

自旋质子间的碰撞—— 对量子色动力学的挑战

朱永生

(一) 粒子和相互作用

茫茫宇宙、大千世界,什么是构成五光十色各类物质的基本微粒,又是什么力量在支配着这些基本微粒的形态和运动?经过几千年坚韧不拔的努力,人类对这一基本问题的认识已经大大深化了。按照目前对于它们性质的了解,可分为轻子、强子和传递相互作用的粒子三大类。轻子有电子、 μ 子、 τ 子,中微子及其它们的反粒子,共12种;强子有重子和介子构成,重子和介子由夸克组成, u, d, s, c, b, t 六味夸克,每味夸克有三种颜色,加上它们的反粒子共有36种;传递相互作用的粒子则有光子、中间玻色子(w^+, w^-, z^0)、8种胶子、引力子等共13种。这61种基本粒子构成了色彩斑斓的宇宙世界,其中 t 夸克、 ν_e 中微子和引力子尚有待发现,其它粒子的存在都已经由实验所证实。

基本粒子处于永恒的运动状态,它们的行为由它们之间的相互作用决定。自然界的相互作用可分为四类:引力作用、电磁作用、弱作用、强作用,下表可使读者对这四类作用有一个最基本的了解:(见表1)。

表1 四类相互作用

作用类型	作用对象	传递相互作用的粒子	相互作用理论
强相互作用	正反夸克	胶子 g	量子色动力学 QCD
电磁相互作用	带电、带磁矩粒子	光子 γ	量子电动力学 QED
弱相互作用	正反轻子、正反夸克	中间玻色子 W^+, W^-, Z^0	弱电统一理论
引力相互作用	所有粒子	引力子	广义相对论

在这四类相互作用中,描述电磁作用的量子电动力学是最令人满意的理论。大到成亿光年的宇宙尺度,小到 10^{-16} 厘米的基本粒子尺度,所有的电磁相互作用现象无一例外地可由量子电动力学理论解释或预言。其它三种作用理论,虽然都能解释和预言许多相关的实验事实,但多多少少都存在一些悬而未决的问题,甚至关键性的难点,不解决这些难点,就有可能

动摇理论的基础。

(二) 量子色动力学

描述强相互作用的基本理论称为量子色动力学,本刊发表过不少文章介绍过它的基本内容(例如1986年第1期谢维春:“从强子结构模型到量子色动力学”)。按照这一理论,上百种已经发现的强子都是由称为夸克的更小微粒构成的,强子中的介子由两个夸克组成,构成重子则需要有3个夸克。夸克分为六种味道,每一味夸克又有红黄蓝三种不同的颜色,这18种夸克每个都有一个电荷符号相反的反夸克。正反夸克的电荷是电子电荷的 $1/3$ 或 $2/3$ 。重子由带三原色的三个夸克构成,介子由互为反色的正反夸克对构成,所以尽管夸克有颜色,它所构成的强子却都是“白”色的。夸克之间结合为强子的强相互作用通过8种胶子来传递,胶子也是带色的。

量子色动力学除了很好地说明了强子的结构和强子的质量谱之外,还使实验中观测到的所谓“渐近自由”现象得到合理的解释。用高能电子去轰击质子,电子能量越高,碰撞后飞行方向偏转得越厉害,它的动量在碰撞前后的变化就越大,电子动量的这种变化完全传递给了原来相对“静止”的靶质子,所以也可称为“动量传递”。实验中观测到,质子好象是由三个更小的微粒——现在知道是夸克——组成的,而且三个夸克之间似乎互不相干,行动很自由;动量传递越大,三个夸克间的相互作用越小,可谓“你走你的阳关道、我走我的独木桥”。只有当电子-质子靠得很近时,才能发生大的动量传递。这种距离越靠近,相互作用强度越小的性质称为渐近自由。量子色动力学正好具有渐近自由的性质。

量子色动力学是从一部分实验事实中抽象出来的,它的成功之处,在目前情况下,主要表现为定性地描述了现在观测到的许多强子现象,定量地描述强子现象则还有许多困难,而且理论本身也有许多问题没有搞清,例如著名的“夸克囚禁”问题。“夸克囚禁”正好与“渐近自由”相反,当强子中夸克之间的距离大到接近强子直径($\sim 10^{-13}$ 厘米)时;强相互作用的吸引力是如此之强,使得夸克不可能离开强子的“壳休”。这种长距

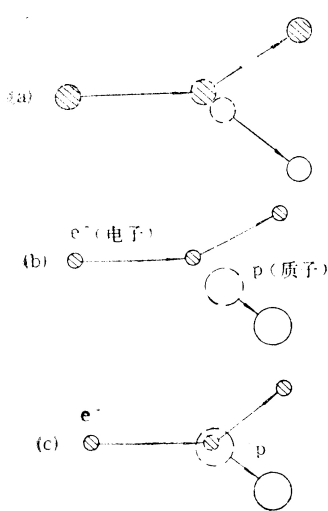


图1 (a) 两个宏观小球间的碰撞
(b) 低能电子-质子散射
(c) 高能电子-质子的深度散射
虚线表示碰撞“瞬间”的位置

量子色动力学对这种现象尚不能给出精确的计算。同时，量子色动力学预言，应当存在两个胶子束缚在一起形成的“胶子球”，而且当前世界上已有的加速器能量完全可以产生它，但至今实验上仍然未能肯定胶子球的存在。因此，对于量子色动力学而言，目前还只能说有可能成为描写强相互作用的好的理论，但离最后的确立还有很长的路要走。

(三) 质子-质子散射实验

自1973年以来，美国密执安大学物理学教授克里希(A. D. Krisch)领导的实验小组，一直在进行质子-质子散射实验的研究，以进一步了解质子之间强相互作用的性质和质子的内在结构，但他们观测到的现象至少对目前的量子色动力学来说并非什么福音。

所谓散射，通俗地说即粒子间的碰撞。微观粒子间的碰撞与日常生活中小球的碰撞有本质的不同。两个小球都是有明确边界的，它们的碰撞只在接触的一瞬间发生，如图1(a)所示。微观粒子间的碰撞指的是由于粒子间的相互作用而改变了入射粒子的方向。例如低能电子射到质子靶上，由于电子与质子之间的电磁作用力 $q_1 q_2 / r^2$ ，入射电子改变了飞行方向，这种碰撞粒子之间并不互相接触，如图1(b)所示。当电子能量很高时，比如几个 GeV，电子就可深入到质子内部，也就是相互作用半径比质子半径还要小，如图1(c)所示。这种散射可以研究质子的内部结构。事实上，量子色动力学关于质子内部存在着结构，质子由三个更小的微粒(夸克)所组成的理论的最重要实验证据之一，就是电子-质子间的深度非弹性散射。所谓弹性散射，是指碰撞前后入射粒子和靶粒子没有改变，只不过两粒子的动量、飞行方向发生变化；而非弹性散射碰撞前后粒子种类发生了变化。

离($\sim 10^{-13}$ 厘米)下作用很强，短距离($\leq 10^{-14}$ 厘米)下作用很弱的现象，正是强相互作用这一事物的两个侧面。正因为如此，尽管在科学技术极为发达的今天，人类“可上九天揽月，可下五洋捉鳖”，但至今仍未发现自由状态的夸克或胶子，而只能间接感受到它们的存在。量子色动力学对这种现象尚不能给出精确的计算。同时，量子色动力学预言，应当存在两个

微观粒子与日常生活中的小球还有一个不同，微观粒子总是处于旋转状态。用右手四个手指顺着旋转的方向，大拇指所指的方向称为粒子的“自旋”方向。粒子的自旋显然会对其散射产生影响。即使不会打乒乓球的人都懂得，不旋转的推挡，侧旋球，上旋球落到桌面上之后的飞行方向是不同的，这就是有无自旋、自旋方向不同对碰撞有影响的形象演示。在微观粒子世界中，无论是靶物质或被加速的粒子束，大量粒子的自旋是各个方向杂乱地排列的，总体地看，单次碰撞中的自旋效应显现不出来。但如果使粒子束中大量粒子的自旋取相同的方向，靶粒子中大量粒子的自旋取相同的方向，自旋对碰撞的效果就能暴露无遗。使自旋取相同的方向称为“极化”，这是一种极为困难的技巧，但科学家们想方设法终于使得极化得以实现。

克里希的实验小组研究的是束质子和靶质子都处于极化状态的弹性散射。质子-质子弹性散射是最简单的反应，唯一的变化是散射前后两个质子的动量发生了变化。这项实验是在美国国立阿尔冈实验室的称为零梯度同步加速器(ZGS)上进行的，质子束的能量被加速到4—13 GeV，质子靶则处于静止状态。根据束质子和靶质子的自旋取向，散射可区分为自旋方向平行散射和自旋方向反平行散射两类。克里希正是希望通过“平行”“反平行”散射的行为来研究质子的内部结构和强相互作用的性质。实验结果画在图2上。要了解这张图的意义，还需要对一些概念作进一步的说明。

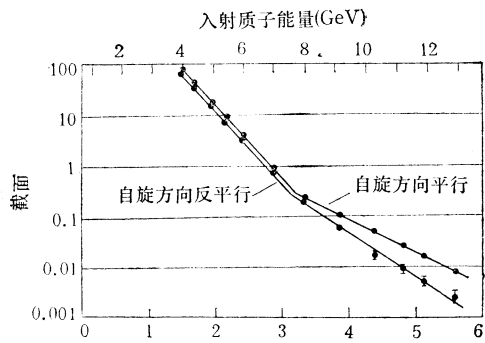


图2 自旋质子间的 90° 弹性散射截面。

首先是散射截面。前面已经讲到两个宏观小球碰撞时总是相互接触的。对一个静止不动的小球来说，一个入射小球如果打到小球的几何截面上，都能发生散射，所以散射截面就是靶球的几何截面。微观粒子的散射则不同，它并不要求粒子直接接触。粒子的截面是这样规定的，对靶粒子规定一个与入射束方向垂直的假想圆面积，打到这个假想圆面积中的入射粒子都会发生散射，打不到的则不发生散射，这个假想圆面积称为散射截面，它的大小不一定与粒子的几何截面

相等,而是取决于粒子间的相互作用.显然,截面越大,发生散射的可能性就越大.此外,我们前面已经提到过粒子间的动量传递,它反映了粒子碰撞的激烈程度,动量传递越大,粒子间靠得越近,碰撞越激烈.动量传递的大小决定于两个因素:入射粒子的能量和入射粒子的散射角度:对于相同的散射角,动量传递与入射粒子能量成正比;对于相同的入射粒子能量,小的散射角对应于小的动量传递,散射角 90° 有最大的动量传递.图2的实验结果就是在 90° 散射角下取得的.

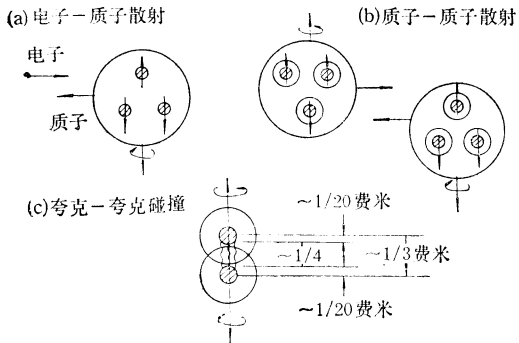


图3 电子-质子散射和质子-质子散射,夸克的可能结构.

现在可以对实验结果加以分析了.图中的两条曲线分别对应于束质子和靶质子自旋平行和反平行两种散射的实验数据.从 4GeV 开始,随着能量的增加,直到 8GeV ,截面急剧下降(注意图中的截面对数标度);但当能量上升到 8GeV 以上,截面下降速度减慢.借助于称为傅里叶分析的数学方法可以从这种实验数据中提取有关质子结构的信息.截面最初的急剧下降意味着,在低能状态下束质子和靶质子只是彼此掠过而已,而且质子的外层比较软,半径大约为 1 费米,即 10^{-13} 厘米. 8GeV 以上截面的逐渐下降则表示,高能质子间的碰撞涉及到质子内部的硬物体,这些硬物体的半径大约是 $1/3$ 费米.这些实验事实与量子色动力学是一致的,按照这一理论,质子由强作用力约束在一起的三个夸克组成,自旋质子-质子散射可用图3(b)形象地表示.质子-质子散射的实验数据表明夸克的半径 $\sim 1/3$ 费米,前面提到过的电子-质子深度非弹性散射的实验数据表明,质子的组分(也就是夸克)半径大约是 $1/20$ 费米(图3(a)).这两种实验结果综合在一起可使我们这样来设想质子结构:也许夸克有一个半径是 $1/20$ 费米的核心,在核心的外部是一个作用范围 $\sim 1/4$ 费米的强作用力场.在电子-质子散射中,由于电子不参予强作用,感觉不到强力场的作用,所以电子是与半径 $\sim 1/20$ 费米的夸克核心发生碰撞;而在质子-质子散射中,夸克的外围强作用力场发生作用,两个夸克碰撞时,有效作用范围正好是 $\sim 1/3$ 费米(见图3(c)).

但 8GeV 以上的实验结果还告诉我们新的信息,质子的自旋反平行散射截面的下降比自旋平行散射截面的下降更为迅速,换句话说,当两个质子自旋平行时,散射截面要大一些,即发生强烈碰撞的可能性要大些.在能量 13GeV 处,平行/反平行散射截面比值等于 4 .这与现行的量子色动力学是抵触的.按照量子色动力学,每个质子中的三个夸克有两个的自旋与质子自旋方向相同,另一个夸克自旋方向则相反.因此不管两个质子是自旋平行或自旋反平行的散射,总包含了自旋平行和自旋反平行的夸克对之间的碰撞.量子色动力学的计算表明,质子自旋平行/反平行散射截面比值应等于 2 ,这与实验事实不相符合.

四倍的截面比值究竟意味着什么,这一点目前还难以确定.可以假设,在散射实验中观测到的质子的组分并不完全是量子色动力学所描绘的夸克,而只是与夸克有一定的联系而已;也可以猜想,质子内确实包含三个夸克,但在质子-质子碰撞时,这三个夸克互相发生了一定的联系,而不具有量子色动力学预言的准自由运动的渐近自由性质.科学家有猜想的广阔天地,但在得到严格的实验证明之前,猜想毕竟只是猜想.

为了进一步提高自旋质子碰撞的激烈程度,即提高碰撞质子间的动量传递,需要在更高能量的加速器上实现质子束的极化.经过约 80 名科学家、工程师、技术人员六年坚韧不拔的努力,对美国布鲁克海文的交变梯度同步加速器AGS进行改建,到 1986 年,使得 18.5GeV 质子束达到 50% 的极化率,即质子束中 75% 的质子自旋朝一个方向,其余 25% 自旋朝相反的方向.几个星期之后,极化质子束的能量达到 22GeV .这就使得有可能在更高的能量下研究质子自旋平行/反平行散射截面比值将怎样变化.遗憾的是,在这样高的能量下, 90° 散射的质子很少,多数质子的散射角比较小,所以只能研究这种小角度散射,科学家们原来想进一步提高动量传递的希望落了空,但也不是没有收获,高能下的实验数据和ZGS上 13GeV 以下的实验结果综合在一起,画在图4上.这是一个三维图象,平面上的两个坐标是入射质子能量 E_i 和动量传递,垂直坐标轴是质子自旋平行和反平行散射截面之比.底平面上的虚线表示不同入射能量、相同散射角情形下的动量传递值,垂直平面上的实曲线表示 90° 散射的实验数据,空白圆圈是高能AGS加速器的散射数据.该图告诉我们,无论是在一定的散射角,还是在一定的入射质子束能量,自旋平行/反平行散射截面比实验数据连成的曲线都是上下振荡的,这种振荡现象很难与量子色动力学的计算一致起来.但是别的理论模型例如苏联的尼古拉·图灵(Nicolai Tyurin)的理论曾经预言了这种振荡.实验结果还表明,自旋平行/反平行散射截面比虽然随入射质子能量发生显著的变化,但对一定的入射质子能量,该截面比的最大值总出现在

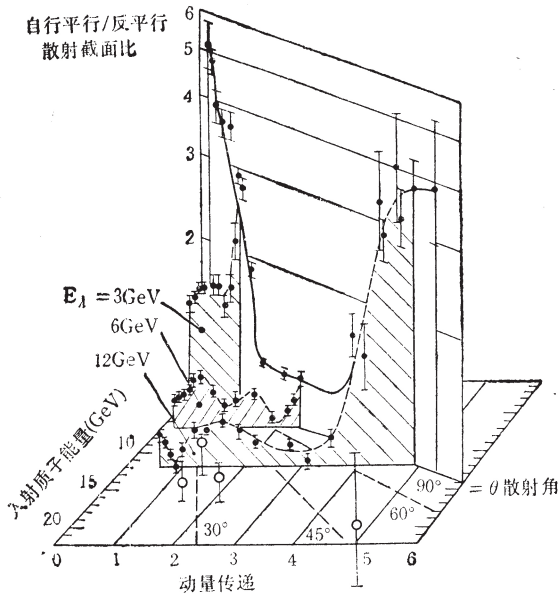


图4 质子自旋平行/反平行弹性散射截面比与入射质子能量、动量传递的关系曲线，空心圆圈是 $E_A = 18.5 - 22\text{ GeV}$ 的实验数据。

90° 散射角处，以色列的哈里·李普金 (Harry Lipkin)

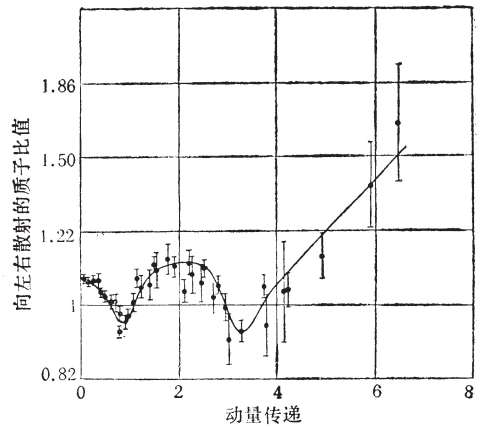


图5 向左、右散射的质子数比值，非极化质子束——极化靶质子的弹性散射，质子束能量 28 GeV。图中还包含西欧核子中心 (CERN) 在 24 GeV 取得的散射数据。

最近提出的模型预言了 90° 散射截面比出现极大值这种现象。也许，将来在 AGS 上进行 90° 散射实验可以确定究竟哪种理论正确。

在 AGS 上进行束质子和靶质子都处于极化状态的散射之前，克里希的实验小组于 1983 年在 AGS 上

进行了非极化质子束在极化质子靶上发生的弹性散射。按照量子色动力学，向左边散射和向右边散射的质子数应当相等。这一预言对于散射角较小(图 5 中小的动量传递)的情况得到了证实，但是在 28 GeV 的大角度散射中(对应于图 5 中的大的动量传递)，观测到向左散射的质子数比向右散射的质子数多出三分之二。这是又一个对量子色动力学不利的出人意料的现象。

所有这些用当前量子色动力学不能解释的实验事实都说明，目前对质子内部结构、对强相互作用的了解是不完善的。虽然目前正计划建造更高能量的质子加速器，但要增大动量转移是十分困难的，因为接近 90° 散射的事例数极为稀少。也许应当寻找一种不同于目前的量子色动力学的理论来描述质子的内部结构和质子-质子的相互作用。无论如何，这些新的实验现象将进一步推动科学家进行理论和实验研究，为最终建立强子的内部结构和强相互作用的正确理论作出贡献。