

# 标准模型及其扩充

刘 耀 阳

(中国科学技术大学近代物理系 合肥 230026)

江 向 东

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

不论是刀耕火种的远古,还是星际遨游的现代,人类总是以无限的激情和不尽的欲望来从事所有可能的智力活动.而智力活动的方式,却是人类根据不同时期所能感悟到的物质的尺度而刻意选取的.因此,物质的尺度可以用来衡量人类在各个时期的智力水平.

不论在大的尺度还是在小的尺度上,现代科学技术的成就都使我们登临崭新的境界.

在大尺度上,莫过于宇宙,或说总星系.它含有上千亿个星系,我们熟悉的银河系只是其中一个不算大的星系.如果把宇宙看作一个大球,其半径则在 100 亿光年以上.

在小尺度上,莫过于“基本”粒子,或者说夸克和轻子.如今的高能物理实验装置,在  $10^{-17}\text{cm}$  的尺度上,仍未探测到它们的大小,可见它们的尺度之小.

关于宇宙的演化问题和物质的结构问题,原本以为是两个互不相干的研究课题.而当人类感悟到的物质尺度,大的如此之大,小的如此之小时,却发现大与小之间有着密切的联系.宇宙学可以借助粒子物理理论来解释宇宙现象,而粒子物理学则可以把广漠的天宇作为天

然实验室.对此,这里谈谈目前已被广泛接受的观点和正在进行研究的最新情况.

## 一、基本粒子的标准模型

目前被广泛接受的理论模型有两个.一个叫作基本粒子的标准模型,是关于微观世界的;一个叫作宇宙论的标准模型,是关于整个宇宙演化的.我们将会看到,它们之间是如何联系的.

首先来介绍基本粒子的标准模型.实验上发现了许多粒子,总数有数百种,质量从零到上百 GeV,寿命从稳定到 10 的负数十次方秒.人们于是对它们进行分类研究,发现它们有的参与强相互作用,如质子、中子、 $\pi$  介子、K 介子;有的不参与强作用,如电子、 $\mu$  子、 $\tau$  子;有的只参与弱相互作用,如中微子.所有的粒子都参与引力作用.标准模型假定这么多粒子只是由少数几种东西构成的,它们中一些是我们熟悉的电子 e 和电子型中微子  $\nu_e$ ,  $\mu$  子和  $\mu$  子型中微子  $\nu_\mu$ ,  $\tau$  子和  $\tau$  子型中微子  $\nu_\tau$ . 另一些又分 3 类,每类有 3 个,共 9 个,它们是 3 个红色的夸克、3 个黄色的夸克和 3 个蓝色的夸克,自旋都为  $1/2$ . 关于它们的运动,标准模型引入了所

谓规范粒子,它们是  $\gamma$  光子、 $Z^0$  和  $W^\pm$  粒子,以及 8 种颜色的胶子,自然还有引力子,我们也把它归入规范粒子,由它们分别传递 4 种相互作用.研究表明,这样还不足以建立一个合理的理论,我们还需要引入一个奇特的

表 1 3代粒子及其基本性质

	$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_{R,Y,B}$	$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_{R,Y,B}$	$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}_{R,Y,B}$
$s$	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
$Q(e)$	$\begin{pmatrix} 0 \\ -1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 2/3 \\ -1/3 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ -1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 2/3 \\ -1/3 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ -1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 2/3 \\ -1/3 \end{pmatrix}$
$I_3$	$\begin{pmatrix} 1/2 \\ -1/2 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1/2 \\ -1/2 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1/2 \\ -1/2 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1/2 \\ -1/2 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1/2 \\ -1/2 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1/2 \\ -1/2 \end{pmatrix}$
$m(\text{MeV})$	$\begin{pmatrix} 0 \\ 0.5 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 4 \\ 10 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ 105 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1300 \\ 200 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ 1800 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 175000 \\ 4300 \end{pmatrix}$

所谓希格斯粒子,它均匀地布满整个空间,所谓真空或能量的最低态实际上就是这样—个特别的世界.希格斯粒子也参与粒子间力的传递,并负责给所有的粒子提供质量.表1中列出所有这些粒子和它们的基本性质.理论上说,标准模型是由一个叫做 $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ 的具有真空自发破缺的规范理论所描述的.所谓真空自发破缺,即希格斯粒子均匀地分布于整个空间,就像在磁学中所见到的自发磁化那样,能量的最小值不是原子的无序状态而是一个有序的状态.

从表1中可以看出,这些费米子明显地分为基本上相同的3组,我们叫它们为3代.每一代包括一对轻子,3对不同颜色的夸克.夸克参与 $SU(3)_C$ 规范粒子即胶子传递的强作用,轻子只参与 $SU(2)_L \times U(1)_Y$ 规范粒子 $\gamma$ 和 $Z^0, W^\pm$ 传递的电磁作用和弱作用.表2列出了规范粒子和希格斯粒子的属性.标准模型假定,除轻子、规范粒子和希格斯粒子之外,所有观察到的粒子均系夸克的束缚态.这点极为成功,因而被广泛接受.实验检验证明,这样处理,数百种基本粒子就减少到了39个,由它们构成整个宇宙.

表2 规范粒子和希格斯粒子的属性

	$\gamma$	$Z^0$	$W^\pm$	g	引力子	H
s	1	1	1	1	2	0
Q	0	0	$\pm 1$	0	0	0
m(GeV)	0	91	81	未直接测到	未测到	未测到

## 二、宇宙论的标准模型及其对粒子物理的要求

除了基本粒子的标准模型,我们还有建立在宇宙学原理和爱因斯坦场方程基础上的宇宙论标准模型.这个模型说,我们的宇宙从一个大爆炸开始,从最初到大约 $10^{-43}$ 秒或 $10^{19}$ GeV(即 $10^{32}$ K)温度时,引力或引力子起主导作用.宇宙在爱因斯坦引力理论的支配下膨胀并降温.大约在 $10^{-6}$ 秒或 $10^{-1}$ GeV(即 $10^{12}$ K)温度时,夸克转化为强子即中子、质子、 $\pi$ 介子等.大约在 $10^2$ 秒或 $10^{-4}$ GeV(即 $10^9$ K)时,氦核和 $^4\text{He}$ 形成,然后是原子、分子形成,银河系形成

等.今天观测到的微波辐射背景和宇宙中 $^4\text{He}$ 的丰度与该理论符合,使许多人相信这个理论可能是合理的.宇宙论研究表明,中微子的种类 $\leq 4$ ,所以代的数目顶多是4.另外轻中微子质量总和应小于100eV,而重中微子质量应大于2GeV,这些为粒子物理研究提供了判据.由于天文观测没有发现任何反物质的星体,也没有发现星际物质中存在反粒子(最近报道了1例,见本期科苑快讯),这同大爆炸理论设想的宇宙初始时粒子与反粒子数目相等相矛盾,于是宇宙论要求粒子物理提供一个重子数不守恒的理论,即存在一个机制,使初始时刻,粒子反粒子数目相等,由于重子数不守恒,才使得我们今天的宇宙中只有正粒子而极少有反粒子.这里需要3个条件:一个是非平衡存在,这是宇宙论本身的;一个是CP不守恒,这在标准模型中已经具备;一个是重子数不守恒,这条在标准模型里不能满足.于是,粒子物理学家提出了SU(5)大统一理论.粗略地说,根据这一理论,表1中代的分类基本保持不变,但表2中的规范粒子要增加带色的和带分数电荷的矢量粒子 $X_R^{\pm 4/3}, X_Y^{\pm 4/3}, X_B^{\pm 4/3}, Y_R^{\pm 1/3}, Y_Y^{\pm 1/3}$

和 $Y_B^{\pm 1/3}$ ,还有28个希格斯粒子,带电的和不带电的、有色的和无色的,使基本粒子总数达70多个,也使事情变得十分复杂.大统一理论预言的通过X、Y粒子交换产生重子数不守恒的过程,正是宇宙论所需要的,但

要满足实验上质子寿命大于 $10^{31}$ 年,曾要求X、Y粒子的质量约为 $10^{15}$ GeV,仍有一系列困难.

理论的另一发展是所谓超对称理论,或叫作玻色子与费米子对称理论.自从爱因斯坦第一次在他的狭义相对论中把对称的考虑引入物理学后,相继有一系列的工作讨论对称性问题,并皆取得巨大成功.于是有人想到把玻色子与费米子的对称性作为一个要求引入物理学.从表1和表2都可发现,玻色子与费米子处于不对称的地位.把玻色子和费米子对称的这个要求放入标准模型,就叫作超对称的标准模型.

那样的话,在表 1 和表 2 中,每个粒子就都存在与之相对应的伙伴,只是自旋相差  $1/2$ . 于是有自旋为零的夸克和轻子,有自旋为  $1/2$  的规范粒子和希格斯粒子,并有自旋为  $3/2$  的引力子. 粗略的估计总基本粒子数增加到 80 个. 把玻色子费米子对称放入大统一模型,就得到所谓超对称大统一理论. 同样地,粒子数目都加倍,即加上每个原有粒子相应的超对称伙伴,粒子的总数增加到大约 150 个. 超对称理论可以解决一个叫作重整化的微调问题或叫规范等级问题. 在所有非超对称的自发破缺理论中,希格斯场都是一个古怪的东西,各种粒子的质量全靠它产生. 这种质量产生机制,我们到今天还找不到一个比它更好的东西来替代它. 另一方面,希格斯场又十分诡秘,它所引起的发散是平方型的,这使得理论的精确度或有效数字要达到  $10^{-26}$  或更高,这种要求显然不合理. 而一个超对称的理论,因同时存在着粒子和粒子的伙伴,故使得标量场的平方型发散互相抵消而降为对数型发散,这样就解决了微调问题,使理论计算成为可能. 几年前人们对超对称理论做了大量研究,特别是超对称大统一,并声称,他们可以解决质子寿命问题,而且整个理论只有极少的甚至于一个常数,这当然比标准模型的 19 个好多了. 因为超对称大统一较之标准模型有如上所述的长处,所以倍受人们的重视.

### 三. 新的挑战 and 手征扩充

基于解释强子结构的夸克模型和相互作用的规范原理而建立的粒子物理的标准模型,在描述强、弱和电磁这 3 种基本的相互作用方面取得了很大的成功,经受住了将近 30 年来的所有实验的检验. 然而在最近 2 年,发现有 2 个例外,一个是所谓  $R_c$ 、 $R_b$  问题,另一个是德国汉堡的意外实验结果.  $R_c$ 、 $R_b$  问题是指  $Z^0$  衰变到  $c$  粒子对和  $b$  粒子对的比率,实验结果显示的与标准模型预言的有显著分歧. 即使在大统一理论中引入超对称性,把  $R_c$ 、 $R_b$  问题归结为重整化效应,这种努力看来也不能成功地解释实验. 尽管有人对  $R_c$ 、 $R_b$  实验的可靠性表示怀疑,可是 1996 年西欧中心 (CERN) 的 4 个实验组再次

确认了他们的实验是可靠的.

德国汉堡的意外实验结果,指的是在 HERA 对撞机上的 2 个实验组观测到的意外物理信号.

德国汉堡的高能物理实验室 (简称 DESY, 这本是德国电子同步加速器的简称), 1997 年 2 月 19 日举行了一次非同寻常的学术讨论会. 在德国电子-质子对撞机 (HERA) 上工作的两个国际协作组 H1 和 ZEUS, 在会上宣布了超出标准模型预期的实验结果, 引起了“轻子夸克”的猜测.

这两个国际协作组 H1 和 ZEUS, 各自独立地分析了自 1994 年以来在 HERA 上做高能非弹性散射实验所积累的资料. 3 年来, 在 HERA 上是用 27.5 GeV 的正电子同 820 GeV 的质子顶头碰撞. 所观测的事例具有深度非弹性散射的典型特征: 正电子与质子内部的部分子碰撞后以大角度散射开; 而受到撞击的部分子则生成一个高能量的强子喷注. 这两个组都用蒙特卡罗算法在标准模型里对这种中性流深度非弹性散射的测量值, 做了计算和比较. 正是这种深度非弹性散射过程, 曾在 20 年前就为我们提供了质子内部存在硬的点状夸克的第一个直接证据.

这两个实验组都发现, 在以前未曾研究过的运动学区域, 在 HERA 上对这种散射测得的事例数超出了标准模型的预期值. 实验者对每个事例是测量这样的 3 个量: 动量转移的平方即  $Q^2$ , 散射角, 以及正电子-夸克系统的质量  $m$ . 根据标准模型, 已经算出了在深度非弹性散射过程中这 3 个变量的预期分布. 在已作过充分检验的参数范围内, 这些预期分布都与实验数据符合得很好. 然而, 在非常高的  $Q^2$  和很大的  $m$  值时, 两个协作组都观测到了过多的事例. ZEUS 组测到了 5 个事例, 而预期数只有 1 个; H1 组测到了 12 个, 而预期数仅为 4.71 个.

H1 组有大约 400 人, 来自 12 个国家; ZEUS 组约有 430 人, 也来自与 H1 组不完全相同的 12 个国家.

这两个组的物理学家们出于谨慎, 只宣布了观测到的现象, 而没有确定他们的发现究竟是什么. 他们期待在 1997 年 3~10 月提高亮度后取得的资料能澄清这个问题, 即现已观测

到的效应到底是统计涨落,还是新物理的信号?

虽然正式的宣布没有明确说这些实验结果意味着什么,但仍有一些人认为这是一种“轻子夸克(Leptonquark)”的征兆.这种“轻子夸克”,具有轻子和夸克的双重特性或说双重量子数.

近期,为解决这些新问题,粒子物理学家提出了种种不同于超对称大统一的理论模型.

在  $R_c, R_b$  问题提出之前的 1994 年,我们曾提出过一个理论,叫做标准模型的手征扩充及其超对称化.后来,我们想到用它来理解  $R_c, R_b$  问题.研究证明,  $R_c, R_b$  问题的确可在我们的理论框架中解决,但要确认该理论,尚须做进一步的实验检验.也许某些实验如  $\tau$  的米歇尔(Michel)参数测量将来可以在北京谱仪上进行.1982年,我们在一篇文章中提出一个问题,即用有什么说服力或可靠的方法来建立理论或寻找物理定律.那时提出一个观点,即自由粒子运动是基本的,在经典力学中,力和自由粒子运动之间无法建立联系,但在量子力学中,我们可以发现一个自由粒子体系,其自洽性能自然地导致规范理论.自那之后,我们尝试了最一般的自由粒子运动,导出了爱因斯坦理论,但在引力的量子化问题上,并没有获得任何进展.于是从 1994 年起,我们着手内部对称性的研究,一个最一般的情况应当是具有质量的自由粒子体系,而零质量体系可视为其特例.在做了某些关于质量的假定后,这个自由粒子体系自身便要求给出一个手征扩充的标准模型,就是说不仅存在着标准模型中的左手二重态和 2 个右手单态,而且还存在着右手二重态和 2 个左手单态.这种状况,通常叫作镜像对称.现在要问那些新出现的粒子是什么,尤其是把该理论超对称化后,3 代的理论中将不复存在渐

近自由性质,这是一个新特性.正是利用这个特性,我们认为这些新粒子是构成轻子的夸克.然而在这个手征扩充的理论中有着许多自由参数,它们主要来自二次项的质量矩阵,所以较之标准模型多出 48 个参数,从美学的角度来看是难以接受的.这些参数中,有 9 个是有物理意义的自由粒子的质量,其余的 39 个反映出理论的不确定性.最近我们证明,这种不确定性正好可以通过自发破缺的汤川耦合的不确定性相抵消.这样一来,该理论便是完全确定的.表 3 列出了在该理论中出现的粒子及其属性.

经过真空自发破缺,则在两类夸克之间产生混合,广义上既存在带电的味改变的流,也存在中性味改变的流.这种新的味改变的流引起重子数不守恒.质子衰变产生于交换 3 个  $W, Z$  的高阶过程,定性地可说明质子因何稳定.应用这个理论讨论  $R_c, R_b$  问题,它们实质上是中性味改变的流的效应,加上其他实验可以把混合角定出来.若第 1 代没有类似  $R_c, R_b$  那样的问题,则混合角为零,不可能发生  $P \rightarrow e^+ (\nu_e) \pi^0 (\pi^0)$  的过程.由  $R_c$  定出第 2 代只有 1 个混合角,则质子衰变主要是通过交换 3 个  $Z^0$  来进行.如果真如不少人的看法,  $R_c$  的实验不可靠的话,则质子衰变主要是通过  $P \rightarrow \bar{\nu}_\tau \pi^+$ , 因为  $P \rightarrow \tau^+ \pi^0$  是能量禁戒的,前者只能通过交换 3 个  $W$ . 由于有 KM 矩阵的压低,所以质子的寿命很长.

总之,可以说标准模型是一个很好的理论,唯一需要实验证实的是希格斯粒子的存在.现在实验表明它的质量在 60GeV 以上,寻找希格斯粒子是即将建造的大型强子对撞机(LHC)的主要目的之一.由理论引进的超对称粒子,至今还没有实验证据,这也是 LHC 的主要任务.轻子有无结构以及夸克有无结构,这些也都是目前所关注的问题.上述新的挑战目前为大家所密切关注,因为这是迄今似乎有确实证据说明标准模型需要改进的问题.我们相信,如果它们最后被实验所证实,则必将对高能物理以及我们关于物质结构的认识产生巨大的影响.

表 3 手征扩充后的粒子及其属性

	$L_L \equiv \begin{pmatrix} u_{hL} \\ d_{hL} \end{pmatrix}$	$u_{hR}$	$d_{hR}$	$L_L \equiv \begin{pmatrix} u_{hL} \\ d_{hL} \end{pmatrix}$	$d_{hR}$	$u_{hR}$	$R'_i \equiv \begin{pmatrix} d_{iR}^c \\ -u_{iR}^c \end{pmatrix}$	$d_{iL}^c$	$u_{iL}^c$
SU(3)	3	3	3	$3^*$	$3^*$	$3^*$	3	3	3
SU(2)	2	1	1	2	1	1	2	1	1
Y	1/3	4/3	-2/3	-1/3	-4/3	2/3	1/3	4/3	-2/3
Q	$\begin{pmatrix} 2/3 \\ -1/3 \end{pmatrix}$	2/3	-1/3	$\begin{pmatrix} 1/3 \\ -2/3 \end{pmatrix}$	-2/3	1/3	$\begin{pmatrix} 2/3 \\ -1/3 \end{pmatrix}$	2/3	-1/3