



二十年前,在夸克模型刚建立之初,人们就感觉到它还存在着一些麻烦.泡利不相容原理排除了许多众所周知的态,特别是组成 $\Omega^-$ 粒子的三种相同的奇异夸克组态也被排除了,这使夸克模型陷入严重困难.正是这个强子 $\Omega^-$ 的发现,才证实了八重法.

在那个时候,很多人不愿承认存在着“带分数电荷的夸克”的观点,因为从来没有看到过分数电荷粒子.泡利则认为夸克至多不过是记述的一种手段,并非物理粒子.另一方面,某些过于乐观的人却认为由于夸克是奇怪的粒子,所以它们就可能“遵循”某些奇怪的法则.因而泡利原理的应用就可能包含着某些隐衷.

今天我们都承认夸克的确是遵循泡利原理的.这个所谓隐衷也就是每个夸克味(上,下,奇异等)可以以“红”、“黄”、“蓝”三种色的任何一种而存在.这样,比如 $\Omega^-$ 中的每个奇异夸克都有不同的色,他们就再也不全同了.泡利可以满意了,因为 $\Omega^-$ 能够存在了.

夸克力理论的产生在很大程度上是靠了色的思想.色表现为一种荷的形式,就象普通电荷一样.由此,一种相对论的量子场论——量子色动力学发展了起来.它在解释高能强相互作用方面的成绩已为人所共知.但是,将它应用到夸克束缚态(强子)的研究上就产生了新的,令人激动的问题.一大堆新的强子产生了:胶子、混合子、两性子,但它们一个也没有被肯定地观察到.在过去几年里,人们一直在加强这方面的研究.

### 色力是怎样起作用的

电荷是电磁力的来源.每个小孩都知道同性电荷相斥,异性电荷相吸的道理.夸克本身有电荷所以才会感受到电磁力.这就是为什么甚至象中子这样的无电荷粒子也发生电磁相互作用的原因,因为它包含带电荷的组分.夸克也有色,看起来它是荷的一种形式,它产生的力的行为与普通电荷是类似的,但性质上有重要区别,因为有三种不同的色,而普通电荷只不过有正电、负电之分罢了.假设夸克是带正电荷,反夸克就带相应的负电荷.那么反向相吸,比如一个红夸克和

一个反红夸克,就构成了我们所熟悉的胶子的介子.三种色的存在使可能的相吸比在简单的电磁情况下丰富得多.就象同电荷相斥一样,同色也相斥.就相吸而论,法则要稍加推广.不仅相反能够相吸,而且不同的色,如红、蓝夸克,在某些条件下也可以相吸.我们必须把两个带色物体的量子态也考虑进去.在交换色标记时,如果它是反对称的,色物会相互吸引,如果是对称的,它们就会互相排斥.

这种微妙情形是量子色动力学(一种非阿贝尔理论)固有的.与此相类似的,我们所熟悉的核同位旋交换力也存在此种情况.两个质子或两个中子是味对称的,从本质上说它们的力是相互排斥的.当处于对称态时,一个质子和一个中子是互为排斥的,但当处于反对称态时(同位旋标量)它们是互相吸引的.

三重色力作用的形式是上述情形显然的推广.夸克成对有三种方式,红黄,黄蓝或红蓝.第三个夸克只有在它的色与原来的一对的色不同,并且其量子态在与任何对的色标记交换时反对称才会受到这对的强烈吸引.这样红、黄、蓝就形成了一串,产生质子,中子和人们所熟悉的重子.注意:这些斥力和吸引力作用的形式必然迫使重子中的三个夸克具有不同的色.

加入这三粒子团的第四个夸克会与前三个夸克中的一个有同样的色,因而也会不可避免地受到排斥.但与此同时它受到另两个夸克的吸引.吸引和排斥两者到底谁能战胜谁呢?在这样情形下,它们恰好是平衡的.引力只是在反对称组合之间起作用.这种组合态存在的可能性只有百分之五十,考虑到两个夸克在吸引着新来者,而另一个夸克在排斥它的事实,结果只能是互相抵销.虽然这个数学式的例子并没有说明色电离(即自由夸克的存在)为什么不行,但我们至少可以看到色力类别的不同是如何产生了我们已观察到的夸克和反夸克团的.强子虽然没有净色,但因为有色子组份,所以它们能感受到强相互作用.

胶子与色的关系就象光子与电荷的关系.光子能传递电力但本身并不带电.因此它们可以在空中自由游荡.胶子不但能直接传递色,而且在传播的时候还感受到这种色力.这样色力的空间行为就不同于电磁力.这就导致了一个全新的粒子谱学.

### 胶子和胶子球

如果胶子带色,它们就能为色力所吸引.这样,人们就可以设想胶子束缚态的存在.这种胶子束缚态原来被称为胶介子,现在以“胶球”为人所共知.还存有包括夸克和胶子的“混合”强子(也称两性子或梅克子)

作为激发了的自由度。

借助于上面启发式的图象,比如: 当一个红夸克被一个反蓝夸克所吸引时,一个混合介子就生成了. 这些不同的色互相吸引但并不互相中和,带色胶子可被这红夸克和反蓝夸克对所吸引因而使色力中性化. 这样,无色的夸克-反夸克-胶子团就形成了一个混合介子. 混合重子的存在也已被预言到了. 这里把胶球和混合子说成是“胶子激发”是为了将它们与常规夸克激发区别开来.

那么产生并且证认胶子激发的希望如何呢? 几年前存在着普遍的乐观情绪,认为答案是肯定的. 今天,对于胶球的证认并没有多少把握,虽然还有人乐观地认为胶球可以在实验室内轻易的产生出来. 正是在这种实验中发现的新的强子态有一点自相矛盾,才导致了这种看法上的变化. 为什么呢? 近四分之一世纪以来,我们研究了 $\pi$ 介子、质子和其它一些粒子成百万次的相互作用. 在此过程中,我们发现了许多共振态,这些共振态集体建立了强子物质的夸克模型. 相当多的信息表明这一模型是正确的. 夸克模型中包括一切现存的,已经确认的共振. 强子质量的分类已经由量子色动力学合理地解释了. 夸克之间的自旋相关色力,定性地、甚至有时是定量地说明了观察到的能级模式. 这些“古典的”实验已经包括了夸克流和夸克靶(存在于母体强子中),所以夸克团在多数情况下被产生出来,特别是如果研究近前方向的残留物时,情况是如此.

要产生胶球,必须先摆脱掉夸克或到夸克“不想”去的地方去观察. 西欧核子研究中心采用了后一种方法,它的几个实验组一直在观察碰撞中心区生成的强子,特别是在交叉储存环上,两束夸克流飞掠而过,由此而生成的胶子可以产生共振并形成胶球.

这里困难是明显的. 谁能肯定在被研究的区域内夸克是完全不相关呢? 当然,如果你能有幸发现两个或三个以前在任何地方都没有被发现过的突出结构,就象著名的  $J/\psi$  那样,那么通向成功的道路就摆在你面前了. 不幸的是,大自然并不经常赐给我们这种礼物. 甚至当她这样做的时候,要真正知道我们所发现的到底是什么也是不容易的.

这可用击毁夸克的实验来说明. 在那里,已经清楚地看到存在着新的态,而理论物理学家们还在竞相发表着论文,争论着这些态到底是他们寻找的胶球呢还是常规夸克的激发组态.

这些实验包括能产生  $J/\psi$ ,  $r$  粒子类的重介子的能量的正、负电子湮灭.  $J/\psi$  包含一个粲夸克和一个反粲夸克,  $r$  粒子由一个底夸克和反夸克所组成. 这些态之所以能够生存只是因夸克和反夸克并不互相湮灭. 当他们互相湮灭时,他们的能量就转成为辐射,也就是光子或胶子,然后胶子才能形成胶子团. 至少从

理论上说目前是这样的,一个光子加介子的衰变道特别引起人们的兴趣,从理论上说,  $\phi$  衰变应有七分之一是这种衰变道.

约有百分之十五的  $\phi$  衰变的确是辐射性的. 所以定性上猜想胶球的存在定量上似乎也是说得通的. 如果一种新态出现在伴随光子的残留物中,那么它很可能是胶子性的. 已经发现的新态有:  $\tau$  (埃奥塔)  $\nu$  (西塔) 和去年夏天在 SPEAR 环上, Mark-III 组发现的 2.2GeV 的两个  $k$  介子共振. 然而这一好消息在某种程度上被这样一个事实冲淡了,即在这些数据内几个其它有名的介子也是很突出的,也就是  $f(1270)$ ;  $\eta$  和  $\eta'$ . 乐观主义者们以此为证据认为  $\eta, \eta'$  的确与胶子有密切的关系并且指出说,在  $f$  附近已经发现了有趣的结构,但几年来一直没有被人们所重视. 这就是说有一些人认为  $f$  可能不仅仅是我们所想象的简单的、理想的夸克组合.

如果胶子态的衰变行为更好一些的话,那么它们就可能更清楚. 最初的猜想是这样,即然胶子没有味,它们的衰变产物在奇异和非奇异粒子之间就应该是均匀分布的. 但  $\tau$  却大量衰变成含有  $k$  介子(奇异)的终态,而不是其它的非奇异态. 这与“世俗传说”对胶球的期望正好相反. 同样,  $\nu$  和新的 2.2GeV 态也不甘心衰变成很多  $\pi$  介子. 这些态可能是常规的夸克态或是异常的多夸克组合态.

由于在胶球问题上碰到了困难,理论物理学家们最近越来越注意到这样的可能性,即胶子在谱中的其它表现可能更易于进行实验. 因此人们的注意力越来越集中在混合强子上,在这里夸克和胶子都是作为激发的自由度而发生的.

人们用了各种各样的方法研究混合强子的性质. 在某些袋模型中,最低能态由夸克和单胶子组成,在另外一些情况下,它们对应于夸克之间的弦激发. 伴随夸克的单胶子允许奇特态的存在,这些奇特态的量子数在正常情况下是不可能出现的. 理论对某些这种态寄予希望,它们虽在  $J/\psi$  的辐射衰变中被抑制,但在西欧核中心 LEAR 环上未来将要进行的低能质子-反质子实验中可能会被发现.

这些新态从理论上只用规范变换是不能避免的. 从夸克和胶子之间的色力所产生的自旋相关能量移动已为许多研究组所计算,结果都是一样的. 这些结果使我们想起了用包括  $\pi$  介子和  $k$  介子的介子九重态所看到的情况.

某些理论物理学家利用了这一点,从而证明这些介子质量模式并不难于理解,而代价是夸克-反夸克和混合态的极不纯的组合. 这一可能性比人们可能预想的还要难以排除. 的确,由于对整个混合理论的怀疑,近几个月来人们广泛地探讨了重子的含义.

然而就介子来说,混合态可能隐藏在这个领域实

验的不确定性之中。但谁又敢肯定重子谱已被人们理解到这样完善的程度以至于没有存在大量新态的余地了呢？结果是令人吃惊的。首先来看电磁性质：如果质子含有一种成份，它由夸克组成的色八重态和使这种色中和化的胶子组成。人们就会预期泡利定理将大大影响夸克的味和自旋的平衡以至破坏有关重子磁矩的理论预言，特别是著名的质子，中子磁矩的 3:2 比例的理论预言将被冲垮。但事实上这并没有发生。质子被光子激发成混合态的可能性已被计算过了，但这种可能似乎很小。重子谱看来也是没问题的。

由此人们就要问混合态或胶性介子存在的前景如何呢？在胶性介子上，看来人们都同意标量（类真空）态应该是最轻的，大约是 0.5 到 1.5 千兆电子伏，其它的态应该重一些。这种标量胶性介子的存在从理论上受到广泛支持，但它在  $J/\psi$  的辐射衰变中还没有被观察到，这一衰变被认为是最好的胶子工厂。但却观察了其它一些潜在的胶性介子态。

这种标量有可能隐藏在  $f(1270)$  之下吗？它有无可能窄于 600MeV，因而在两  $\pi$  介子谱分析中被忽略了？这些理论问题与真空有关吗？夸克和胶子之间的相互作用根本上改变了胶子之间单独相互作用的理论图象吗？

这最后一个问题特别值得探讨。正如一些介子是多种夸克味的混合体一样，胶性介子也可能是夸克和胶成份的强混合叠加。如果介子通常是很不纯的夸克和胶子混合体，那么寻找单个的，可以辨认的，纯胶性态就有困难了。我们可能不得不在某些质量区内寻找存在“过剩”态的证据，而这与单纯夸克模型不一致。至于新的自由度，比如胶子激发则需要引发。

虽然大自然并没有赐给我们这样的礼物，但另外一种方法也许有助于我们证认有重要胶性成份的各种态。胶性强子均等地衰变成各种味的世俗说法是以夸克-胶子耦合与味没有关系为基础的。然而，这种理论是过于简单的。一般而言，对奇异夸克的作用力与对非奇异夸克的作用力是不同的。很自然，人们会期望这将抑制奇异粒子的产生而有利于较轻的非奇异粒子的产生。在强子物理中，这一现象是众所周知的，人们一般都认为从真空中生成轻夸克要比生成较重的奇异夸克容易得多。

如果认为这一理论也同样适用于胶性态的衰变那可能是危险的。当然，当人们计算（用袋模型）胶子和夸克的耦合时，会发现一个胶子与一个夸克和反夸克对的有效耦合强度，对奇异对会非奇异对大得多。因此，即使重夸克之间交换胶子与轻夸克间相比受到抑制，在某些情况下，一个重夸克对的产生还可能会增强。

这就是说胶性态在衰变中可能会首先生成奇异夸克和反夸克，有些胶球和混合介子可以有包含多到四个  $k$  介子的重要衰变道。一个奇异夸克和奇异反夸克的常规束缚态将衰变成一对  $k$  介子，但包含四个  $k$  介子的衰变是以牺牲  $\pi$  介子为代价的。这是一个相当出乎意料的现象。高于 2GeV 的张量（自旋为 2）胶球被认为是包含二个胶子，每一个胶子都倾向于产生奇异夸克。这样， $\phi$  介子对和四个  $k$  介子会有可区分的特征。用袋模型对  $\pi$  进行的胶球解释需要它包含一个容易衰变为奇异夸克的胶子。这些奇异夸克的色并不是中和的，因而它们不能作为一个  $\phi$  介子出现，而必须分开，最后成为不同的奇异强子。这与人们发现的在  $J/\psi$  衰变中的各种新态的奇异粒子衰变是一致的。

在负  $\pi$  介子和质子对撞实验中，已经宣布在  $\phi$  介子对胶性生成中存在着三个张量介子，在其它道并未发现。在刚好高于 2GeV 的能区内，预料一个张量胶球和一个混合张量态具有“这种奇异倾向”；包含一个奇异夸克-反夸克对的张量介子激发态也在这个质量上，因此较大的混合应当发生。这将有助于解释它们的大衰变宽度。

在胶性衰变中生成奇异粒子的倾向可能还不仅仅是这个模型的产物。然而，如果大自然的行为确是如此，那么对多  $k$  介子道的研究可能是很有益的。如果结构在这些道中被观察到，并且在“胶子喜欢”的过程中被产生，那么建立胶性激发谱的真实前景就在我们面前了。

大家似乎都相信存在着胶性态，但要可信地证认它们，则需要对常规介子谱有新的认识，由于胶子在事物的本性中起着基本的作用，如果胶性态只能被专家们在强子谱中看到，那将是令人十分烦恼的。

（许同舟 译 杜东生 校）