

夸克模型的演变过程



一、夸克复合物的形成

夸克是一种人们提出来用以解释 SU_3 对称性的粒子,但人们花了很长时间才认识到它是个真正的粒子。如果我们回忆一下从假设的原子到认识它的存在所走过的漫长历程,这就容易理解了。实际上,有些人仍然怀疑夸克的存在,主要原因是不能“看到”它。为了能够证明按对待其它基本粒子的方法那样去对待夸克是正确的,那么在理论上就需要对此加以验证,而不是非要直接“看到”它。

根据盖尔曼-茨韦格理论,夸克是一种带 SU_3 味量子数,自旋为 $1/2$ 费米子的三重态。换言之,它们是类似轻子的粒子。因为强子是夸克的复合物,所以不但它们的同位旋和奇异性,而且自旋都应取决于夸克的组合方式。人们也能够对强子激发态(共振)的特性做出预言。正像原子核和原子中存在无数共振态所揭示出来的能谱规律性所涉及的相互作用的性质一样,强子谱也应是夸克相互作用性质的一个重要表现。

现在,让我们模仿原子核和原子理论,设想一个夸克复合模型。因为强子由质量大约相同的夸克组成,所以它们与原子核加以比较,比与原子比较更为妥当。因此,介子由正、反夸克($q\bar{q}$)组成对应于重氢核 $p\bar{n}$ (质子-中子),重子由三个夸克(qqq)组成对应于氦核或氢-3 ppn 。重氢核和氦核是氢(p)的同位素,氢-3是正常氢-1(ppn)的同位素。如果用 u 和 d 夸克取代质子和中子,氦核(α)和氢-3 原子核,分别对应于夸克模型中中子和质子的复合物。故:

$$\begin{aligned} t &= p\bar{n}, & \text{He}^3 &= ppn, \\ n &= u\bar{d}, & p &= uud. \end{aligned}$$

在任何情况下,了解原子核结构的起始点,是假设短力程的引力作用于相对弱结合的核子之间。这样,与核子的静止能量相比,结合能比较小(大约 10% 的量级)。因此,核子的动能也小。引力不区分质子和中子,也不依赖于自旋的相对方向。在大多数情况下,这

些特性决定原子核各种能态的能谱。因为质子和中子之间有质量和电荷差别并存在与自旋有关的力等等原因,所以对上述情况加以修正,就能对核能谱做出准确的说明。

为何不对夸克模型采取同样办法呢?任何人都可考虑这样做。实际上,这些想法是由 F. 格塞、L. A. 拉迪卡蒂和崎田分别独立提出的,后来人们把其称为 SU_3 对称性。实际上,这种推理对于了解各种物理定律的人来说,是没有说服力的,要对此进行说明,需要一些勇气。

其原因是,如果强子是夸克的弱结合态,那么,夸克显然就比强子轻,而且容易把强子分成组成它的夸克。例如,如果把 π 介子分成两个夸克,比 π 介子轻的夸克就应该飞掉,但 π 介子是进行强相互作用粒子中的最轻粒子。从未曾发现过单一夸克这一事实,我们必须得出这样的结论:夸克本身比强子重得多,同时,强子的结合能必须相应地大,以抵销大的静止能量。这宛如把一块重的石头丢入深水中,再把它捞出来很难一样。与汤川秀树的核力不同,用相对论理论就很难解释势能的行为。

二、原子核的类比

上述困难暂且不谈,我们先试试原子核的类比法。首先谈一下介子。如果内夸克力不取决于自旋,能量就会只取决于夸克的相对运动。一般说来,角动量 l 从 0 增加到 1, 2, 3..., 能量也增加,所以基态是 $l = 0$ 。以 $l = 0$ 态为例,总的自旋是 0 或 1, 这取决于每个量值为 $1/2$ 的两个夸克的自旋是平行的还是反平行状态,这里的宇称是负,所以该态可命名为 0^- 或 1^- 。上面的这个论据,与讲费米-杨模型中给出的论据完全相同。根据 $q\bar{q}$ 的组合,可形成 SU_3 的八重态和单态。 0^- 介子对应于包括 π, K 和 η 的赝标多重态。 1^- 粒子被称为矢量介子,并对应于 ω, ρ, K^*, ϕ 和其它共振态。这些是高于 0^- 介子能量时产生的介子,它们衰变成两

脑血流减少和共济失调,奈娃说:“个体对酒精反应各有差异——这个道理是清楚的。”

奈娃研究的第二步是观察饮酒过度的双亲对后代大脑新陈代谢活动的影响,她注意到这些后代本人并没有饮酒过度,然而他们的大脑扫描图像却常有类似酒精中毒者大脑反应。因此,奈娃说:“在酒精中毒者

中有一个亚群,其酒精中毒是有遗传性的。”更有趣的是当父亲有酒精中毒症,下一代的 PETT 图像往往显示典型的酒精中毒者的大脑反应;而当母亲有酒精中毒,则并不出现上述情况。这就是说:父亲可能是遗传学的罪犯,而母亲则不是。

一个 0^- 介子。

现在, 让我们谈谈重子。三个夸克的轨道角动量是零时, 应该是基态。然后, 总的自旋应该是 $1/2$ 或 $3/2$, 这取决于三个自旋的组合。前者必定是重子八重态, 后者为十重态。但为什么在自旋和 SU_3 对称性之间存在着相互关系呢?

这里, 量子力学的统计原理显示出了威力。根据统计原理, 自旋为 $1/2$ 的粒子是费米粒子, 而且服从费米统计。这就是说, 在任何一对夸克交换的情况下, 夸克复合态必须是反对称的。因为在交换过程中, 自旋和 SU_3 对称性标记必须同时改变, 所以为保持反对称特性, 它们之间必须有一种关系。

前面谈到的格塞、拉迪卡蒂和崎田的 SU_3 理论, 实际上实现了上述计划。他们假设, 由 SU_3 对称性标记 (u, d 或 s) 和自旋(向上或向下) 区分出来的夸克的六个态中有对称性, 故取名 SU_6 。

根据 SU_3 对称性理论, 重子可以有自旋为 $1/2$ 的八重态和自旋为 $3/2$ 的十重态, 但人们必须假设有一种非常奇怪的事。被假设为服从费米统计的夸克, 现在似乎服从玻色统计。为说明这一点, 让我们以 Ω^- 粒子为例。因为 Ω^- 粒子的自旋量是 $3/2$, 奇异数是一, 所以它被认为是三个 s 夸克的自旋是平行的态。但在交换的情况下, 夸克是对称的, 这与费米统计的要求相反。但如果忘记这一矛盾, 假定是玻色统计, 那么不仅能够充分解释 Ω^- 粒子, 而且对所有重子的特性, 譬如说它们的磁矩, 也能进行充分解释。

从表面看来, SU_6 理论颇为成功, 但在基本原理上却有许多不能令人满意的地方。比如以刚刚谈过的磁矩为例。理论告诉我们, 将假定每个夸克的质量相当于粒子质量 $1/3$ 的三个夸克的磁矩相加。但这将意味着没有结合能, 把核子分成夸克, 如同把原子核分成粒子一样地容易。但这样的过程还未曾见过。所以像玻色子那样服从玻色统计的夸克, 变得越来越不像真实粒子, 这点无论如何要加以解决。

先让我们暂时把结合能问题放在一边, 只谈统计学问题。解决这个问题第一个建议是由 O. W. 格林伯格提出的。它是一种直接解决问题的方法。根据这种方法, 假定夸克不服从正规统计学。夸克特别服从综合统计学, 在这种统计学里, 可允许一个粒子有一个态。这样的统计学在理论上是已知的, 但用于解决实际问题还是首次。

但这种方法只解决现象问题。如果用它只解决重子问题, 还没有太大的说服力, 需要单独进行其它的试验。碰巧有这种试验。在产生 $q\bar{q}$ 对的反应中, 比如从 e^+e^- 形成介子, 费米统计学表明, 反应的速率或截面, 相当正常值的三倍。换句话说, 综合统计学等于假设夸克的种类相当于以前假设的三倍。

三、具有颜色和味道的夸克

为什么不能简单地把夸克的数目增加三倍呢? 三倍意味着, u, d 和 s 夸克每个都有 3 种。它们具有相同的 SU_3 味量子数, 而且单靠旧的量子数是区分不出来的。所以, 这好像有三个不同的 SU_3 三重态。这三个三重态可写为:

$$u_1, d_1, s_1, u_2, d_2, s_2, u_3, d_3, s_3.$$

这种概念分别是由 M. Y. 韩、南部、宫本、A 塔夫克黑利茨以及其它人提出的。根据这一理论, 共有九个夸克, 通过同时确定横标记和竖标记来加以区分。前者对应于前边讲的 SU_3 味对称性, 后者必定是一种新的 SU_3 对称性。这一新的量子数后来被称为颜色, 以区别于前一种 SU_3 味对称性。

色量子数由三种基本颜色, 即红、绿、蓝或红、黄、蓝来称呼。但旧的标记 u, d 和 s 不特别对应于味道。另外, 现在味道有三个以上, 像以前讲的 c 和 b , 这点以后再加以讨论。本文作者建议, 按照植物分类法, 用“种”代表颜色, 用“族”代表味道。

味(族)			
上	u_1	u_2	u_3
下	d_1	d_2	d_3
奇异	s_1	s_2	s_3
粲	c_1	c_2	c_3
底	b_1	b_2	b_3
	红	蓝	绿
			色(种)

图 1 根据颜色(种)和味道(族)进行的夸克分类

四、九个夸克模型

现在, 让我们回到强子问题上来。什么种类的强子能从九个夸克形成呢? 因为夸克数目已经增加, 所以强子数目也应增加, 但我们已经有了足够的带有三个味道的夸克。当然, 在重子情况下, 必须服从费米统计。

解决上述问题的方法是, 所有的强子都处于“无色”或“白色”态。白色的意思是, 所有三种基本颜色按等份混在一起。就拿重子来说, 红、绿和蓝夸克每种都用, 如同 $qRqGqB$ 的组合一样, 然后按 R (红)、 G (绿)和 B (蓝)的顺序, 取一个适当的平均数。在介子情况里, 具有同种颜色的 q 和 \bar{q} 总是组合在一起, 譬如说 $qR\bar{q}R$, 是取所有颜色的平均数。

因此, 通过假设所有强子无色, 统计学方面的困难就能得到解决。但如果解决这个问题就是该原理的唯一目的, 那么人们必定会说, 这太人为和特殊了。另一方面, 如果有某种充分理由禁止颜色态, 就是说, 具有一种毫无限制的三种颜色混合态, 那么强子的种类就会大量增加。

如果确有这样的理由, 似乎自然就可以假设, 从一

开始它就富有说服力。这就是说,的确存在颜色态,但比无色态重得多,目前进行的实验,还不能产生颜色态。如果把这种情况与原子的情况加以比较,就容易理解了。这里,“白色”意味着正电荷与负电荷彼此互相抵消的中性态,或者换句话说,意味着是非电离原子。颜色态是带某些净电荷的离子。显然,离子有较高的能量,易于变回到中性原子,这是因为库仑引力作用于相反的电荷之间。

让我们把这一比拟用于颜色。我们能创造一种类似于库仑力的力,它与夸克颜色成正比,而且在无色态中变为零的理论吗?幸运的是,具有这种特性的理论存在,它被称为杨-米尔斯理论。这一理论是杨振宁和 R. L. 米尔斯在 1954 年提出的,现一般称作为非阿贝尔规范场理论。

五、有带色的强子吗?

即使可在中性原子和无色强子之间方便地进行类比,这也不是最后一个问题。正像我们可以使原子电离一样,我们也应该能够使强子电离,把它们变成颜色态。我们只假设这一电离需要大量能量。

准确地说来,到底是多大的能量,这些颜色态的质量又是什么呢?因为这些态包括单个夸克本身,所以这些问题又与自由夸克问题密切相关。

现在,让我们设法想出一些试验,看有颜色的强子是否存在,或者看三个带颜色的夸克是否确实存在。如果强子可以电离,那么强子间或强子和轻子之间对撞的能量超过一定的值后,就应该能够发生电离反应。因此,超过某一阈;对撞截面就应该增加,而且可以发现新的带颜色的共振态。换句话说,我们期望在远远大于现在进行的强子对撞实验的能量时,看到截面有很大的增加。

再重复讲一下,夸克也是有颜色的状态,但有重要的一点必须在此加以说明。夸克有颜色和味道,味道 u , d 和 s 方面的差别,也意味着电荷上存在着差别。因此,在颜色态中,应该有像夸克这样的分数电荷态,也应该有像普通重子和介子那样的整数电荷态。前者采用直接测量电荷的办法,就足以把粒子识别出来。

味 \ 色	u	d	s
红	1	0	0
绿	1	0	0
蓝	0	-1	-1
平均值	$\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$

图 2 韩-南部模型中夸克电荷的赋值

另一方面,整数电荷态不管有无颜色,都具有相同的电特性,所以要把颜色态和无色态区别开来更为困难。

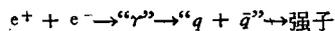
六、夸克带整数电荷的可能性

夸克本身可能带整数电荷,故难以发现。一旦采用三种颜色,这种可能性自然就会增加。这里假定电荷不但取决于味道,而且取决于颜色。如果给定某个颜色的夸克带整数电荷,但三个颜色的平均数是分数,那么无色强子内的夸克看起来就会像盖尔曼和茨韦格的无色带分数电荷的夸克。

这一概念被称为韩-南部模型。图 2 清楚地显示出电荷的赋值。

根据这一假设,夸克像正常的重子,所以这一理论接近原来的坂田模型。但这里的夸克质量比正常重子的质量要大得多,因此,它们可能是衰变成重子和介子的不稳定粒子。迄今还没有证据表明,它们是带分数电荷还是带整数电荷,是稳定还是不稳定粒子。

但我们不能就此退缩。还有一个强有力的实验,这就是通过正负电子对撞形成强子的反应。该反应按照下面表示的步骤进行(“ γ ”表示虚粒子):



因此, γ 作为一种媒介,把电子对变成夸克对,夸克对然后通过强相互作用变成几个强子。因为在高能量时形成夸克对的几率(截面)与夸克对电荷的平方成正比,所以通过把所有反应相加所得出的总截面,应与所有夸克电荷平方的和成正比。例如,盖尔曼-茨韦格的 u , d 和 s 夸克的电荷的平方和为:

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

但如果三个颜色,所有九个夸克必须相加。在这种情况下, $R = 2$ 。在韩-南部夸克例子中, $R = 4$, 这个可立刻从图 2 中看出来。(这里总的截面包括产生颜色强子。如果只局限于无色强子,那么就象以前一样, $R = 2$)

在六十年代,实验可提供的能量最高达几个 GeV, 测量到的 R 的值接近 2, 不是 $2/3$ 或 4。这被认为是明显表明带分数电荷的颜色夸克存在。如果把能量再提高一些,情况又会怎样呢?

七、没料到的 J/ψ 新粒子

为澄清上述问题,斯坦福直线加速器的科学家们进行了更精确的实验。1974 年,一个没有被人们预料到的情况发生: J/ψ 新粒子被发现。科学家们花费了相当一段时间,才搞清 J/ψ 粒子的性质。最后,人们一致认为, J/ψ 粒子不是个颜色强子,而是个被称为粲粒子带有新味道的夸克组成的无色强子。

(编译者: 侯儒成)