

# 色彩丰富的层子

## ——量子色动力学浅说

薛 丕 友

近年来,在“基本”粒子的研究中,发展了一种新的理论,叫量子色动力学(Quantum chromodynamics),简记作 QCD. 这是把量子电动力学的一些原则作适当的推广,建立起来的一种描述强相互作用的动力学理论. 它是当前国内外“基本”粒子理论工作者最关心、讨论最热烈的课题之一,现有的理论和实验也都是指向 QCD 的.

### “五彩缤纷”的层子—— 一种新的量子数“颜色”

根据辩证唯物主义的观点,物质的结构是有无穷层次的,人们已经发现了三百多种“基本”粒子,它们属于比原子和原子核更深的层次,同时,它们又是由再深一层次的东西构成的,我们把这种再深一层次的东西叫做“层子”. 从强子的  $SU(3)$  对称性出发,人们初步分析认为层子可能有三种(通常用  $u, d, s$  表示),强子是由三种层子和相应的反层子组成的.

当时这个图像与关于强子的一系列实验符合得很好. 1974 年,发现了  $J/\psi$  粒子,这个粒子的性质很怪,它的质量很大,约为质子质量的 3.3 倍. 按照以往大量实验提供的一般规律,粒子的质量愈大,寿命就愈短,可是  $J/\psi$  粒子的寿命比一般共振态粒子长一千倍,用原有的  $SU(3)$  对称性无法解释这些新粒子的存在和它们的性质. 因此人们认为自然界还存在一种新的层子,用  $c$  表示. 到 1977 年夏天,实验上又发现了质量约为质子十倍的  $\Upsilon$  粒子,显示出层子还可能具有更新的性质,存在另一种新的层子,这种新层子用  $b$  表示. 这样一来层子的种类就增加到五种 ( $u, d, s, c, b$ ). 或者说,强子由五种不同“味道”的层子组成. 介子是由一对正反层子组成的,重子是由三个层子组成的. 这样果然很好. 但是,一个矛盾解决了,又发现了新的矛盾. 例如,  $\Delta^{++}$  粒子,它的电荷为  $2+$ ,由三个  $u$

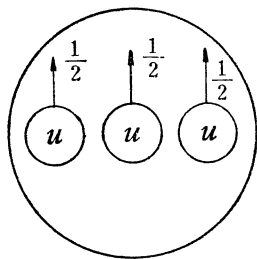


图 1  $\Delta^{++}$  粒子

层子组成,从图 1 看到,三个  $u$  层子的自旋、同位旋、空间状态都是对称的,而层子、反层子的自旋都是  $\hbar/2$ ,是费米子. 费米子服从费米统计,这就是说,相同的费米子不能处于相同的运动状态,也就是说要反对称状态,怎么办呢? 就引入一个新的量子数——“颜色”. 人们设想,不但有  $u, d, s, c, b$  五种“味道”的层子,而且

层子组成,从图 1 看到,三个  $u$  层子的自旋、同位旋、空间状态都是对称的,而层子、反层子的自旋都是  $\hbar/2$ ,是费米子. 费米子服从费米统计,这就是说,相同的费米子不能处于相同的运动状态,也就是说要反对称状态,怎么办呢? 就引入一个新的量子数——“颜色”. 人们设想,不但有  $u, d, s, c, b$  五种“味道”的层子,而且

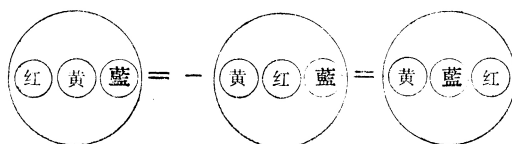


图 2

每一种层子又分成红、黄、蓝三种不同的颜色. 原来一个“味道”的  $u$  层子,就有了三种不同的颜色,这样,组成  $\Delta^{++}$  粒子的三个  $u$  层子的颜色,就可以是一个红,一个黄,一个蓝,就是三个不相同的粒子(“色”不同)了. 交换两种不同颜色的层子,波函数就出现一个负号(图 2),即对色量子数来说是反对称的了,这样就满足了服从费米统计的要求. 还有其它一些原因,都说明必须引入“颜色”这个量子数. 那么,层子是真的五彩缤纷吗? 不是的,这只是一个抽象的量子数,说明层子还具有一种新的自由度.

### 带色的层子是如何结合成强子的

我们知道,红、黄、蓝三种颜色合起来可以成为白色. 重子是由三个层子组成的,三个层子三种不同“颜色”(红、黄、蓝),所以重子是“白”色的. 介子是一对正反层子组成,带的色量子数正好相反,就互相抵消了,所以,介子也是“白”色的. 强子(包括重子和介子)都是“白”色的.

带色的层子是如何结合成“白”色的强子的呢? 让我

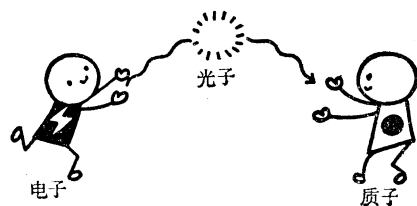


图 3 电磁相互作用

## 崭新的物理内容

在某种意义上说，量子色动力学是量子电动力学的一种推广。但这种推广有质的飞跃。即量子色动力学有许多崭新的物理内容。它在许多方面确实反映了客观世界中强相互作用的特点，因此，作为一个可能的强相互作用理论而受到国内外“基本”粒子物理学工作者的重视。

**无限与有限** 实验测量的物理量，如反应截面、跃迁几率等等，一般都是有限的可测的数量。而建立在量子场论基础上的“基本”粒子理论，却经常遇到一个很使人头痛的问题，就是有一类理论，当人们作精确计算时，明明有限的物理量都成了无穷大，而且没有办法把这种无穷大消去。这样的理论，当然不好，因为它与实践不符。另一类理论，用它来计算物理过程时，虽然表面上也出现无穷大，但人们有一种办法，可以把这种无穷大扣除，扣除后的量是有限的，而且可以同实验作比较。通常把具有这种性质的理论叫做可重正化理论。QCD 与 QED 一样，都是可重正化理论，这当然是很好的。

**“越小王国越自由”** 上面说到，QCD 是一种不可对易的规范群理论。这样的理论有一个显著的特点：就是在一个相互作用过程中，如果动量交换越大，则层子间的强相互作用的有效耦合常数就显得越小，若是动量交换趋于极大，则层子间强相互作用耦合常数就趋于零，甚至层子近乎是不受约束和自由的。在什么情况下动量交换极大呢？这里不妨举一个例子，比方说，用高能电子作为炮弹，去轰击质子，电子能量越高，碰撞后飞行方向偏转得越厉害，动量交换就越大。这其实就是一般所说的电子的深度非弹性散射（在这种情况下，要产生若干个  $\pi$  介子）。所以，在电子的深度非弹性散射的情况下（当然也不只限于这一种情况），应该可以观测到质子中的层子是近乎自由的，即层子的强相互作用有效耦合常数趋于零。我们又知道，当电子轰击质子时，必须电子与质子极其靠近，才能发生大动量交换，所以这又意味着在很小的范围（很近的距离）内去“看”层子，层子就应该几乎是自由的。量子色动力学具有的这种“越小王国越自由”的性质，被人们称为“渐近自由”性质。而且这种性质已经得到高能实验一定程度的支持。

**“色盲”与“囚禁”** 既然强子是由带色的层子组成，传递强相互作用的是带色的胶子场，而且，从量子色动力学的观点，人们估计胶子的静止质量为零，层子的静止质量也并不是非常之大，约为：

$$\begin{aligned} m_u &= m_d = 10-300\text{MeV} \\ m_s &= 500\text{MeV} \\ m_c &= 1.5\text{GeV} \\ m_b &= 4.5\text{GeV} \end{aligned}$$

们回过头来看看量子电动力学：两个带电粒子是通过交换光子传递电磁相互作用的。电子和质子就是通过电磁相互作用结合成氢原子。描写这种量子化电磁场在带电粒子间传递相互作用的理论，叫量子电动力学，简记作 QED。这已经是相当成熟的一种理论，在现有

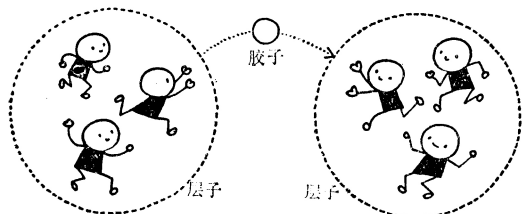


图 4 强相互作用

的很高实验精度内，理论与实验的符合完全一致。由这个理论类比和推广，人们认为：带色的层子是通过一种强相互作用结合在一起的，量子化的胶子场是这种强相互作用的传递者。胶子也是带色的，有八种。但是，胶子——胶子场的量子——和光子——电磁场的量子——不同的是：光子本身不带电荷，它是在带有电荷的粒子之间传递相互作用的；而胶子本身是带“色荷”的，又是在带“色荷”的粒子间传递相互作用的，所以称为量子色动力学。胶子和层子一样，至今在高能物理实验中还没有直接找到。

我们说量子色动力学是量子电动力学的推广，在某种意义上也是自然的。因为，描述电磁相互作用的理论，是用一维么正规群  $U(1)$  来建立的，它实际上描写电荷守恒。人们就想到，强相互作用既然是交换带色的胶子，而层子又是带三种颜色，为了保证色荷也守恒，就应当把强相互作用动力学理论建立在三维么模么正群  $SU(3)$  色规范的理论之上。 $U(1)$  群的一个特点是群元素是可以对易的，例如：

$A$  是  $U(1)$  群的一个群元素，

$B$  也是  $U(1)$  群的一个群元素，

可对易性是指： $AB = BA$ 。

但是，描写强相互作用的  $SU(3)$  群是不可对易的，例如：

$C$  是  $SU(3)$  群的一个群元素，

$D$  也是  $SU(3)$  群的一个群元素，

不可对易是指： $CD \neq DC$ 。

所以说，量子色动力学是不可对易的规范理论。下表是量子电动力学和量子色动力学的一些区别。

相互作用	理论	传递相互作用粒子	规范群	群特点
电磁相互作用	量子电动力学 QED	光子，不带电荷	$U(1)$	可对易
强相互作用	量子色动力学 QCD	八种带色荷的胶子	$SU(3)$	不可对易

那么,在世界上现有高能加速器的能量范围内,为什么打不出带色的层子,也没有直接观察到带色的胶子呢?我们难道对层子和胶子所带的“色”是“色盲”,看不到吗?而且又为什么带色的层子所组成的强子,色荷总是为零,即无色的呢?这个问题在目前还是一个谜!

QCD 理论正在尝试提供一种机制,认为层子总是被牢牢囚禁在强子内部,或者说,当把两个层子拉开时,它们之间的相互作用随着层子间距离增加而越来越大,以至不可能出现单独的带色的自由层子。

**真空不空** 量子色动力学的进一步研究,表明所

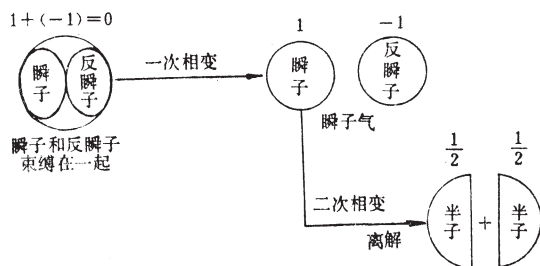


图 5

谓“真空”是很复杂的,茫茫宇宙,大到百亿光年距离的星际空间,小到十万亿分之一厘米的强子内部,至今还没有发现那里有真正的“真空”。QCD 中“真空”显示出很复杂的结构,它有一种所谓“瞬子”解(代表场的一种状态),它把不同经典真空连接起来,不同真空间有互相穿透的所谓隧道效应。目前这方面已发展成所谓 QCD 中赝粒子物理的讨论, QCD 中真空结构的进一步研究可能与更深刻的物理规律分不开的,例如瞬子可能有如下的“相变性质”(图 5)。在一次相变的情况下,瞬子与反瞬子离开,人们把这样出现的瞬子的集合叫瞬子气。在二次相变的情况下,出现半子对,就有可能使层子囚禁起来。通常我们用一个数 1 (拓扑量子数)表示瞬子,则 -1 表示反瞬子,而用  $1/2$  表示半子 (meron) (也代表场的一种状态,拓扑荷为  $1/2$ )。在二次相变处,量子数为 1 的瞬子“离解”为一对量子数为  $1/2$  的“半子”,当然这里只是很不严格的说明一下,但从中已可以看到 QCD 的真空、相变都是有一定深度的问题,目前还没有彻底解决。

### 强相互作用理论的序幕

人们对于强相互作用,已积累了大量实验数据,但直到 QCD 提出以前,可以说还没有一个建立在场论基础上的强相互作用动力学理论。虽然 QCD 有很多吸引人的地方,除了前面讨论的之外,它的待定参数也很少,很优美、干净。但 QCD 理论离实验的最后验证还很远,而且 QCD 本身有许多问题也没有搞清。但我们相信,人们对强相互作用的认识,对 QCD 中存在

问题的研究,现在只是个序幕,它仍在不断地发展,不断地深化,正如斯大林在列宁主义问题一文中曾指出的:“世界上没有不可认识之物,而只有现在尚未认识,但将来却会由科学和实践力量揭示和认识之物。”我们应该有勇气,按照英明领袖华主席所说的“思想再解放一点,胆子再大一点,办法再多一点,步子再快一点”的精神,从 QCD 以及其他的有关理论入手,对强子结构和强相互作用的动力学理论进行“攻关”。