

在基本粒子家族中,有些粒子只参与电磁相互作用和弱相互作用,不参与强相互作用,这些粒子称为轻子;那些参与强相互作用的粒子,称为强子。基本粒子家族中绝大部分粒子都属于强子族。

轻子族目前只发现了几种,加上它们的反粒子也只有十种,这就是 e^- 、 ν_e 、 μ^- 、 ν_μ 、 τ^- 和它们的反粒子 e^+ 、 $\bar{\nu}_e$ 、 μ^+ 、 $\bar{\nu}_\mu$ 、 τ^+ 。有迹象表明可能存在重轻子 τ 型的中微子 ν_τ 和反中微子 $\bar{\nu}_\tau$ 。自 1897 年发现轻子族中第一个成员电子 e^- 以后,到 1935 年发现 μ 子,中间经三十八年,重轻子 τ 是 1975 年才发现的,这就是说每一种类型的轻子的发现差不多相隔四十年,可见发现轻子的进展很缓慢。所以,有时也称各种不同类型的轻子为不同代的轻子。可以将这些轻子列成下面的表。

大家知道,长时间内,人们在探讨 $e-\mu$ 之谜。电子和 μ 子的许多性质非常相似,仅是质量不同, $m_e = (0.511004 \pm 0.000002) \text{ MeV}$, $m_\mu = (105.6594 \pm 0.0004) \text{ MeV}$, 两者相差二百倍。究竟什么原因使得电子和 μ 子质量相差这样大,而两个粒子的其他性质都如此相似。几十年来,这已成为轻子族的一个疑难问题。现在又发现了重轻子 τ , 它的性质与电子、 μ 子也相似,然而它的质量更重,差不多是电子的三千六百倍, $m_\tau = (1807 \pm 20) \text{ MeV}$ 。于是 $e-\mu$ 之谜扩大为 $e-\mu-\tau$ 之谜,从而促进了对轻子谱的研究。

电子轻子数 L_e	1	$e^- \quad \nu_e$	第一代轻子 $n=0$
	-1	$e^+ \quad \bar{\nu}_e$	
μ 子轻子数 L_μ	1	$\mu^- \quad \nu_\mu$	第二代轻子 $n=1$
	-1	$\mu^+ \quad \bar{\nu}_\mu$	
τ 轻子数 L_τ	1	$\tau^- \quad (\nu_\tau?)$	第三代轻子 $n=2$
	-1	$\tau^+ \quad (\bar{\nu}_\tau?)$	

关于电子和 μ 子的质量,人们曾用一个近似的经验公式来表示:

$$m_e = \frac{2}{3} \alpha m_\mu$$

其中 α 是精细结构常数,这个经验公式准确到 1% 以内。这里可以建议另一个经验公式

$$m_\mu = \frac{2}{3} \sqrt{\alpha} m_\tau$$

来符合 τ 轻子的质量,准确到 3%。如果引入一个量子数 n (轻子的代数),外推此经验公式,

$$m_{n-1} = \frac{2}{3} \alpha^{1/n} m_n \quad n = 1, 2, \dots$$

$$m_0 = m_e, m_1 = m_\mu, m_2 = m_\tau, m_3, \dots$$

可以估计出下一代重轻子的质量 $m_3 \approx 14 \text{ GeV}$ 。(当然这种外推方式并不只是这一种,也可能按照 $m_2 = \frac{2}{3} \alpha^{1/4} m_3$, 这时 $m_3 \approx 9.5 \text{ GeV}$)。这种外推的正确性只能由实验来判断。

近年来,由于重轻子 τ 的发现,人们正在深入探讨轻子到底有多少种? 如果有下一代轻子,它的质量是多大? 轻子族的质量谱反映了轻子内部什么样的特点、性质和规律性? 这些问题都提到粒子物理研究的日程上来了。

近几年来,人们并不孤立地研究轻子,而是将轻子与层子联系起来,找出它们的共同性。1967—1968 年温伯格-萨拉姆提出了弱相互作用、电磁相互作用统一模型理论,使得光子、轻子、层子在电磁相互作用和弱相互作用范围内得到统一的描述,揭示了它们之间可能存在的内在联系。这个模型得到了好几个实验的支持,由此,人们进一步探讨轻子和层子之间的对称性,提出各种模型,描述电磁相互作用、弱相互作用、强相互作用的统一理论,甚至,探讨引力相互作用、电磁相互作用、弱相互作用、强相互作用四种力的统一理论。

十多年来,人们逐渐相信强子是具有内部结构的,可能是由层子构成的,然而,对于层子,有各种各样的猜测。现在普遍地推测可能存在五种以上的层子, u, d, s, c, b, \dots 。 u, d 层子和它们的反层子构成 π 介子、 ρ 介子、质子、中子、等, ϕ 介子是由奇异层子 s 和反奇异层子 \bar{s} 构成的, J/ψ 粒子是粲层子 c 和反粲层子 \bar{c} 构成的, Υ 粒子是由 b 层子和反层子 \bar{b} 构成的。

历史上,继五十年代坂田模型提出基础粒子是 p, n, A 以后,曾有不少人在轻子 ν, e, μ 与 p, n, A 之间寻找某种对称性,并没有取得成功。现在,在弱电统一理论的基础上人们发现对应于六种轻子:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}$$

相应地可能存在六种层子:

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

有了这种对称性还可消去在理论上引起困难的 Adler 反常。 ν_τ 是对应于重轻子 τ 的中微子,实验上已有迹象表明它可能存在。由这种对称性推测 t 层子的电荷可能是 $2/3$, 质量要比 b 层子重,可以预期实验上将发现比 Υ 介子还要重的矢量介子存在,这个矢量介子是由 t 层子和反层子 \bar{t} 构成的。通常将 u, d, s, c, b, t 称为层子的味。

层子除了具有味自由度以外,还具有色自由度。每

轻子 和 层子

黄涛

种味道的层子具有红、蓝、黄三种颜色。这样,根据已有的实验,推测层子至少有十五种,计及它们的反层子,共三十种之多。对于层子的质量也有很多推测,推测的方法不同,数值上不同。大体上, u 、 d 层子是最轻的,奇异层子、粲层子、 b 层子,一个比一个重,形成一个层子谱。目前、国内外都有人在探讨层子的内部结构,提出组成层子的成份是亚层子(Sub-straton)、亚夸克(Sub-quark)、前夸克(Pre-quark)、前子(Preon)等。总之,既然推测有这么多种层子存在,那么层子到底有多少种?层子谱反映了层子的什么样的结构和性质?它们反映了什么样的规律性?这些问题也开始提到日程上来了。

人们根据大量实验事实推断强子是由层子构成的。那么层子是如何结合成强子的。实验上未发现自由层子,到底是意味着层子只能禁闭在强子内部,还是目前能量范围内近似禁闭?有没有胶子存在?胶子是不是规范场的量子,它的作用是什么?有没有 Higgs 粒子存在?真空结构对强子结构的影响是什么?等等这些问题有待未来的实验来回答。新的实验很可能将对旧理论提出严重的挑战,孕育着物理学中的新观念。

人类对物质结构的认识从原子到原子核,到“基本”粒子,以至目前层子、轻子这些基本的费米子,是否意味着进入了一个新的层次?在这个新层次里可能会出现新的特点和物理规律,这也可能是粒子物理研究的一个新阶段的开始。国内外一些科学家正以极大的兴趣探讨其中的奥秘,可以预期,关于轻子和层子的研究很可能产生非常有兴趣的结果。