

# 电荷 颜色 相互作用

黄厚昌

有一天，我在校园里散步，听到学生与王老师的一段谈话，我觉得启发很大，决定将他们的谈话整理出来，供大家看。

小张：王老师，听说现在粒子物理中，研究粒子内部结构时，既有味道又有颜色，这些带有味道和颜色的层子按照一定“处方”配备“烹调”后就组成像质子、中子、 $\pi$ 介子那样的基本粒子，这真是太有意思了！但我还不明白，请你给我讲一讲，好吗？

王老师：是的，但这不是烹调术，而是利用通俗的语言描述层子的性质，所谓“烹调”就是指具有这些性质的层子间的相互作用。为了解释这一点，我将用电磁相互作用类比。假如有人告诉你颜色与电荷可以类比，你一定会感到很惊奇吧。

小张：是的，这两者怎么可以类比呢？

王老师：在粒子物理这微小世界里，颜色和电荷既有

相似之处又有不同之点。大家知道，原子是由原子核和绕核运转的电子组成的。电子是具有最小单位电荷的粒子，原子核带正电，电子带负电，它们之间的电磁相互作用使得电子绕原子核运转组成原子，原子呈中性。

张：这我知道，在中学物理书上就学过，可您还没有提到颜色啊。

王：别着急，我说下去你就明白了。原子核是由质子和中子组成的，而质子、中子这些粒子也是有内部结构的，它们是由层子构成的。层子这个词反映了结构的层次，我喜欢用它，有些文献和书上用夸克这个词，在今天看来这两者是一回事，当初在1965年引入层子时尚有不同的内容和理论结果。这就扯远了，还是回到正题来。层子如何组成质子和中子呢？它们不像电子和原子核靠电磁相互

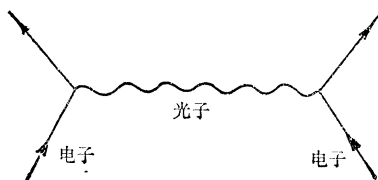
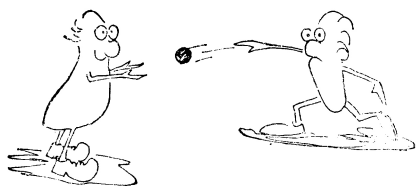
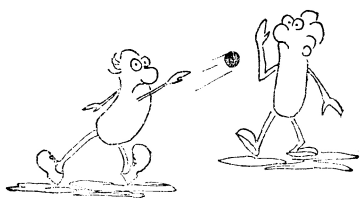
作用结合在一起。层子有很多种,为了标记它们,以味道这一词描写不同种类的层子,例如现已发现的有  $u$ 、 $d$ 、 $s$ 、 $c$ 、 $b$ 、 $t$  六种不同的味道,每一种味层子还有三种不同类型,为了标记它们,以颜色来区分,例如红、绿、蓝,对于不同颜色的层子我们说它们的颜色荷不一样。

张: 噢,我明白了。粒子物理学家只是借用日常生活中用语来描写层子的性质和种类。用物理学的术语来讲,只是引入了新的自由度,这种自由度与时间和空间自由度不一样,而是内部自由度。是吗?

王: 对,就是这么一回事。这种具有各种不同颜色荷的层子发生相互作用就构成质子、中子、 $\pi$  介子、 $K$  介子等等参与强相互作用的粒子(统称为强子),也正是它们构成当今绚丽多彩的物质世界。

张: 王老师,我想反过来我们是否可以谈对物质结构一层深入一层的研究也揭示了微观世界富有愈来愈新奇的图象?

王: 新奇性还在于它们之间的相互作用。为了说清层子间的相互作用,还是从电磁相互作用说起,电子具有电荷,电子与原子核,电子与电子之间的相互作用是电磁相互作用,它们之间通过光子传递相互作用。形象地说就是电子与电子间的相互作用不是它们之间直接发生相互作用,而是像两个人传递篮球一样,甲抛出一个球被乙接住或乙抛出一个球被甲接住,甲乙之间发生相互作用,用图来表示就是一个电子发射一个光子被另一个电子所吸收这就发生了电子-电子相互作用。这里光子是中性的不带电荷,因此光子与光子之间不直



接发生相互作用,仅仅作为相互作用的传递者.这种描写电磁相互作用的相对论性量子理论就是量子电动力学。

张: 我听说量子电动力学是最成功的量子场论,它的成功之处在哪儿呢?

王: 它的成功已得到许多实验事实的证实。例如量子电动力学对电子反常磁矩的理论预言与实验结果惊人地符合,准确到九位有效数字;原子能级的兰姆移动的实验结果与辐射修正的理论结果也符合得非常好,准确到七位有效数字。现在回到层子间相互作用,与电磁相互作用类似,它们也有相互作用的传递者,科学家们将层子间相互作用的传递者称为胶子。

张: 胶子! 是不是说它像胶水一样粘住层子?

王: 是的,它的名字一目了然。原来,科学家们寻找强子内的层子已廿多年了,就是没有发现自由层子,这就是说层子被禁闭在强子内部。什么东西束缚住它们不被击出来呢? 自然是一种非常强的相互作用将层子拉在一起,担负这个使命的就是胶子。

张: 这就与电子-光子相互作用不一样了,电子和光子都有自由状态,电子是第一个被发现的基本粒子,实验上经常可观察到自由电子,电磁作用并不能将电子永远禁闭在原子中。

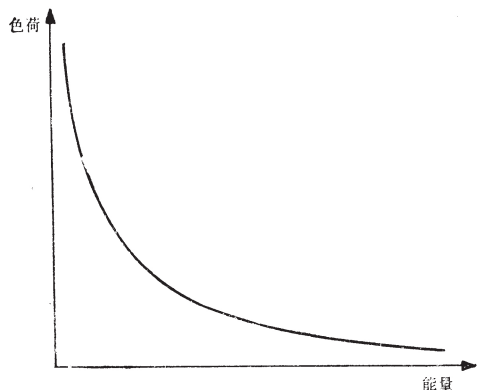
王: 你说的很对,正是这一不同的特点,实验中从未观察到自由层子和自由胶子,层子带色荷,胶子也带色荷。这一点又与光子不同,光子不携带电荷,只有一种;胶子带颜色荷,有八种。描写这些带色荷的层子和胶子间的相互作用理论称为量子色动力学。这是 1973 年以后才发展起来的描写强相互作用的理论。

张: 如果胶子带色荷,会有什么后果呢?

王: 胶子带色荷带来非常重要的后果,这是量子色动力学与量子电动力学最大的不同之处。在量子电动力学中,由于光子不带电荷,光子间没有相互作用,当光子“看”电子时,电子周围由于真空极化起屏蔽作用,光子所“看”到的电荷是屏蔽了以后的电荷  $e$ 。而在量子色动力学中却不同,由于胶子带色荷,胶子之间也有直接相互作用,这种直接相互作用的结果是起反屏蔽作用,而且反屏蔽相互作用很强,强到不仅抵消屏蔽作用(色屏蔽作用与量子电动力学中电屏蔽作用相似)还有过剩。

张: 反屏蔽作用过剩那就意味着色荷增加,这太奇怪了,我简直难以想像。

王: 这一特点确实不易用通常的想法去理解。打个不太恰当的比方,像滚雪球越滚越大一样,色荷的大小不是确定的而是可变的,其大小依赖于探测的粒子如何去“看”它,如果探测粒子的能量很高,即波长很短,就可以“看”到很小的空间区域,这时反



屏蔽效应很小,因此“看”到的色荷较小,如果“看”它的探测粒子能量很低,即波长很长,在很大的空间范围内去“看”它,这时反屏蔽效应很大,因此“看”到的色荷就大。

张: 能量愈高色荷愈小,能量愈低色荷愈大,真是一幅绝妙的图画! 那么是否可能随能量增加色荷小到趋于零,随能量降低色荷趋于无穷呢?

王: 可能的,这正是量子色动力学最显著的特点,在极高能量时测到的色荷趋于零,称为渐近自由,因为色荷在无穷大能量时趋于零意味着层子间色相互作用解除了,层子就可以自由,然而只是渐近自由。在极低能时色荷趋于无穷大,色相互作用极强,这就可定性地理解层子为什么在强子内出不来的“禁闭”特点。

张: 我明白了。量子色动力学中的色荷是可变的,而量子电动力学中的电荷是不变的。

王: 你的理解是错误的。其实在量子电动力学中电荷也是随能量而变化的。

张: 王老师,您把我说糊涂了,我从来没有听说过电荷

可改变,实验上测到的电荷就是一种,早在法拉第时代就在电解实验中测量了,而后密立根又给出较精确的直接测量值,密立根还因为这一成就而获得诺贝尔奖金呢!

王: 你说的是事实,然而你并不完全理解。在量子电动力学中,与实验相比理论上所定义的电荷是通过极低能下汤姆逊极限来确定的,这时探测的光子波长极长,实际是“看”到屏蔽以后的电子电荷,如果探测光子的波长极短就“看”到极小区域里未受屏蔽的电荷,所以也是可变的,只不过变化趋势与量子色动力学相反而已。在目前实验能量范围内变化极小,这种极小的修正在理论上通过计算高级修正图形来考虑。

张: 我还有一个问题,量子电动力学被实验证实非常成功,那么量子色动力学是否也很成功呢?

王: 量子色动力学的成就与量子电动力学相比相差很远。量子色动力学得到了实验的支持,但还属于定性或半定量上的,离定量上检验还有相当的距离。量子色动力学成功地应用到电子-质子深度非弹散射过程解释了无标度现象破坏对部份子模型的偏离;它应用到电子-正电子碰撞过程解释了强子截面的标度现象;它也预言了二喷注、三喷注现象并得到了实验上的证实;它应用到强子形状因子其理论结果也得到了实验上的证实;它应用到重层子衰变到轻强子过程也给出较好的理论预言等等,不一一列举。然而,理论上还存在相当多的不确定性,理论计算结果依赖于所选取的参量和其它因素,这当然不能算作一个完美的理论。但是如果你回忆一下强相互作用的实验和理论研究已经历了五十年,量子色动力学这些成就就不是一个小的进展,至于它的问题,用我们常用的话来讲是前进中的问题。

	量子电动力学	量子色动力学
基本组份	电 子	夸克 (有六种不同味道)
守恒荷	电 荷	色 荷 (三种不同颜色)
相互作用媒介物	光 子 (不带电荷)	胶 子 (具有不同色荷的八种胶子)
相互作用特点	光子没有自作用,光子与电子相互作用仅产生屏蔽效应。	胶子有自相互作用,产生反屏蔽效应,超过它与夸克作用产生的屏蔽效应。
相互作用常数	利用汤姆逊极限定义电荷,即相互作用耦合常数 $\alpha = e^2/4\pi = 1/137$ ,	相互作用耦合常数 $\alpha_s$ ,具有渐近自由的特点,仅在高能时耦合较弱。
观测自由粒子	自由电子可观测,	观测不到自由夸克,夸克仅禁闭在强子内部,

小张：谢谢您的讲解，其实我还有很多问题，例如既然看不到自由层子和胶子，怎么知道它们存在，又怎么知道它们具有颜色和味道呢？从原子到原子核，从原子核到质子、中子每一层次的结构犹如太阳系，可质子、中子内部的结构为什么如此不同？不同味层子有什么特点？到底量子色动力学存在什么问题？功过如何评价？

王老师：好吧！以后再详细讨论吧！我将量子电动力学和量子色动力学的比较列了一个表，供你参考。