

夸克家族

东方晓

最近西欧核子研究中心的 U_{A_1} 小组在 22 届国际高能物理会议上宣布发现了顶 (t) 夸克, 这样夸克家族就三世同堂了. 第一代夸克兄弟两个, 人称上 (u) 夸克和下 (d) 夸克; 第二代夸克也是昆仲二人, 美名曰奇异 (s) 夸克和粲 (c) 夸克; 而最年青的一代仍然同胞一对, 雅号底 (b) 夸克和顶 (t) 夸克. 夸克家族的成员, 世袭相传, 脾气类同, 性格一致, 具有非常相似的物理性质, 真是毫不含糊的嫡亲一家. 比如, 整个家族的成员都是带有 $1/3$ 重子数的自旋为 $1/2$ 的费米子. 从祖辈看, u 夸克电荷是 $2e/3$, d 夸克电荷却是 $-e/3$; 在第二代, c 夸克电荷 $2e/3$, s 夸克电荷 $-e/3$; 而第三代, t 夸克电荷 $2e/3$, b 夸克电荷 $-e/3$. 似乎 u, c, t 夸克具有更亲近的“血缘”关系, 因为它们的电荷也是一样的. 这样说来, d, s, b 夸克也是“直系”亲属关系. 不过夸克家族却完全不像鲁迅笔下的九斤老太, 一代不如一代. 恰恰相反, 夸克家族少生优育, 一代更比一代强. 请看, 第一代夸克“体重”只有 10 个 MeV 左右, 第二代 s 夸克就有 250 MeV, c 夸克却有 1800 MeV. 第三代就更不得了啦, b 夸克有 5 GeV, 据说 t 夸克有 40 GeV 左右. (注: $1\text{GeV} = 1000\text{MeV}$)

夸克模型诞生在 1964 年. 那一年 Gell-mann 和 Zweig 分别提出了强子的夸克结构概念. 在此之前, 人们不大相信强子有结构, 很多人在进行强子分类学的唯象研究. 不过这些研究对以后夸克模型的建立还是起了有益的作用, 如 Gell-mann-西岛规则, 坂田模型、强子分类的八重法等, 特别是八重法, 对低能强子作了详细的研究, 已具备夸克模型的雏型了.

夸克模型是在坂田的 $SU(3)$ 模型及八重法的基础上建立起来的. 盖尔曼独辟蹊径, 首先在夸克模型中提出, 所有强子都是由更基本的粒子——夸克构成的. 并假定夸克有三种, 分别叫做 u, d, s 夸克 (当时的文章用 p, n, λ 表示), 构成 $SU(3)$ 的基础表示. 根据夸克模型, 所有强子都是 u, d, s 夸克和它们的反夸克 $\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}$ 构成的束缚态: 介子是正反夸克 $q\bar{q}$ 的束缚态, 例如 π^+ 介子由 $u\bar{d}$ 构成, K^+ 介子由 $u\bar{s}$ 构成等等. 根据群表示乘积分解性质, 三个夸克和三个反夸克可以构成 $3 \times \bar{3} = 1 + 8$ 个介子复合态, 在么旋空间表示为

$$M_j^i \sim q^i \bar{q}_j - \frac{1}{3} \delta_j^i q^k \bar{q}_k$$

这里 $i, j = 1, 2, 3$, 代表三种夸克味, 上标代表夸克, 下标代表反夸克, 这九个复合态既可是赝标介子八重态

和 0^- 单态介子 η^0 , 又可填充矢量介子八重态和 1^- 单态介子 ϕ . 到底代表那个, 取决于自旋波函数. 重子是三个夸克 qqq 构成的束缚态, 如 Δ^{++} 粒子及 Ω^- 粒子, 分别是 uuu 和 sss 构成的. 根据表示乘积分解性质, 三个夸克可构成 $3 \times 3 \times 3 = 1 + 8 + 8 + 10$ 个重子复合态, 在么旋空间可表为

$$B_j^i \sim q^i q^c q^b \epsilon_{jab} - \frac{1}{3} \delta_j^i q^k q^a q^b \epsilon_{abk},$$

和

$$D^{ijk} \sim q^i q^j q^k.$$

这里 B_j^i 可代表 $\frac{1}{2}^+$ 重子八重态 D^{ijk} 可代表 $\frac{3}{2}^+$ 重子 +

重态, 当时 Ω^- 粒子还没有发现, 因此, 夸克模型就预言有这样一个 Ω^- 粒子存在. 果然, 不久就发现了 Ω^- 粒子, 这是夸克模型及八重法的巨大成功, Gell-mann 也因此获得了 1969 年物理学诺贝尔奖金.

我们知道, 强相互作用具有同位旋不变性, 表现为强子具有同位旋多重态, 比如 $\Delta^{++}, \Delta^+, \Delta^0, \Delta^-$ 为同位旋四重态, 它们除电荷不同之外, 其他性质都相同, 质量略有差别. 这是为什么? 以前我们不知道. 有了夸克结构, 现在问题清楚了. 它们分别由下述夸克组态构成: uuu, uud, udd, ddd . Δ 同位旋四重态是 u, d 夸克同位旋二重态的必然结果: Δ^{++} 电荷为 $2e$, 导致 u 夸克电荷只有 $2e/3$ 才行, Δ^- 电荷为 $-e$, 导致 d 夸克电荷只有 $-e/3$ 才行, Δ 的重子数为 1 要求夸克的重子数只好是 $1/3$ 分数.

六十年代初, 不少物理学家, 包括 Gell-mann 本人在内, 对夸克结构是持怀疑态度的. 当时有人问 Gell-mann, 夸克是什么? Gell-mann 笑了笑, 回答说, 夸克不过是一种数学符号而已. 人们不大相信夸克, 并不是没有道理的, 这除了因为夸克具有分数重子数和分数电荷这些稀奇古怪的性质外, 还有许多费解的难题. 为什么强子只有 $q\bar{q}$ 和 qqq 这两种形式的束缚态, 而没有其它形式的束缚态? 比如像 qq 双夸克态和 $qqqq$ 四夸克态等等. 为什么没有发现和自由电子一样的自由夸克? 这有两种可能: 一种是夸克很重, 现有加速器能量太低, 还不足以把夸克打出来. 一种是根本不存在自由夸克, 和固体中的声子一样, 永远存在于强子内部, 即现在人们常说的夸克禁闭. 由于夸克禁闭还不是定论, 所以还有人想尽各种办法寻找自由夸克, 比如 Fairbank 小组就一直进行这方面的工作.

夸克模型的另一个难题是自旋统计困难. 所谓自旋统计困难, 是指重子波函数的全对称性质. 我们知道, 费米子满足费米统计, 所以波函数应是全反对称的; 玻色子满足玻色爱因斯坦统计, 波函数应是全对称的. 但在夸克模型中, 重子波函数却是全对称的, 这是违反费米子波函数应是全反对称的这一自旋统计规则的. 为了克服这一矛盾, 必须给夸克加上另外的量子数, 这就是 Greenberg 引入的颜色量子数. 颜色有三

种,一般用红、黄、蓝代表,这样,每一种夸克就有三种不同的颜色,比如 u 夸克,现在就有红的 u 夸克,黄的 u 夸克,蓝的 u 夸克, d 夸克就有红的 d 夸克,黄的 d 夸克,蓝的 d 夸克等等。引入颜色自由度就解决了自旋统计的矛盾。比如 Ω^- 是由 sss 构成的,它的 $SU(3)$ 么旋空间波函数是全对称的,如果内部轨道角动量为零,它的空间波函数也是全对称的,为了满足 Ω^- 的自旋是 $3/2$ 要求,三个 s 夸克的自旋取向必须是平行的,因此,它的自旋波函数也是全对称的。如果不引入颜色自由度, Ω^- 的波函数将由空间波函数、么旋波函数和自旋波函数三部组成,而且整个波函数是对称的。这违反自旋统计规则。如果引入颜色自由度, Ω^- 的颜色空间波函数将是 $\epsilon_{ijk}s^i s^j s^k$, 这是一个全反对称的颜色单态波函数,其中 $i = 1, 2, 3$, 代表三种颜色, ϵ_{ijk} 是全反对称张量。这样 Ω^- 的波函数将由空间、么旋、自旋和颜色波函数四部分组成,而是全反对称的。

颜色的引入和规范理论的发展,导致以后重子色动力学——简称 QCD 的诞生。QCD 不仅解决了自旋统计困难,而且也解决了为什么没有双夸克 (qq) 和四夸克态 ($qqqq$) 的问题, QCD 的色单态要求,使得这些例外态不出现。更重要的是, QCD 已被公认为是强相互作用的动力学基础,在粒子物理中广泛应用了。

到此为止,我们的夸克,既有颜色又有味道。颜色只有三种,味道也有三种 u, d, s , 是不是这三种味道就代表苦、辣、酸、甜、咸五味俱全了,没有更多的味道了? 1970 年, S. L. Glashow, J. Iliopoulos 和 L. Maiani 回答了这个问题。他们在研究夸克轻子弱相互作用时发现,只有三种味道不能消除奇异数改变的中性流。为此他们引入了第四种味道,称为粲夸克或 c 夸克。这样便有四个夸克 (u, d, s, c) 和四个轻子 (ν_e, e, ν_μ, μ), 使得夸克的弱作用与轻子完全类似,因而成功的消除了奇异数改变的中性流。这个模型后人称为 GIM 机制。

支持夸克模型的实验,除了 Ω^- 以外,还有 SLAC SPEAR 正负电子对撞机上的 R 值测量。根据夸克-部分子模型, R 定义为:

$$R \equiv \frac{\sum_q \sigma(e^+e^- \rightarrow q\bar{q} \rightarrow \text{强子})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} = 3 \sum_q Q_q^2$$

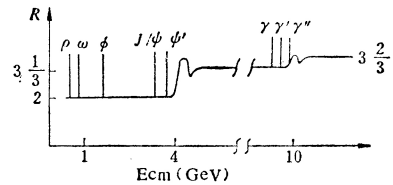
这里因子 3 反映夸克有三种颜色。假定 e^+e^- 的质心系能量 $E_{cm} < 2m_c$, 则只有 u, d, s 正反夸克对能够产生,那么

$$R = 3 \sum_q Q_q^2 = 3 \left(\left(\frac{2}{3} \right)^2 + \left(\frac{1}{3} \right)^2 + \left(\frac{1}{3} \right)^2 \right) = 2$$

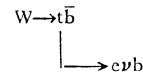
假若 E_{cm} 在 $2m_c$ 和 $2m_b$ 之间,那么便有,

$$3 \sum_q Q_q^2 = 3 \left(\left(\frac{2}{3} \right)^2 + \left(\frac{1}{3} \right)^2 + \left(\frac{1}{3} \right)^2 + \left(\frac{2}{3} \right)^2 \right) = 3 \frac{1}{3}$$

SPEAR 测得的 R 值,完全符合上述结果(见下图)这个实验清楚的证明以下几点:(一) u, d, s, c 夸克的电荷分别是 $2/3, -1/3, -1/3, 2/3$ 。(二)每种夸克还带有三种不同的颜色。(三)夸克质量不会太大(现有加速器能量)。一九七四年,丁肇中教授发现了 J/ψ 粒子,直接证明了粲夸克的存在,因为一般认为 J/ψ 粒子是 $c\bar{c}$ 的束缚态。



1975 年, SLAC 发现了 τ 重轻子。人们自然会想到,既然 τ 重轻子存在,必须应有与其相联系的中微子—— ν_τ 中微子存在。这样轻子总数有六个: e, ν_e, μ, ν_μ 和 τ, ν_τ , 根据弱作用中轻子与夸克的相似性,科学家们预言,还应有两种新的夸克存在,这就是底 (b) 夸克和顶 (t) 夸克。这样夸克总数也是六个: $u, d; c, s; t, b$; 一般文献中把六个夸克和六个轻子称之为三代夸克和三代轻子,代与代之间除了质量不同之外,其他性质都是相同的。过了不久, 1977 年, b 夸克的存在也被实验证明了。这就是 FNAL 发现的 r 族粒子,它被认为是 $b\bar{b}$ 的束缚态。但是 t 夸克的存在还没有最后确证。因为它的质量很重,在现有加速器能量范围内不是通过测量 $t\bar{t}$ 共振态,而是通过



反应测量的,并且因为事例数太少,只有 6 个,还有待实验进一步证实。

从 1964 年夸克问世,到 1984 年 t 夸克发现,这中间二十年过去了。在这短短的二十年里,粒子物理学发生了翻天覆地的变化。特别是强子有结构的观念深入人心,规范理论普遍被物理学家所接受,并且成果辉煌。比如像 Weinberg-Salam 弱电统一模型,量子色动力学 (QCD) 的成功,七十年代发展起来的统一强相互作用、弱相互作用和电磁相互作用的大统一理论 (GUT),超对称大统一理论 (SUSY GUT),以及统一强、弱、电和引力四种相互作用的超引力理论等等,都取得了可喜的进展,而且方兴未艾,继续向前发展着。