

# 胶子球与混合态

沈齐兴

由于粒子物理实验和理论所取得的进展，现在已经清楚，层子和胶子是组成强子的基本组元。但是，层子是怎样通过以胶子为中介的强相互作用结合成强子的？除了由层子构成的普通强子（由一对正、反层子 $q\bar{q}$ 构成的介子和由三个层子构成的重子）外，自然界是否还存在由胶子构成的胶子球（由二个胶子 $gg$ 或多个胶子构成的纯胶子束缚态）？是否存在由层子和胶子一起构成的混合态（例如由一对正、反层子加上一个胶子或三个层子加上一个胶子构成的束缚态）？这是人们一直十分关心的问题。

量子色动力学（QCD）所描述的胶子的存在，最初是在电子和质子的深度非弹性散射实验中发现的。1975年以来，在美国斯坦福直线加速器中心（SLAC）的 SPEAR 贮存环上和在汉堡的德意志联邦共和国电子同步加速器实验室（DESY）的 DORIS 贮存环上工作的几个实验组，在正、负电子对湮灭成强子的反应中发现有二喷注、三喷注（ $q\bar{q}g$  喷注）和四喷注（ $q\bar{q}gg$  喷注）现象，其结果和 QCD 的计算符合较好。这些都为胶子的存在提供了直接的证据。如果我们能从实验上进一步确认胶子球和混合态的存在，这无疑是对 QCD 理论的强有力的支持。

## 色荷和色相互作用

在描述强作用力的 QCD 理论中，“色”量子数起着十分重要的作用。因此，我们首先来谈谈，为什么要引入“色”这个概念。我们知道，在 1974 年发现  $J/\psi$  粒子以及 1977 年发现  $\gamma$  粒子后，人们逐渐认识到层子至少有上（ $u$ ）、下（ $d$ ）、奇异（ $s$ ）、粲（ $c$ ）、底（ $b$ ）和顶（ $t$ ）六类通常把它们称为层子的味。按照 1961 年由盖尔曼（Gell-Mann）和尼曼（Ne'eman）提出的八重态强子分类方案， $\Omega^-$  粒子是由三个完全相同的  $s$  层子构成的自旋为  $3/2$  的  $s$  波束缚态，这个重子态对于组成它的这三个层子的味和自旋指标是全对称的，三个层子的空间波函数也是全对称的  $s$  波，所以， $\Omega^-$  粒子处于三个层子的全对称态，这和层子是自旋为  $1/2$  的费米子，应当服从费米-狄拉克统计的基本假定相矛盾。为了解决这个矛盾，美国 Duke 大学的 Mooyoung Han 和芝加哥大学的 Yoichiro Nambu 等人引进了“色”这个概念。他们认为，层子除了有味量子数外，还存在色量子数，每一种味的层子都能以三种方式出现，即它们具有三种不同的色，通常记为红、黄、蓝三色。引入色量子数后， $\Omega^-$  粒子中的三个  $s$  层子只要分别具有红、黄、蓝三色，它们就不再是全同粒子了，它们在新的色自由度中处于全反对称状态。这样，总的来说  $\Omega^-$  将处于三个层

子的全反对称态，这就解决了与统计性的矛盾。三种色的引入也使正、负电子碰撞产生强子的截面和产生正、负  $\mu$  子对截面的比值  $R$  以及  $\pi^0$  介子衰变成二个光子的衰变率得到了合理的解释。

与电荷相类似，色也是以荷的形式出现的。所以由色荷引起的色力和由电荷引起的电磁力在某些方面也是类似的，色力理论就是通过与电磁理论的直接类比而构成的。

大家都知道，当二个带电粒子彼此接近时，它们都会感受到一个作用力，如果这二个粒子所带的电荷相反，这种力是吸引的，反之，力是排斥的，这个力就是电磁力。一切带电粒子之间都有电磁作用，中子虽然是电中性的，但是组成中子的三个层子（ $udd$ ）都是带电的，它们都受到电磁力的作用，正是由于这个原因，电中性的中子也参与电磁相互作用。

由色荷引起的色力也有同色相斥、反色相吸的性质，但是由于色荷的多重性，色力比电磁力要复杂得多。电荷只有正、负两种形式，而层子能携带红、黄、蓝三种正的色荷，相应的反层子携带反红、反黄、反蓝三种负的色荷。和同类电荷相斥一样，相同色荷（红与红、黄与黄、蓝与蓝）之间相互排斥，但不同色荷之间的情况就复杂多了，相反的色荷之间（红与反红、黄与反黄、蓝与反蓝）是吸引的，但不同类色荷之间（例如红与黄、黄与蓝等）可能是吸引的，也可能是排斥的，取决于二个带色体所处的状态。如果在色指标的交换下它是反对称的，那么这两个色荷之间是吸引的；如果是对称的，则这两个色荷之间相互排斥。

正如正、负电子由于电磁引力的作用可以构成束缚态（通常称它为电子偶素）一样，色荷之间的引力也能使层子构成束缚态。具有同类色荷的层子与反层子（例如红色层子与反红色的反层子）之间有很强的色引力，在它的作用下层子和反层子被紧紧地束缚在一起构成一个强子，这就是大家熟悉的普通的介子。这样构成的介子是无色的（即通常所说的是  $SU(3)$  的色单态）。

三个层子之间色力的作用方式只是简单的推广。前面已讲过，相同色荷之间肯定是排斥的，但不同类色荷之间在一定条件下可以是吸引的。二个层子之间有吸引力的只有红色层子和黄色层子对、红色层子与蓝色层子对以及黄色层子与蓝色层子对三种情况。所以只有当第三个层子的色荷和原先这一对层子中的任何一种色荷都不一样，而且在任何一对层子的色指标的交换下是反对称时，第三个层子才能被原先这一对层子很强烈地吸引。因此，只有红、黄、蓝三种层子聚集在一起时才能构成束缚态，这就是包括质子、中子在内的普通的重子。

正如电中性的中子可以参与电磁相互作用一样，

虽然强子都是无色的，但构成强子的组元层子都是带色荷的，都受到色力的作用，因此由层子构成的所有强子都参与强相互作用。

我们知道，带电粒子之间的电磁力是通过发射和吸收光子来传递的，同样，带色层子间的色力是通过发射和吸收胶子来传递的，胶子和光子一样，都是无质量的粒子，因此，色力和电磁力都有无限大的力程。但是胶子和光子有着重要的差别。光子是不带电荷的，在带电粒子发射或吸收光子时不会改变带电粒子的电荷；由于光子不带电，光子和光子之间也不会发生直接的电磁相互作用。可是胶子本身是带色荷的，在传递色力时，层子的色荷可以改变。这种性质可以形象地用表 1 表示。在这个表中  $q_{\text{红}}$ 、 $q_{\text{黄}}$ 、 $q_{\text{蓝}}$  分别代表三种色的层子， $G$  表示各种可能的胶子，第一行中的任意一种带色的层子（例如红色层子）可以通过发射这一列中的任何一种胶子（例如胶子  $G_{\text{红}-\text{蓝}}$ ）而变成这个胶子所在列左端那种色的层子（即蓝色层子）。这种过程也可以反过来进行，即第一列中的任意一种层子（例如黄色层子）可以通过吸收这一行中的任意一种胶子（例如胶子  $G_{\text{红}-\text{黄}}$ ）而变成这个胶子所在列顶端的那种层子（即红色层子）。表中对角线上的三种胶子 ( $G_{\text{红}-\text{红}}$ 、 $G_{\text{黄}-\text{黄}}$  和  $G_{\text{蓝}-\text{蓝}}$ ) 的发射或吸收不会改变层子的色，这三种胶子中只有二种是独立的，任何一种都可以表示成另外二种的组合，所以独立的胶子只有八种。另外，由于胶子本身带色荷，胶子之间存在自相互作用，一种形式的胶子可以通过发射或吸收某种胶子而变成另一类胶子。

表 1

		发射初态或吸收终态		
		$q_{\text{红}}$	$q_{\text{黄}}$	$q_{\text{蓝}}$
发射终态或 吸收初态	$q_{\text{红}}$	$G_{\text{红}-\text{红}}$	$G_{\text{黄}-\text{红}}$	$G_{\text{蓝}-\text{红}}$
	$q_{\text{黄}}$	$G_{\text{红}-\text{黄}}$	$G_{\text{黄}-\text{黄}}$	$G_{\text{蓝}-\text{黄}}$
$q_{\text{蓝}}$	$G_{\text{红}-\text{蓝}}$	$G_{\text{黄}-\text{蓝}}$		$G_{\text{蓝}-\text{蓝}}$

因为胶子带色荷，它们也可以通过色力相互作用彼此吸引而构成色单态。例如胶子  $G_{\text{红}-\text{黄}}$  和胶子  $G_{\text{黄}-\text{红}}$  可以构成色单态；胶子  $G_{\text{红}-\text{黄}}$ 、 $G_{\text{黄}-\text{蓝}}$  和  $G_{\text{蓝}-\text{红}}$  也可以构成色单态，这种由二个或多个胶子构成的无色束缚态称为胶子球。另外，层子和胶子一起也能构成色单态，例如胶子  $G_{\text{蓝}-\text{红}}$  可以被由红层子和反蓝的反层子组成的这对层子吸引而构成色单态；红层子、黄层子和蓝层子组成的层子团也可以吸引一个胶子  $G_{\text{红}-\text{红}}$  而构成色单态，这种既包含层子，又包含胶子的无色束缚态叫做混合态。胶子球和混合态的存在是 QCD 理论的重要预言。

### 理论预言

目前有不少以 QCD 为基础的唯象模型和方法可

以用来探讨胶子球和混合态的性质。例如美国麻省理工学院(MIT)的口袋模型、位势模型、弦模型以及由美国康奈尔大学 K. G. Wilson 首先提出的格点规范理论与 Monte Carlo 模拟计算方法等等。用这些模型和方法可以确定胶子球和混合态的各种可能的状态，可以粗略地估计它们的质量谱以及一些可能的衰变过程的衰变率。但是，要从实验上完全确认它们仍然是十分困难的。这是因为它们的寿命是极其短暂的，例如胶子球的寿命估计只有  $10^{-23}$  秒的量级，因此要单独产生胶子球并对它们加以观测将是十分困难的，我们只能从它们的衰变产物来分析、推断出它们的存在。可是，到目前为止还没有一个十分可靠的方法能精确地计算出胶子球（或混合态）的质量和各种衰变方式的衰变率。另外，唯象模型预言的胶子球和混合态的质量大约在 1GeV 到 2GeV 左右，而在这个能量范围内存在大量的由正、反层子构成的介子。在表中我们给出了由二个和三个胶子构成的胶子球  $gg$  和  $ggg$ ，由正、反层子和一个胶子构成的混合态  $q\bar{q}g$  以及由正、反层子构成的普通介子  $q\bar{q}$  的一些可能的较低能态，其中  $J$ 、 $P$  和  $C$  分别代表态的总角动量、空间宇称和电荷共轭宇称。表中用记号“ $\checkmark$ ”表示这种态是可能存在的，“ $\times$ ”表示这种态不可能存在（在假定胶子质量为零的一些模型中  $1^{++}$  和  $1^{-+}$  胶子球是不存在的，但在假定胶子为有质量的矢量介子的位势模型中这些态是可能存在的，所以我们把它们作为可能的状态）。从表中我们看到，对于大部分的胶子球和混合态，都存在相应的普通介子态，对于这样的胶子球（或混合态）即使实验上发现了它们，我们也很难断定它们到底是胶子球（或混合态），还是普通介子。正是由于大部分胶子球和普通介子有相同的量子数  $J^{PC}$ ，所以有人认为胶子球和普通介子可能有很大的混合，胶子球可能就潜藏在熟知的那些普通介子态中（例如，质量为 1273MeV、 $J^{PC} = 2^{++}$  的  $f$  粒子很可能含有很大的胶子球分量）。

因此，为了在实验上产生和辨认胶子球或混合态，我们必须了解它们的各种性质，尤其是它们最可能的产生方式和可能的衰变产物。 $J/\psi$  粒子（层子  $C$  和反层子  $\bar{C}$  的束缚态）的辐射衰变是产生胶子球的最理想的一类过程。我们知道，对于  $J/\psi$  粒子，除了大约百分之二十的电磁衰变外，它的主要衰变方式有二种：一种是先衰变成三个胶子，然后这些胶子经终态相互作用变成普通强子；另一种是先衰变为一个光子和二个胶子，这二个胶子再经终态相互作用变成普通强子。对于后面这类辐射衰变过程，由于  $J/\psi$  粒子和光子都是无色的，这时二个胶子可以构成一个无色的束缚态，而且有连续的能量谱。按照 QCD 的计算，在这二类衰变中辐射衰变差不多占百分之十五，所以， $J/\psi$  的辐射衰变过程是产生由二个胶子构成的胶子球的十分理想的过程。

表 2

$J^{PC}$	0++	0+-	0-+	0--	1++	1+-	1-+	1--	2++	2+-	2-+	2--	3++
$gg$	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✓
$ggg$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
$qqg$	✗	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓
$q\bar{q}$	✓	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓

### 实验上的寻找

近几年来，正是从  $J/\psi$  粒子的辐射衰变过程中发现了好几个胶子球的候选者。1980 年，SLAC 的一个研究组用 Mark-II 探测器发现了一个质量为  $1440\text{MeV}$ ，宽度大约为  $50\text{MeV}$  的新粒子，他们把这个粒子命名为  $\epsilon$ 。这个粒子是在下面这个过程中发现的：

$$\begin{array}{c} J/\psi \rightarrow \gamma \epsilon \\ \downarrow \\ \rightarrow K_s K^\pm \pi^\mp \end{array}$$

一年后，SLAC 的另一研究组用晶体球探测器在类似的反应过程中也观测到了这个粒子，并用分波分析确定了这个粒子的量子数  $J^{PC} = 0^{-+}$ 。就在这一年，他们还在

$$\begin{array}{c} J/\psi \rightarrow \gamma \theta \\ \downarrow \\ \rightarrow \eta \eta \rightarrow 4\gamma \end{array}$$

过程中又发现了一个新粒子  $\theta$ ，它的质量为  $1670\text{MeV}$ ，宽度约为  $160\text{MeV}$ 。他们基本上测定了这个粒子的  $J^{PC}$  是  $2^{++}$ 。后来，用 Mark-II 和 Mark-III 探测器的二个研究组也先后在过程

$$\begin{array}{c} J/\psi \rightarrow \gamma \theta \\ \downarrow \\ \rightarrow K^+ K^- \end{array}$$

中发现了这个粒子。前者还在  $J/\psi \rightarrow \gamma \rho^0 \rho^0$  过程中发现了双  $\rho^0$  介子的共振态，由于质量和宽度和  $\theta$  粒子十分接近，有人认为这个新粒子就是  $\theta$  粒子。1983 年夏天，SLAC 用 Mark-III 探测器的研究组在过程

$$\begin{array}{c} J/\psi \rightarrow \gamma \xi \\ \downarrow \\ \rightarrow K\bar{K} \end{array}$$

中又发现了一个新粒子  $\xi$ ，它的质量为  $2200\text{MeV}$ ，宽度为  $30\text{MeV}$ 。

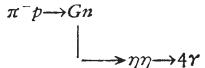
这些新粒子的发现引起了人们广泛的兴趣，对这些新粒子的种种猜测接踵而来。由于  $\epsilon$  粒子是在一个有利于胶子球产生的过程中以很大的分支比产生的，它的质量和多种理论计算的赝标胶子球的质量很接近，它的宽度和人们对胶子球的宽度大约是几十  $\text{MeV}$  的估计也符合，所以许多人相信  $\epsilon$  粒子是一个胶子球。但是，也有人认为胶子球是无味的，它应当具有味对称的衰变，或者说，它们衰变成奇异层子和衰变成非奇异层子的几率应当是一样的，可是实际上观测到的  $\epsilon$  粒

子到  $K\bar{K}\pi$  的衰变率比到  $\eta\pi\pi$  的衰变率大得多，所以他们认为  $\epsilon$  粒子不可能是胶子球，可能是径向激发的赝标介子九重态的一员（另外八个成员是  $\pi'(1300)$ 、 $K'(1400)$  和  $\zeta(1275)$ 。）但又有不同意见，他们说，胶子球的味对称衰变假设的基础是胶子一层子之间的耦合是和层子的味无关的，可是在用 MIT 口袋模型计算胶子和层子的耦合时发现，胶子可以分成横电 (TE) 和横磁 (TM) 两类，其中 TE 胶子和正、反层子对的等效耦合强度基本上与味道无关，而 TM 胶子和奇异的正、反层子对的等效耦合强得多，这意味着 TM 胶子可以优先产生奇异的层子和反层子对，这样，由一个 TE 胶子和一个 TM 胶子构成的胶子球将优先衰变成包含奇异层子的介子，所以  $\epsilon$  粒子很可能是这种类型的胶子球。当然这毕竟只是一种在特定的唯象模型下的计算结果，为了真正排除  $\epsilon$  粒子属于赝标介子九重态，必须在实验上找到这个九重态的第九个成员。对于  $\theta$  粒子，目前仍然存在许多不同的看法，有人认为它可能是一个胶子球，因为不少理论（例如 MIT 口袋模型和格点规范理论）都预言  $J^{PC} = 2^{++}$  的张量胶子球的质量约为  $1700\text{MeV}$ 。也有人在分析了  $J/\psi \rightarrow \gamma \rho^0 \rho^0$  的实验结果后指出，在这个过程中发现的双  $\rho^0$  介子的共振态和在  $J/\psi \rightarrow \gamma K^+ K^-$  等过程中发现的  $\theta$  粒子是两个不同的粒子，后者很可能是一个张量胶子球，而前者更可能是一个由两个层子和两个反层子 ( $q\bar{q}q\bar{q}$ ) 构成的所谓四层子态。还有人认为， $\theta$  粒子也可能是由一对正、反层子和一个 TM 胶子构成的混合态 ( $q\bar{q}g$ )。对于  $\xi$  粒子，有人认为它也是胶子球的候选者。

可能产生胶子球的另一类较理想的过程是  $\pi$  介子和质子的碰撞过程。欧洲核子研究所 (CERN) 和美国布鲁克海文国家实验室 (BNL) 都曾在  $\pi^- p \rightarrow n \phi \phi$  过程中发现了新的共振态，特别是 BNL 的一个实验组，他们声称发现了三个  $J^{PC}$  都是  $2^{++}$  的新粒子  $g_T$ 、 $g_{T'}$  和  $g_{T''}$ ，它们的质量分别为  $2120\text{MeV}$ 、 $2220\text{MeV}$  和  $2360\text{MeV}$ ，宽度分别为  $300\text{MeV}$ 、 $200\text{MeV}$  和  $200\text{MeV}$ 。由于这些粒子的产生几率相当大，他们认为这些新粒子很可能是胶子球。

去年，在苏联的高能物理研究所 (IHEP) 的 70

GeV 加速器上工作的一个小组宣布,他们在过程



中发现了一个新粒子  $G$ ,此粒子的质量为  $1592\text{MeV}$ ,宽度约  $210\text{MeV}$ ,  $J^{PC} = 0^{++}$ . 通过对  $G$  粒子的各种衰变率的分析,他们认为这可能是一个标量胶子球.

还有一种产生胶子球的方法是不久前在 CERN 采用的,他们利用质子和质子的对撞,通过反应  $\text{pp} \rightarrow \text{pp}X$  在中心碰撞区寻找胶子球. 类似的分析表明,  $J/\psi$  的辐射衰变过程、 $\pi p$  碰撞以及静止的质子-反质子的湮灭过程也是寻找混合态  $q\bar{q}g$  的较为理想的过程,人们正期待由此得到有关混合态的更多的信息.

### 小 结

虽然近几年来从实验到理论对胶子球和混合态的

研究相当活跃,不断有人声称发现了可以解释为胶子球的新粒子,可惜的是,至今还没有发现一个层子模型所无法容纳的态(通常称为外来态,如  $J^{PC} = 1^{-+}, 3^{-+}$  等态),已发现的这些新粒子,例如  $J^{PC} = 2^{++}$  的态,对于普通介子、双胶子胶子球、三胶子胶子球、混合态( $q\bar{q}g$ )以及四层子态都是允许的,所以它们彼此可能有很大的混合. 现在理论上还没有一种可靠的办法可以将它们完全区分开,对于这些新粒子的每一种理论上的猜测往往都只能解释这些新粒子的部分性质. 所以,尽管每个人似乎都相信胶子球和混合态应当存在,但目前从理论上和实验上都还不能给出令人十分满意的结论. 我们相信,随着实验的不断改进,人们将能得到更加详细的介子能谱,将会发现更多的新粒子(或许还有外来态)并提供有关这些新粒子的各种性质,将大大推进我们对强子结构动力学的认识.