rev. ,1960,117:648; Nambu Y, Jona-Lasinio G. Phys. Rev. ,1961,124:246
- [10] Kobayashi M, Maskawa T. Prog. Theor. Phys. ,1973,49:634