



(十一)

## 强子的层子模型

本史话的第一篇就说到人类很早就开始探索物质结构的秘密，经过许许多多的科学实验和理论研究，人类对物质结构的认识不断深入。十九世纪初，证明原子是可分的，它是由原子核和围绕在原子核周围的电子云组成，接着，实验又证明原子核本身也是可分的，它由质子和中子组成，电子、质子和中子被称为基本粒子。

随着人类科学技术水平的发展，六十年代以来，实验上已发现了200多种基本粒子。

在研究的过程中，也有一些人探讨过基本粒子的结构，提出过几种强子结构模型，例如，早在1949年， $\pi$ 介子发现后不久，费米和杨振宁提出过费米—杨振宁模型， $\pi$ 介子是由核子和反核子组成，1955年畈田昌一提出以质子、中子和 $\Lambda$ 粒子为基础粒子的畈田模型，认为所有强子都是由这三种基础粒子和它们的反粒子组成，1961年盖尔曼等人提出夸克模型，认为所有强子都由夸克和反夸克组成，夸克有三种（还有三种反夸克）。前两种模型存在一些难以解决的问题，后一种模型，作者只把它作为一种数学符号。

我国的基本粒子物理工作者，在毛泽东同志关于物质无限可分的哲学思想指导下，认真调查研究，系统地分析基本粒子的已有的实验和理论，在1965年提出了层子模型。

层子模型是基于核子存在内部

结构的实验事实，提出来的这些事实，我们在第十篇“核子结构的发现”中已经有过详细的叙述，从这些实验中得出的结论是：核子是有结构的，核子内部有点状的粒子存在。

其次，在发现了大量的基本粒子以后，发现粒子按质量可以组成一些有规律的族，如质子和中子的质量分别为  $938.3 \text{ MeV}/c^2$  和  $939.6 \text{ MeV}/c^2$ ，只相差 0.1% 左右；三个超子  $\Sigma^+$ 、 $\Sigma^0$ 、 $\Sigma^-$  的质量分别是  $1189.4 \text{ MeV}/c^2$ 、 $1192.5 \text{ MeV}/c^2$  和  $1197.4 \text{ MeV}/c^2$ ，相差不到 0.8%；两个 $\Xi$  粒子的质量是  $1314.9 \text{ MeV}/c^2$  和  $1321.3 \text{ MeV}/c^2$ ，相差也不到 0.7%。此外， $\Delta$  粒子家族的质量都在  $1236 \text{ MeV}/c^2$  左右， $\Sigma^*$  粒子家族的质量都在  $1385 \text{ MeV}/c^2$  左右， $\Xi^*$  粒子家族的质量都在  $1530 \text{ MeV}/c^2$  左右， $\Omega^-$  的质量为  $1672.5 \text{ MeV}/c^2$ 。我们把这些粒子的质量按电荷的不同排列成下面的图：

从这个图，我们看到某种规律

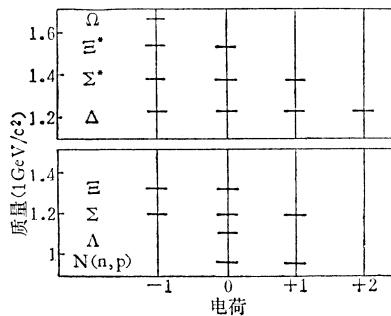


图 1

性。这种规律性类似于在氢原子内把量子态分成族的转动对称性，显示了某种内部结构的迹象。

一般认为，基本粒子分成族是同位旋对称性的结果。质子和中子的许多特性都几乎相同，只是电荷不同，质子带一个单位正电荷，中子是电中性的，可以把它们看成是同一种核子在同位旋空间的两种不同状态，它们的同位旋分量为  $+1/2$ ， $-1/2$ ，组成同位旋二重态。类似地，三个 $\Sigma$  超子有  $+1, 0, -1$  三种电荷状态，它们的同位旋分量为  $+1, 0, -1$ ，组成同位旋三重态等等。实验证明，强相互作用是与电荷无关的，即具有同位旋空间变换下的不变性，假如不存在别的相互作用，则组成同一个同位旋多重态的各个成员，例如质子和中子，应该具有相同的性质，包括他们的质量相同，相互作用的性质相同等等，只是由于电磁相互作用的存在，使多重态成员之间的质量稍有差别，由于电磁相互作用比强相互作用大概弱100倍，所以这种差别也就很小。

1961年盖尔曼和内曼把各个小的同位旋多重态组成一个大的超多重态，叫做八重法。即把自旋和宇称相同的重子（或介子），按它们的同位旋（或电荷）和奇异数排列起来，发现强子可以形成有规则的族，例如下图就是自旋和宇称 ( $J^P$ ) 为  $(1/2)^+$  和  $(3/2)^+$  的重子和  $O^-$ ， $1^-$  的介子的排列图。

强子的这种分类法的数学基础是群论，具体地说是所谓  $SU(3)$  群。

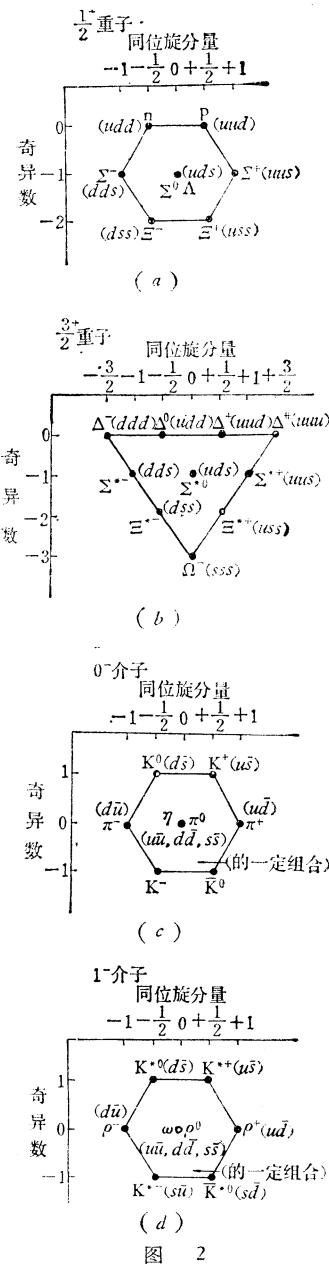


图 2

最初用八重法对强子分类时，在自旋为  $3/2$  的重子十重态中，最后一个单态是空着的，当时还没有合适的粒子可填。按照十重态的要求，1962 年，盖尔曼预言，第十个粒子应该有下面的性质：电荷  $Q = -1$ ，奇异数  $S = -3$ ，质量为  $1680 \text{ MeV}/c^2$ ，自旋为  $3/2$ ，宇称为正。在这个预言推动下，1964 年布鲁克海汶实验室发现了这个粒子，命名为  $\Omega^-$ 。 $\Omega$  粒子的发现是对八重法的

极大支持。

超多重态分类法的成功，显示了在这些对称性的后面有它内在的本质。正如元素周期表的周期性规律，反映了围绕原子核转动的电子的排列规律一样。

我国理论物理工作者提出的层子模型的基本图象是：认为强子是由“更基本”的粒子组成的，并把这种“更基本”的粒子命名为“层子”。

层子有多少种呢？从最简单的可能性出发，即从强子表现出  $SU(3)$  对称性的事实出发，先假定层子有三种，而所有近 300 种强子都是由这三种层子和三种反层子组成。层子可能都带分数电荷，也可能都带整数电荷。下面举一种比较简单的情况，通俗地说一说，以下是三种层子的一些基本性质。

状态，而不受什么限制。自旋为半整数的粒子服从费米-狄拉克统计（因而这种粒子叫做费米子），各种量子数都相同的费米子不能处于同一个量子状态中。层子的自旋是半整数  $1/2$ ，应该服从费米-狄拉克统计，但是在组成重子时，往往两个或者三个相同的层子同在一个量子状态中。例如， $\Omega^-$  粒子就是由三个相同量子状态的  $s$  层子组成。这是和费米-狄拉克统计矛盾的。

这几年发展了新的一种理论，叫量子色动力学，把  $u$ 、 $d$ 、 $s$  三种层子比喻为层子有三种不同的味，每一种味的层子又有三种“颜色”，例如红、黄、蓝三种。层子的“颜色”事实上也是一种量子数，只不过人们为了方便，形象化地把它叫做“颜色”而已。带“颜色”的层子按照什么规则组成强子呢？有两条规则，第一，组成重子的三个层子具有三种不同的颜色。第二，组成介子的层子和反层子的颜色是互为补色。如果层子是红色，反层子的颜色则是红色的补色，如果层子是黄色，反层子的颜色则是黄色的补色等等。由于红黄蓝三种基色合在一起就变成白色，任何一种颜色和它的补色合在一起也是白色的，所以重子和介子都是白色的。

颜色的引入解决了层子的统计性问题。而且也得到一些实验事实的支持。（详见 1979 年第一期“量子色动力学浅说”一文）。

是不是 9 个层子的假设已经很完善了呢？人们的认识总是随着实践经验的积累而不断发展的。1974 年美国布鲁克海汶国家实验室丁肇中小组和斯坦福直线加速器中心里彻特小组同时宣布发现同一个新粒子，人们称之为  $J/\psi$  粒子。 $J/\psi$  粒子所具有的新特性，需要人们引入一个新的层子——粲层子，才能很好解释。

关于  $J/\psi$  粒子及粲粒子家族，将在第十五篇详细叙述，这里只作一个简单说明。

丁肇中小组的实验是用 30

GeV 的质子打铍靶，在产生的许许多多次级粒子中，专门挑选测量  $e^+e^-$  对，发现  $e^+e^-$  体系的质心能量在 3.1 GeV 的地方有一个尖锐的峰，也就是说  $e^+e^-$  对是从一个质量为  $3.1 \text{ GeV}/c^2$  的粒子衰变产生的。

里彻特组的实验是用电子对撞机，产生正负电子进行对头碰撞，当  $e^+e^-$  质心系能量为 3.1 GeV 时，发生一个尖锐的共振峰。

从他们的实验结果还可以确定  $J/\psi$  粒子的寿命是  $10^{-20}$  秒，即一万亿亿分之一秒，一般说来，质量很大的粒子，寿命都很短，质量在  $2\text{GeV}/c^2$  以上的粒子，寿命都在  $10^{-24}$  秒左右。但  $J/\psi$  粒子的质量为  $3.1\text{GeV}/c^2$ ，寿命却比一般长一万倍左右，这就引起了人们很大的轰动。

$J/\psi$  粒子发现以后，人们曾经提出过许许多多的解释，但是经过一段时间的实验和理论研究，大家都接受引进新量子数（叫做粲数）的概念，即认为  $J/\psi$  粒子是由一个新层子  $c$ （叫做粲层子）和它的反粒子组成 ( $c\bar{c}$ )。新层子  $c$  比已有的层子重得多，所以  $J/\psi$  粒子的质量就比较重。那么，为什么新粒子的寿命特别长呢？ $J/\psi$  ( $c\bar{c}$ ) 粒子衰变的一种可能的方式，就是衰变成两个粒子，一个包含  $c$  层子，另一个包含  $\bar{c}$  层子，按一般规则，这种衰变是容许的，按这种方式衰变，粒子寿命就比较短，另一种衰变方式就是  $J/\psi$  粒子衰变成一些不包含  $c$  和  $\bar{c}$  层子的粒子，按一般规则，这种衰变方式是受抑制的，按这种方式衰变，粒子的寿命就比较长。但是  $c$  层子较重，含有  $c$  层子或  $\bar{c}$  层子的粒子的质量也都很大，最轻的也比  $J/\psi$  粒子质量的一半要大，由于能量不够， $J/\psi$  粒子不能按第一种方式衰变，只能按第二种方式衰变，所以  $J/\psi$  粒子的寿命也就特别长。

引进一个新的层子，是否能给我们带来什么新的东西呢？是的，把  $J/\psi$  粒子看成是由  $c\bar{c}$  层子组成的，理论上就可以推导出  $J/\psi$  粒子还应该有一系列激发态，果然，这些

预言的激发态，后来都陆续在实验上发现了（详细情况请看十五篇）。此外，从对称性出发， $c$  层子还可以和别的层子一起组成一系列新的粒子，统称粲粒子，包括粲重子和粲介子，这样，原来表示超多重态的平面图，需要增加一个新参数——粲数。平面图就变成立体图了，不同的平面表示粲数的不同，介子八重态增加了上下两层，中间一层是原来的介子八重态，粲数是 0，上面一层每个介子都含有一个粲层子  $c$ ，粲数是 1，下面一层每个介子都含有一个粲反层子  $\bar{c}$ ，粲数是 -1。重子十重态扩大为四面体，最下面一层是原来的十重态，粲数是 0，依次往上是粲数为 1 的层（包含一个  $c$  层子），粲数为 2 的层（包含两个  $c$  层子），粲数为 3 的顶点（三个  $c$  层子）。重子八重态扩充为砍掉四个角的四面体，最底层是原来的八重态，粲数为 0，往上有粲数等于 1，粲数等于 2 两层。下面就是包括粲层子的立体粒子图。（可参照“高能物理”1979 年第 3 期 26 页、27 页的立体粒子图）。

根据上面的粒子图，应该存在一系列粲介子和粲重子。寻找这些粲粒子则是对层子模型的验证。自从  $J/\psi$  粒子发现以后，各个高能物理实验都设计了许多实验去寻找这些新粒子。现在已经确实证明存在，而且对它们的性质进行过较多研究的，有下列一些粲介子：

$$D^0(c\bar{u}) \quad \bar{D}^0(u\bar{c}) \quad D^+(c\bar{d}) \quad D^-(d\bar{c}) \\ D^{*0}(c\bar{u}) \quad \bar{D}^{*0}(u\bar{c}) \quad D^{*+}(c\bar{d}) \quad D^{*-}(d\bar{c})$$

已经发现少量事例的有：

$$F^+(c\bar{s}) \quad F^-(s\bar{c}) \\ F^{*+}(c\bar{s}) \quad F^{*-}(s\bar{c})$$

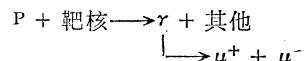
（韩树荣）

此外，实验上有初步迹象，认为可能存在下列粲重子：

$$A_c^+, \bar{A}_c^-, \Sigma_c.$$

近年来，高能实验物理又接连取得重大进展，1975 年发现了重轻子  $\tau$ ，1977 年发现了  $\gamma$  粒子。

发现  $\gamma$  粒子的实验原理和装置和丁肇中教授等人发现  $J$  粒子的原理和实验装置类似。费米实验室的莱德曼小组用 400 GeV 的高能质子打靶，探测下列反应所产生的  $\mu^+\mu^-$  对：



测量结果，发现  $\mu^+\mu^-$  对的事例数目在  $\mu^+\mu^-$  对的质心系能量为  $9.5\text{GeV}$  附近有两个峰，因而说明这些  $\mu^+\mu^-$  是由某两个新粒子产生的，进一步的实验表明，发现的是  $\gamma$  和  $\gamma'$  两个新粒子，它们的静止质量分别是  $9.5\text{GeV}/c^2$  和  $10.0\text{GeV}/c^2$ 。

和  $J/\psi$  的历史相似，发现  $\gamma$  粒子以后，人们认为这种中性介子可能是由一种新的层子和它的反层子组成的，这就是第五种层子，叫做  $b$  层子。 $\gamma$  粒子就是由  $b$  层子和  $\bar{b}$  反层子组成的。这样，层子共有 5 种，但是，由于对称性的考虑，人们预言至少还存在第 6 种层子，叫做  $t$  层子。6 种层子的量子数如下表：

高能物理学在不断发展，人们对物质结构的认识在不断深入。今天，基本粒子有内部结构、基本粒子由层子组成这个概念已经被人们普遍接受。而且，国内外已经开始探讨层子本身的内部结构，物质是无限可分的，人类对大自然的认识也是永无止境的。

层子	自旋	重子数	电荷	奇异数	粲数	美数*	?
$u$	$1/2$	$1/3$	$(2/3)e$	0	0	0	0
$d$	$1/2$	$1/3$	$-(1/3)e$	0	0	0	0
$s$	$1/2$	$1/3$	$-(1/3)e$	-1	0	0	0
$c$	$1/2$	$1/3$	$(2/3)e$	0	1	0	0
$b$	$1/2$	$1/3$	$-(1/3)e$	0	0	-1	0
$t?$	$1/2$	$1/3$	$(2/3)e?$	0	0	0	1?

\* 也有人把它称为底数。