

寻找强相互作用基本理论的新尝试

——谈量子色动力学

戴元本

在物质的四种基本相互作用中，我们对强相互作用的本质了解得最少。强相互作用理论中，比较可靠的部分都属于描述现象的性质。因此，揭露强作用的本质，对于粒子物理理论工作者来说，一直是一个诱人的目标。从三十年代开始，人们作过许多次尝试，都没有成功；而强作用的实验研究在近一、二十年间却取得了不小的进展，发现了许多新现象和新规律，这些发现推动理论工作者重新来探索强作用的本质。

在强作用的实验进展中，有两个方面最为重要：

第一个方面，是由六十年代开始，实验发现了许多种强子，测量了它们的质量、自旋、同位旋和其他量子数，发现了其中的一系列规律，这方面最新的成就是1973年以后发现的 J/ψ 族新粒子和1977年发现的 Υ 粒子。这些发现在理论方面的结果就是层子模型。层子模型认为，已发现的三百多种强子是若干种自旋为 $\frac{1}{2}$ 的层子组成的，这些层子

各带不同的量子数。借用日常生活的语言，人们说层子至少有五种“味道”，每种“味道”的层子又有“红”、“黄”、“蓝”三种“颜色”。介子由一个层子和一个反层子组成，正反粒子的颜色互相抵消。重子由三个不同颜色（红、黄、蓝）的层子组成，因此，介子和重子都是“白色”的。这个模型告诉我们，强作用的研究要由层子着手。层子之间的作用力把它们束缚在强子中，并造成强子之间的作用力。

实验进展的第二个重要方面，是大动量转移现象的研究。例如：高能电子与静止的质子碰撞，如果碰撞以后电子运动方向有较大的偏折，电子的动量就有大的改变；同时，质子被撞后会得到大的动量和能量并产生许多介子，这就是一个大动量转移现象。为了使电子的动量有大的改变，电子必须非常接近质子中的一个层子，这样，电子与层子间才有足够的电磁作用力。因此，大动量转移现象是和层子在小距离处的性质相联系的。实验的结

果发现了一种有趣的规律。如果认为在电子与层子发生碰撞的短暂时间内层子可以看作是没有强相互作用的自由粒子，只是在碰撞以后层子才通过强相互作用重新组成为许多强子，则理论的计算结果与实验结果相当接近。近几年间高能物理实验工作者用高能电子， μ 子和中微子撞击核子，此外还做了一些其他包含大动量转移过程的实验，都得到相似的结论。这是一个很突出的实验结果，它说明强作用在大动量转移过程中（也就是在小距离[小于 10^{-14} 厘米]处）变弱。这是十年以前人们没有料到的。

在这些实验结果启发下，人们提出了量子色动力学，希望它能作为强相互作用的基本理论。量子色动力学是由电磁相互作用的基本理论量子电动力学推广而来。在电磁作用中，两个电荷之间的作用力是通过电磁场的媒介而产生的。在量子理论中电磁场和光子对应。光子是静止质量为零自旋为 1 的粒子。电磁作用在量子电动力学中这

样描写：一个带电粒子放出光子而失去一部分能量和动量；另一个带电粒子接收前一粒子放出的光子，由此而获得这一部分能量和动量。

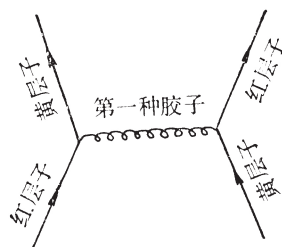


图 1

因此，光子是电磁作用的传递者。

在量子色动力学中，层子之间的强作用是由“胶子”传递的。胶子象光子一样，也是静止质量为零自旋为 $\hbar$ 的粒子。象带电粒子与电磁场的作用强度用电荷表示一样，层子与胶子的作用强度可以用“色荷”表示。胶子共有八种。一个“黄色”的层子可以放出一个第一种胶子而变成红色。相反，一个“红色”的层子也可以吸收一个第一种胶子而变成黄色。图1表示一个红层子与一个黄层子通过交换胶子而相互作用。红、黄、蓝三种层子之间互相转变共需要六种胶子，代表这种作用的强度的“色荷”都是一样的。红、黄、蓝三种颜色的层子与第七和第八种胶子作用时都不改变它们各自的颜色，但是三种颜色的层子在和第七第八种胶子作用时色荷并不相同，而是有一定的比例关系。因此，胶子是能“分辨”颜色的。所以我们说胶子也带色。由上面的叙述还可以看出，由一些层子组成的系统在相互作用时不会改变各种颜色的层子的个数。这叫色量子数守恒。但是胶子不能辨味，就是说各种味的层子与胶子的作用都一样，层子在和胶子作用时也不改变它的味。

为什么要作这些假设呢？这是因为所有已经发现的强子都是白色的。这说明把层子束缚在强子内的强作用力和颜色的关系很大，而和味的关系相对来说要小一些，可以认为是次要的原因造成的。

为什么人们认为量子色动力学有希望可以描述强相互作用？我们先从量子电动力学说起。一个电子会在真空中产生电场。但是量子电动力学认为真空并不是一无所有的，而是有负电子——正电子对不断地产生出来，又不断地消灭着。因此真空实际上是一个包含有正、负电荷的介质。放在真空这个介质中的电子会使真空产生极化，这样，负电子的周围就吸引了一些正电子，这些相反的电荷把原来“裸”电子的电荷屏蔽起来。通常在低能、低动量传递条件下做的实验中，起作用的是包含屏蔽电荷在内的全部电荷，这好象是在较远的地方观察电子，因此这些实验中测量到的电子电荷比“裸”电子的电荷小，而大动

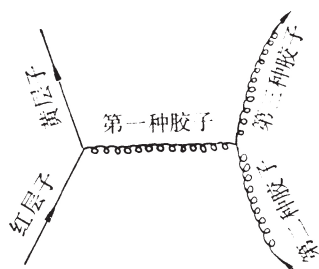


图 2

量转移实验则好像是到很小的距离内去观察，在极端情况下我们将看到裸电子的电荷。因此，电磁相互作用在小距离处是变强的。

量子色动力学的情况则不同。在量子电动力学中，光子本身不带电，因此光子之间没有直接作用。然而在量子色动力学中，胶子是带色的；胶子之间有直接的相互作用。因此一个层子和一个胶子可以通过交换胶子而互相吸引（请看图2）。详细研究的结果发现，虽然层子也可以把真空中与它色荷相反的反层子吸引在周围，但是由于它还吸引了真空中的胶子，真空极化的总效果不是使色荷减小而是使色荷增加，这叫做反屏蔽现象。由此可知，量子色动力学描述的相互作用虽然在稍大的距离下是强的，而在小距离处却是弱的，这就定性地解释了前

面叙述的第二类实验。这是量子色动力学受到人们重视的一个主要原因。

量子色动力学的预言是否不仅在定性上而且在定量上也能与实验符合呢？目前实验和理论工作者都在做大量的工作，以便进一步将量子色动力学关于大动量转移现象的预言和实验结果比较。这个问题在近几年内有可能得到答案。对于判断量子色动力学是不是描述强作用的正确理论，这一点是关键性的。

另一方面，自由的层子和胶子实验上都没有发现。为什么这些似乎质量很轻或无静止质量的粒子不能在撞实验中打已经做过的高能碰出来？有些人称这个问题为“囚禁”问题，对它已经有过许多猜测了。进一步说，量子色动力学能不能得到实验上观察到的强子质量谱和其他性质？这些问题涉及量子色动力学在较大的距离，即强子半径的尺度（约为 10^{-13} 厘米）处的性质，与前面谈的小距离的性质是不同的。在理论上，这些问题要困难得多，不少理论工作者正在这个方向上探索。我们在这里就不作介绍了。