

对称性

当前粒子物理中的一个重要研究课题

吴 济 民

粒子物理学的主要研究课题有两个方面：1) 比核子更深入一个层次的物质结构，2) 粒子之间的相互作用和运动转化规律。在这里，我们就物质结构更深一个层次的一个新研究课题——轻子、夸克对称性——作一个简单的介绍。

轻子与夸克

先谈谈轻子。第一个发现的轻子是人所共知的电子，是在 1897 年被发现的。它现在已经被广泛地应用在生产、生活的各个方面，可是我们对它本身内在性质的认识却很少。1936 年，人们从宇宙线中又发现了 μ 子。它的性质和电子几乎一样，只不过质量不同而已。由于它们都比 π 介子轻，所以统称为轻子。它们都只参与弱作用与电磁作用，不参与强作用。1975 年，人们又在 e^+e^- 对撞机实验中找到了第三种带电的轻子：重轻子 τ 。它和电子、 μ 子一样，也只参与弱作用和电磁作用，但是它的质量竟重达 $1784 \text{ MeV}/c^2$ 。已经发现的这三种轻子，个性都差不多，但是一个比一个重得出奇，它们的质量之比约为 $1:206:3500$ 。人们至今未能对自然界的这种安排给出一个科学的说明。此外，还发现对应于电子、 μ 子各有一种中微子，分别记作 ν_e, ν_μ ，（估计相应于 τ 重轻子也有一种相应的中微子 ν_τ ）它们只参与弱作用。这就是目前所知道的轻子类。

那么“夸克”又是怎么回事呢？六十年代初期，人们把当时已经发现的一二百种强子分类，发现可以把它们排在 $SU(3)$ 群所提供的某些表格之中，就像化学元素被排在周期表的各个空格中一样，而且还准确地预言了新的强子 Ω^- 。这种分类方法揭示了自然界的一个微妙的对称性质。但是，美中不足的是，在一个比较基本的表格中，始终有三个位置空着，找不到合适的粒子填充进去。于是有人设想，还应当有三种粒子，它们填在这三个空位子上，被称为“夸克”。究竟客观上存在不存在这种假设的粒子呢？实验学家纷纷用各种方法来寻找它们。说也奇怪，这些实验一个接着一个地给出了否定的结果，但是间接支持“夸克”存在的客观事实却越来越有说服力。这些事实使人们接受了一种

看法：夸克是存在的，但由于很强的束缚力，它不可能从核子中被打出来。

另外也有人认为，即使夸克本身并不存在，但至少 $SU(3)$ 表格反映了物质结构的某个侧面，通过在这个途径上的研究可以把核子内部的结构和相互作用的真实情况弄清楚。

当然，也不是所有的人都接受夸克的观念的，一个突出的例子就是海森伯的观点。这位老先生认为只要找到关于核子内部新的运动规律的基本方程，问题就解决了，说核子内部有什么组成或下一层次的东西是没有意义的。这也是一家之言，但是过于片面了。历史的发展说明，人们是先知道有电子、原子核，然后才建立了量子力学，而不是相反。

到现在为止，我们虽然还没有得到自由的夸克，但是夸克的各种效应已经被测量到了，在这个意义上也可以说，这些夸克已被“找到”了。例如，从中子、质子的性质可推断有 u, d 夸克，电荷分别为 $2e/3$ 和 $-e/3$ 。从奇异粒子的性质可推断有 s 夸克，电荷 $-e/3$ 。从 J/ψ 家族知道有 c 夸克，电荷 $2e/3$ 。从 Υ 家族知道有 b 夸克，电荷 $-e/3$ 。预计在稍高的能量下还可能有 t 夸克，电荷 $2e/3$ 。（我们有时把不同种类的夸克称为夸克的不同“味道”。）

什么是轻子、夸克对称性？

在目前的加速器能量范围内，轻子与夸克都是自旋 $\hbar/2$ 的点粒子，显示不出它们的内部结构。但是强子却表现出是由夸克所组成的。这表明轻子与夸克可能是同一个层次上的东西。那么，现在已经在轻子、夸克之间显示了哪些联系了呢？

如果我们把带电轻子 (e, μ, τ) 和夸克按照它们的质量大小排个队，就看到它们可以分成三个组（也称为三“代”或三个“家族”）：

第一代： $\nu_e, e(0.51), u(4.2), d(7.5)$

第二代： $\nu_\mu, \mu(105), c(1150), s(150)$

第三代： $\nu_\tau, \tau(1784), t(>8000), b(4400)$ 。

虽然到目前为止，第三代中 ν_τ 和 t 夸克尚未发现，补上这个空缺还是容易被接受的。这样很快就看出，这

几代的组成情况是相仿的：在每一代里都有一个中微子、一个带电轻子、一个 $2e/3$ 电荷的夸克、一个 $-e/3$ 电荷的夸克。长期以来人们总以为中微子质量可能为零，似乎它的地位有些特殊，因为在费米子（轻子、夸克）中唯独它没有静止质量。最近的实验似乎表明了 ν_e 的静止质量不为零（这也使人们倾向于认为 ν_μ 、 ν_τ 也有静止质量）。这就更加深了轻子-夸克的对称印象，即在每一代里，粒子都有静止质量，但也总是轻子质量小于相应的夸克质量。在各代之间，相应的粒子也总是越来越重，这就是：

$$m_e < m_\mu < m_\tau$$

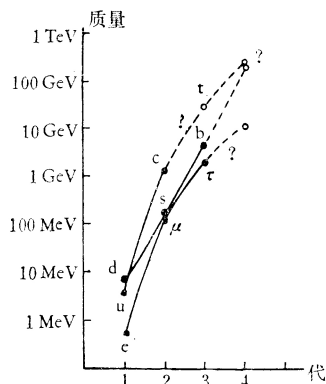
$$m_u < m_c < m_t$$

$$m_d < m_s < m_b$$

另外似乎还近似地存在如下比例关系：

$$m_d/m_s \simeq m_u/m_b, \quad m_e/m_\mu \simeq m_\mu/m_\tau.$$

有人把它们的质量按各代的次序画在同一张图上，再



把电荷相同的粒子用曲线联起来，请看，这几条曲线又显示了大同小异的走向。（左图）

初步看到的这些对称性质使人相信，这不是偶然的。在微观世界里，质量是一个十分重要的物理量。当初人们把各种化学元素

按原子量排队，最后导致发现了元素周期表；在研究强子按 SU_3 群分类时，强子的质量也是一个十分重要的物理量。现在，在轻子-夸克质量之间又显示出来一种规律性，当然引起人们的浓厚兴趣。

不仅如此，从弱作用的研究中也可以找到它们之间的一些对称性质。

以 e 、 ν_e 为例，在弱相互作用过程中， e^- 和 ν_e 之间可以通过吸收或放出 $W^\pm$ 相互转化：

$$e^- \longrightarrow \nu_e + W^-$$

$$\nu_e \longrightarrow e^- + W^+$$

μ 、 e_μ 之间也有同样的转化性质。与此相仿，把电荷 $-e/3$ 的夸克作一个线性组合之后，

$$d, s, b \longrightarrow d', s', b'$$

（这些线性组合导致产生了相应的几个“弱混合角”参数）也可出现， d' 、 u 之间（它们电荷相差一个 e ） s' 、 c 之间（它们之间电荷也相差一个 e ）也有同样的弱作用转化性质。人们还估计在 b' 、 t 之间， τ 、 ν_τ 之间也有同样的弱作用转化性质。这样，全体轻子、夸克又一次

显示了它们的对称性质。

此外，弱作用还显示出轻子与夸克之间的一些更复杂的对称性质。例如：各代费米子的弱过程主要发生在同一代之内。这里就不多说了。

目前的理论能够正确地说明这些对称性质吗？弱电统一理论能够说明轻子与夸克在弱作用方面的对称性质。但是，至今还没有一个理论能很好地解释轻子和夸克的质量问题，“代”的形成，等等。

关于弱电统一理论

统一描述弱作用和电磁作用的弱电统一理论很好地预言了弱中性流现象，很好地解释了到目前为止的各种弱作用、电磁作用现象，取得了很大成功。它的成功说明了规范不变性可能是自然界一切相互作用理论所应当遵循的一个基本原则。在物理上说就是，费米子之间的各种相互作用都是通过在它们之间传递各种规范粒子而实现的。但是弱电统一理论本身尚存在不足之处。它要求自然界存在一种自旋为零的 Higgs 粒子，实验上很难证实它的存在。这种粒子用来解释中间玻色子 $W^\pm$ 、 Z^0 的质量起源，可是在这个理论中又无法说明这种粒子本身有多重。此外，在这个理论中至少存在 13 个自由参数，无法说明上述在轻子-夸克之间存在的对称性质。这表明，这个理论中的确包含了很重要的正确原理，但也存在着不少重要问题需要进一步研究和发展。

一些有意义的探索途径

自然界是否存在 Higgs 粒子呢？科学家们的看法不尽相同。有人认为可能是存在的，因为否则会产生其它矛盾，有人认为不存在这种粒子，因为它们出现在理论中有相当的随意性。他们认为，基本相互作用应当是在费米子之间通过传递规范粒子而实现的，Higgs 粒子只不过是基本相互作用的一种等效描写而已。

此外还有一些有趣的猜测和探索。例如，（一）有人提出，在各代相应的费米子之间是否还可能组成新的多重态，如：

$$\begin{pmatrix} e \\ \mu \\ \tau \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} u \\ c \\ t \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}.$$

这就是说， e 、 μ 、 τ 是某一种粒子的三种不同状态， u 、 c 、 t 是另一种粒子的三种不同状态，等等。如果自然界规律确实是如此的话，就可以预言费米子之间有如下规律：

$$m_e m_\mu / m_\tau = m_d m_s / m_b = m_u m_c / m_t$$

（二）不少人基于规范不变性和要求理论可重整化，想把量子色动力学（描写强相互作用的一种理论）、弱电统一理论统一在一个更大的对称性体系之中，这就是大统一理论的想法。在这种理论中也要求存在

Higgs 粒子, 暂不讨论 Higgs 粒子与费米子之间相互作用的性质, 而是把轻子与夸克放在同等的地位上考虑. 这就使得在它们之间产生了许多联系. 以目前讨论得比较详细的 SU, 大统一理论为例, 它预言存在 24 种传递各种相互作用的规范粒子, 其中 1 种是光子, 3 种是弱中间玻色子 $W^\pm, Z^0$, 8 种是量子色动力学中的胶子, 其余 12 种是新预言的中间玻色子, 它们使得在夸克与轻子之间发生跃迁. 所以, 在这个理论中同时给出了量子色动力学、弱电统一理论. 除此之外, 它还有一些新的预言:

1) 在目前能量范围内, 中性流混合角为: $\sin^2 \theta_w = 0.206$, $m_b \sim 4.8 - 5.6 \text{ GeV}/c$, $m_s \sim 0.38 - 0.56 \text{ GeV}/c$ (若味道数 = 6), 这些都与实验结果大体符合.

2) 由于夸克与轻子之间可以发生跃迁, 使得质子不稳定, 理论预言质子寿命下限为 $\tau_p \sim 10^{31 \pm 1}$ 年, 这在目前实验值下限 2×10^{30} 之上.

3) 费米子的电荷 Q 是量子化的, 有下一关系:

$$Q_e - 3Q_{\text{d夸克}} = 0.$$

4) 不同的具体处理方法预言了略有不同的轻子-夸克质量关系, 例如有:

$$m_e = m_d, m_\mu = m_d, m_\tau = m_b;$$

$$\text{或者 } 3m_e = m_d, m_\mu = 3m_s, m_\tau = m_b.$$

但是, 这个理论还有明显不成功的地方, 例如: 不能预言 $2e/3$ 电荷夸克的质量, 也找不到它与 $-e/3$ 电荷夸克在质量上的关系, 有些已经预言的质量关系也与实验符合得并不好, 在理论中还存在许多自由的不确定参数. 综观这些可以看出, 凡是与实验结果符合的预言大都是由于坚持规范不变性、理论可重正化而得来的; 把夸克、轻子放在同一个层次上考虑也是对的. 凡是不成功的地方大都与 Higgs 粒子-费米子的耦合性质有关. 特别是, 与原先的电统一理论相比较, 这里 Higgs 粒子要起更大的作用, 要利用它来解释新预言的 12 种中间玻色子的大质量 ($\sim 10^{16} \text{ GeV}$), 解释其余的中间玻色子质量轻, 甚至为零 (光子), 又要利用它解释费米子的质量起源, 但是, 难以满足这么多方面的要求, 所以不可避免地要产生一些与实际不符的预言. 这些都说明理论上现在所得到的这些结果都是十分初步的.

还有很多课题

此外, 让我们再提出一些可能有意义的课题.

(1) 费米子的质量是一个基本的物理量. 长期以来, 人们问道, 为什么电子的静止质量不大不小正好是 $0.51 \text{ MeV}/c^2$, 质子的质量正好是 $938 \text{ MeV}/c^2$? 现在讨论轻子-夸克对称性问题, 人们又问道, 怎么去描述夸克的质量, 它们的质量是怎么产生的? 这是正在研究中的一个困难课题. 人们希望从一个根本性的理论、从相互作用的强度、性质出发, 认识质量问题的本

质, 统一解释轻子-夸克的质量和它们在质量方面的对称性质.

(2) 到现在为止, 我们已经看到有三代轻子-夸克, 每一代的性质基本上是重复的. 这似乎有些像在元素周期表中那样, 每个元素重复上个周期中相应元素的性质. 那么, 自然界的组成为什么自我重复呢? 在自然界里总共有多少代呢?

量子色动力学回答说夸克的“味”最多不超过 16 种, 否则就要破坏渐近自由性质, 这就是说最多不超过 8 代. 宇宙学的研究回答说, 宇宙间无质量 (或小质量) 的中微子不超过 3 到 4 种, 所以不超过 3 到 4 代轻子-夸克. 还有人给出了其它的回答和猜测, 也是众说不一. 不过, 既然客观上出现了许多性质重复的家族, 这表示又有一个新的自由度显示出来了. 我们现在对这个新自由度的物理含意还是认识不清楚的. 这也是重要的研究课题之一.

(3) 既然自然界存在许多轻子-夸克家族, 那就表示轻子-夸克还可能它们自己的内部结构. 有人设想更下一层次的粒子有三类: 颜色子 (四种)、弱旋子 (两种)、味子 (至少有三种).

颜色子: 红、黄、蓝、白

弱旋子: 上、下

味子: e 味、 μ 味、 τ 味

轻子、夸克都是由三类粒子组成的, 每类粒子中取一种. 其中白颜色子代表轻子数, 不参与强作用, 其余颜色子参与强作用, 没有弱作用, 弱旋子参与弱作用, 不参与强作用. 所以由红颜色子、上弱旋子、 e 味子组成红色 u 夸克, 由白颜色子、上弱旋子、 e 味子组成 ν_u , 如此等等. 当然这种模型又存在一系列的问题和困难. 如果说轻子、夸克确实有内部结构的话, 也许最明确的证据是找到自旋大于 $\frac{1}{2} \hbar$ 的轻子和夸克. 所以,

现在看到的这几代轻子-夸克就只能说是在基态附近的小小质量分裂而已.

以上, 我们只是简单地介绍了这方面的一些讨论课题. 自然界已经向我们显露了更深刻的题材, 内容丰富, 目前我们对它的认识还只是处在十分初步的阶段. 我们期待在这方面会获得重要的进展.

(题头: 牛枢学)