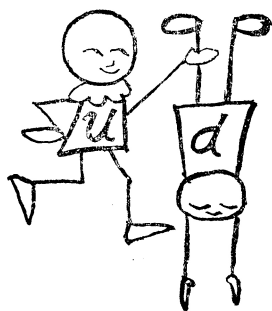


# 夸克 味



沈 齐 兴

说起味，人们往往马上会联想到我们的味觉器官所能感受到的甜、酸、苦、辣。但是，我们这里要谈到的夸克的味与此毫无关系，这里所说的味是夸克所具有的一种特殊的量子数。

我们知道，不同的微观粒子具有不同的属性，也就是说，每一种微观粒子具有自己特定的量子数。大家所熟悉的粒子的质量、寿命、自旋、电荷、重子数、 $\mu$ 轻子数、 $e$ 轻子数、同位旋、同位旋第三分量、空间宇称、电荷共轭宇称、 $G$ 宇称等等都是表征微观粒子性质的量子数。不同的微观粒子具有不完全相同的量子数。例如，电子和正电子在实验上是可以区分的，因为虽然电子和正电子所具有的自旋、质量量子数是一样的，但它们具有的电荷量子数却不一样，电子带负电荷（通常称它具有电荷量子数  $-1$ ），而正电子带正电荷（通常称它具有电荷量子数  $+1$ ）。所以，为了搞清楚实验上所观察到的某个粒子到底是哪种粒子，我们必须把这个粒子所具有的各种量子数一个一个地将它们测量出来。

和夸克的色一样，夸克的味也是表征夸克性质的一种量子数。那么，什么是夸克的味；夸克到底有多少种味，为了回答这些问题，我们还是先来回顾一下夸克家族的历史。

由于各种加速器的建造以及实验技术的迅速发展，从1947年发现 $\pi$ 介子、 $K$ 介子和 $\Lambda$ 超子以后又相继发现了 $\Sigma$ 超子、 $\Xi$ 超子以及一批反粒子，特别是六十年代初的几年中，一大批共振态粒子陆续被发现，基本粒子家族的成员一下上升到上百个之多，已超过当年门捷列夫建立元素周期表时所发现的元素的数目。因此，人们很自然地会提出这样一个问题：这些粒子难

道都是基本的吗？是否存在组成这些粒子的更基本的组元？由于在已经发现的粒子家族中由介子和重子组成的强子族成员占了绝大多数，所以强子的结构首先引起了物理学家们的浓厚兴趣。

1959年池田、小川和大贯提出的 $SU(3)$ 对称性理论以及1961年Gell-Mann和Neeman提出的强子八重态分类方法对后来夸克模型的建立起了重要作用。根据这些理论，具有相同自旋和宇称的粒子（例如自旋、宇称 $J^P = 0^-$ 的九个赝标介子、 $J^P = 1^-$ 的九个矢量介子、 $J^P = \frac{1}{2}^+$ 的八个重子以及 $J^P = \frac{3}{2}^+$ 的十个重子等）可以分别进行编组，并在以超荷和同位旋第三分量为坐标轴的平面上排列成很有规则的图形（详见《高能物理》1982年第四期“五彩缤纷的基本粒子(二)”）。这个分类方案不但预言了当时还未发现的 $\Omega^-$ 粒子的存在，而且还十分精确地预言了这个粒子的质量大约为1676MeV。1964年果然在实验上发现了这个粒子，质量为1672MeV。这是八重态分类方法的巨大成功。

此外，从六十年代初开始，一系列的实验事实已显示出强子具有内部结构的迹象。例如，电子和质子的弹性散射实验表明，质子的电荷有一定的分布，其半径约为 $0.7 \times 10^{-13}$ 厘米。所以，质子不是一个点，而是有内部结构的。

描述强子结构的夸克模型就是在这样的基础上诞生了。1964年，美国加州理工学院的Murray Gell-Mann和George Zweig分别提出了强子结构的观念。前者把组成强子的更基本的组元称为“夸克”(quark)，后

者把它称为“王牌” (ace), 按照 Gell-Mann 提出的夸克模型, 夸克有三类, 一类称为上夸克 (u), 一类称为下夸克 (d), 第三类称为奇异夸克 (s), 相应的反粒子就是反上夸克 ( $\bar{u}$ )、反下夸克 ( $\bar{d}$ ) 和反奇异夸克 ( $\bar{s}$ ); 一切介子由一个夸克和一个反夸克构成, 例如,  $\pi^-$  介子是由一个下夸克和一个反上夸克构成的束缚态 ( $d\bar{u}$ ),  $K^+$  介子是由一个上夸克和一个反奇异夸克构成的束缚态 ( $u\bar{s}$ ) 等等; 而所有重子是由三个夸克构成的束缚态, 例如, 质子是由二个上夸克和一个下夸克构成的束缚态 ( $uud$ ),  $\Xi^0$  超子是由一个上夸克和二个奇异夸克构成的束缚态 ( $uss$ ) 等等. 当时实验上发现的一些现象很大一部分可以用这个模型得到解释, 因此当时物理学家们相信, 夸克这个小家庭中只包含三个成员, 即上夸克、下夸克和奇异夸克. 上、下和奇异数就是这三种夸克所分别具有的量子数, 也就是夸克的三种味量子数, 通常简称为味. 例如, 奇异夸克具有奇异数  $-1$ , 上夸克和下夸克的奇异数为零. 相应的反夸克具有相反的味量子数, 即反奇异夸克具有奇异数  $+1$ , 而反上夸克和反下夸克的奇异数为零.

正当人们陶醉于夸克模型的重大成功时, 却出现了一些新的无法用夸克模型来解释的实验结果. 例如, 如果世界上只存在三种味的夸克, 那么按照最初 Weinberg-Salam 模型对三种夸克的填充方式, 就会存在奇异数改变的中性流, 从而像图 1 中给出的这类过程就

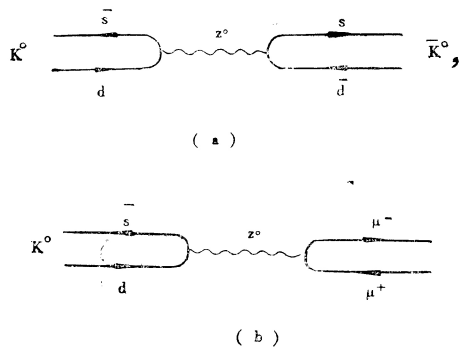


图 1

很容易发生. 但是, 由图 1(a) 计算得到的长寿命的  $K_S^0$  介子和短寿命的  $K_L^0$  介子之间的质量差比实验结果要大一个量级以上; 另外, 由图 1(b) 计算得到的  $K_S^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^-$  的分枝比也比实验上测量的值几乎大四个量级, 这给夸克模型蒙上了一层阴影. 直到 1970 年, 哈佛大学的 Glashow 和他的同事 Iliopoulos, Maiani 发现, 只要再增加一类夸克, 引入具有第四种味 (这个新的味量子数被称为粲数) 的夸克——粲夸克 (c), 并适当改变 W-S 模型中夸克二重态的填充方式, 使夸克和轻子具有完全对称的填充形式, 即二代夸克

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

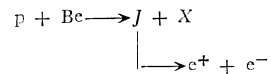
对应二代轻子

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

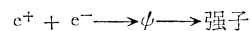
这样, 不但奇异数改变的中性流自动消失, 从而合理地解释上述二类实验事实, 而且还能自动消除由于 Adler 反常带来的理论不可重整的困难. 这个优美的理论以后被人们称为 GIM 机制, 它从理论上首先预言了具有第四类味的粲夸克的存在.

粲夸克的引入使  $SU(3)$  对称性扩充为  $SU(4)$ , 这样, 在具有相同自旋和宇称的介子、重子多重态中所包含的粒子将大大增加. 例如  $J^P = 0^-$  和  $1^-$  的二个八重态分别变成十五重态,  $J^P = \frac{1}{2}^+$  的重子八重态扩充为二十重态,  $J^P = \frac{3}{2}^+$  的重子十重态扩充为二十重态. 所以就这四个多重态而言, 就增加了三十六个尚未发现的新粒子. 因此, 为了证实第四类夸克的存在, 寻找尚未发现的新粒子已成为实验物理学家所面临的一个十分重要而又繁重的工作.

1974 年 11 月, 美国麻省理工学院丁肇中领导的实验组, 在布鲁克海文实验室的 30GeV 质子加速器上, 通过如下反应过程



发现了一个新粒子, 他们称它为  $J$  粒子. 与此同时, 美国斯坦福大学 Richter 领导的实验组在 SLAC 的正负电子对撞机上, 观察过程



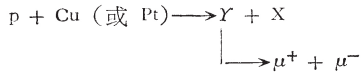
也发现了这个新粒子, 并称它为  $\psi$  粒子, 所以后来这个粒子被统一命名为  $J/\psi$  粒子. 根据这个粒子的性质, 可以推断出它是粲夸克和反粲夸克构成的介子束缚态 ( $c\bar{c}$ ). 不久,  $J/\psi$  粒子的一系列激发态 (如  $2^3S_1$  态  $\psi(3685)$ 、 $1^3D_1$  态  $\psi(3770)$ 、 $3^3S_1$  态  $\psi(4030)$ 、 $4^3S_1$  态  $\psi(4415)$  和三种 P 波态  $\chi(3415)$ 、 $\chi(3510)$ 、 $\chi(3555)$ ) 以及一大批含有粲夸克 (或反粲夸克) 的粲介子 (如  $D^+(c\bar{d})$ 、 $D^-(\bar{c}d)$ 、 $D^0(c\bar{u})$ 、 $\bar{D}^0(\bar{c}u)$ 、 $F^+(c\bar{s})$ 、 $F^-(\bar{c}s)$ 、 $D^{*+}(c\bar{d})$ 、 $D^{*-}(\bar{c}d)$ 、 $D^{*0}(c\bar{u})$ 、 $\bar{D}^{*0}(\bar{c}u)$  等) 都陆续被实验发现, 这就进一步证实了带粲量子数的第四类夸克的存在, 从而表明, 夸克至少包含四种味.

1975 年, 在 SLAC 的  $e^+e^-$  对撞机 SPEAR 上发现了一个十分重要的粒子, 称为  $\tau$  重轻子, 虽然这个粒子的质量很大 (1784MeV), 但它具有和其它轻子一样的基本性质——不参与强相互作用, 所以仍然属于轻子类.  $\tau$  重轻子的发现, 使轻子由二代增加为三代:

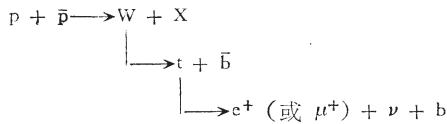
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}$$

从而弱、电统一理论中反映的夸克与轻子之间的对称性使人们相信,除了上面提到的四类夸克外,至少还应该存在二类夸克。这二类夸克被称为底夸克( $b$ )和顶夸克( $t$ ),它们分别带一种新的味量子数——底数和顶数。

1977年夏,莱德曼在美国费米实验室用400 GeV的高能质子轰击铂和铜靶,利用双臂谱仪观测反应



结果发现了由 $b$ 夸克和反 $b$ 夸克构成的介子 $\Upsilon$ 和它的激发态,随后实验又发现了 $\Upsilon$ 粒子族的其它一些成员以及含有 $b$ 夸克或反 $b$ 夸克的一些底介子(如 $B^\pm$ 、 $B^0$ 和 $\bar{B}^0$ )。底夸克的存在终于得到了实验的证实。紧接着,好几个实验组开始了寻找顶夸克的工作。几年过去了,寻找的 $t$ 夸克的质量范围已从十几个 GeV 上升到40 GeV 左右,可是依然没有得到一点有关 $t$ 夸克的信息。直到1984年7月,从第22届国际高能物理会议上才传来使人兴奋的好消息,西欧核研究中心的UA1实验组宣布他们发现了有可能是顶夸克的几个事例。他们在质子能量为540 GeV的质子、反质子对撞机SPS上,利用高能质子和反质子的对撞,通过观察如下的反应过程



找到了六个事例。当然,由于事例数还比较少, $t$ 夸克的最后确证还有待实验进一步证实。

至此,实验已经证明,构成强子的更为基本的粒子

表1 夸克的量子数

夸克	量子数	电荷	同位旋	第三分量	重子数	奇异数	粲数	底数	顶数
d		$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	0	0	0	0
u		$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	0	0	0	0
s		$-\frac{1}{3}$	0	0	$\frac{1}{3}$	-1	0	0	0
c		$\frac{2}{3}$	0	0	$\frac{1}{3}$	0	1	0	0
b		$-\frac{1}{3}$	0	0	$\frac{1}{3}$	0	0	-1	0
t		$\frac{2}{3}$	0	0	$\frac{1}{3}$	0	0	0	1

——夸克至少有六类,即 $u$ 夸克、 $d$ 夸克、 $s$ 夸克、 $c$ 夸克、 $b$ 夸克和 $t$ 夸克,相应的上、下、奇异数、粲数、底数和顶数就是夸克的六种味。六类夸克所具有的几种量子数被列出在表1中。

说到这里,人们自然会问,夸克的味的数目是否还会不断增加?可惜目前还没有一种理论能预言夸克的味的数目。不过,量子色动力学理论中渐近自由要求夸克的味的数目不能大于十六,这也许能对夸克味的上限给我们提供某些启示。