

夸克

是怎样相互作用的

叶云秀

在我们的物质世界中,作用力普遍存在,凡有物质存在的地方,就有相互作用力存在。物质世界的相互作用力形形色色,但归纳起来不外乎四种基本作用力。基本力通过相互作用体现,所以又称它为基本相互作用。

1. 四种基本力

物理学的伟大成就之一是弄明白了物质世界的所有现象都是由四种基本力起作用的。这四种基本力是早先知道的引力、电磁力以及本世纪发现的弱力和强力。

引力普遍存在,但它主要在天文现象中和在我们的日常生活中起明显的作用。它的作用力程很长,几乎到达无穷。对于基本粒子来说,它所施加的引力与其他三种力相比是很小的,所以在粒子物理中引力忽略不计。

电磁力也普遍存在,它的作用强度比引力强,也是长程力。它的存在,除了在诸如电动设备、电子设备中直接感知外,实际上像摩擦现象、化学反应等现象也都是电磁力的作用。基本粒子物理中的电磁力与现代应用技术中的电磁力遵循同样的规律。

四种力最强的是强力(核力)。核力是短程力,在日常现象中体现不出来,因为它的作用范围不超过 10^{-13} cm。这个距离与单个中子或质子的大小差不多。因此原子核的大小也是这个量级。原子和分子几乎要比质子大100000倍,所以原子、分子也感受不到核力。但是,如果是在 10^{-13} cm或略小于 10^{-13} cm的距离上,核力就非常强大,要比相应的电磁力强得多,因此称它为强力。

弱力作用范围在 10^{-16} cm,即使在这个距离上,这个力的作用也是很小的。然而,它不能忽略,在一定意义上,它比强力更普遍。某些基本粒子,如电子,它不受强力影响,但却受弱力影响。中子和核的衰变,以及许多粒子的衰变,也都是受弱力支配而发生的。

2. 夸克怎样相互作用

由于孤立的自由夸克在自然界中不存在,它们总是被束缚在强子中,因此考察夸克间的相互作用实际

上是考察束缚在强子中的夸克间的相互作用。

强子-强子相互作用。这样的相互作用包括弹性散射,在弹性散射中,强子并不发生变化;还包括非弹性散射,在这种散射中有更多的强子产生。系统地、定性地研究强子碰撞行为在弄明白强子的夸克结构方面是很有价值的。但是为了弄明白强子的夸克结构,比较容易的情况是考虑一个轻子和一个强子的碰撞,特别是一个轻子与一个质子的碰撞。

轻子-质子散射实验。高能电子与质子的散射实验,目的之一是想看到强子中的单个夸克。散射过程中主要是电磁相互作用,电子和质子间交换一个光子,如图1所示。如果电子有足够高的能量,这个相互作用一般将产生一个强子簇射。图(a)表示一个电子与一整个强子 p 碰撞产生强子簇射。这个簇射过程要用数学来描述是异常复杂和困难的。

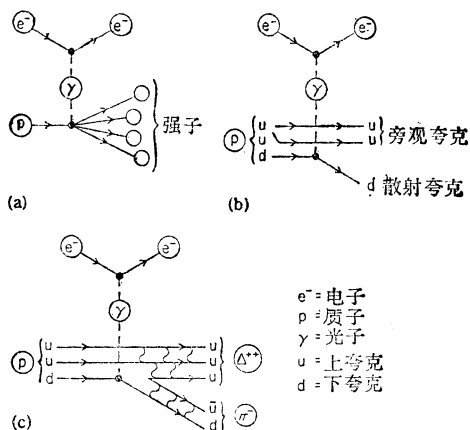


图1 电子-质子散射过程,其中波折线代表光子。

现在,如果考虑质子由夸克组成,夸克携带质子中的所有电荷,因此电子发射的光子应该与这些夸克中的一个发生相互作用,其他两个夸克几乎不受影响,叫做旁观夸克。因此,电子与该夸克之间的相互作用是一个简单的电磁散射,如图1(b)所示。用量子电动力学定律能很好地计算这一类作用。当与电子发生相

互作用的夸克被撞离其他两个旁观夸克时，在被散射的夸克与旁观夸克之间就发生强相互作用，由此而产生强子簇射。图 1(c) 示出一个例子。在这个例子中，在散射夸克与旁观夸克分离中产生了 u 和 $\bar{u}$ 夸克。三个 u 夸克形成 Δ^{++} 粒子， $\bar{u}d$ 夸克形成 π^- 介子。虽然在非弹性散射中不可能逃离出自由夸克，但它们总能以某种方式形成强子。但是电子感受不到终态强子系统中夸克间的相互作用，它仅仅与单个的、表现为“自由的”夸克发生相互作用。

在实验上，入射电子的能量和方向是已知的。我们测量散射电子的能量和偏转的角度，即可计算出与电子发生散射的那个夸克的动量。这样，通过测量一个给定入射能量的终态电子的角分布，就可决定质子中的夸克的动量分布。在两次不同的相互作用能量下，测量散射电子的两次角分布。这两个角分布是紧密相关的，因为它们源于同样的夸克分布。事实上，在 SLAC 的 $e-p$ 散射实验上观察到了这种相关性。这又是对夸克思想的一个强有力的支持。

中微子与质子的相互作用。它们是通过弱力而不是电磁力发生相互作用的。它有上述 $e-p$ 散射类似的过程。不过，这里入射的中微子变为一个 μ^- 子，同时发射一个 W^+ ，然后 W^+ 打到质子中的一个 d 夸克上， d 夸克吸收了 W^+ 变成 u 夸克，如图 2 所示。这样，弱相互作用能改变参与相互作用的夸克的类型。用与 $e-p$ 散射同样的方法，测定 μ^- 的角分布，就可知质子中夸克的动量分布。这里由弱相互作用揭示了夸克思想的正确性。

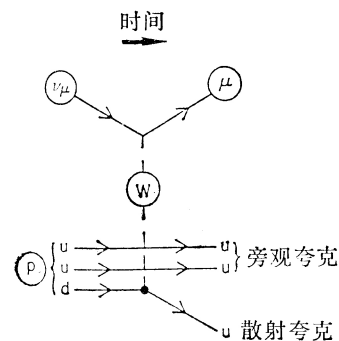


图 2 ν_μ - p 散射-弱相互作用过程

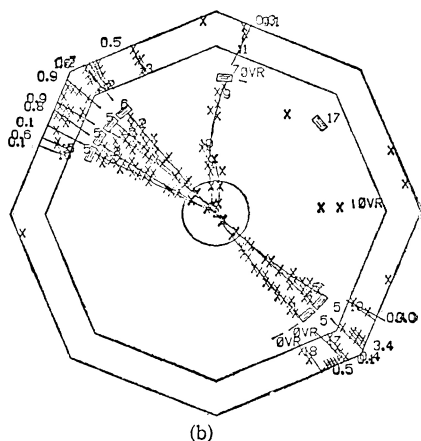
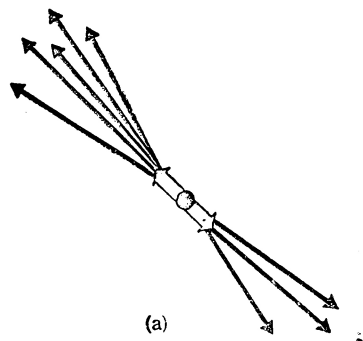
子海及 $q-\bar{q}$ 对)的每一个都携带质子的一部分动量。

综上所述，由不同的轻子 (e 、 μ 、 ν 和 $\bar{\nu}$) 入射到各种不同的靶 (H 、 d 、 Fe 等) 的实验，对实验结果进行比较可以做以下一些事情：①测量质子中的不同类型的单个夸克的动量分布；②数出在核子中的价夸克的总数；③测定在核子中的夸克的均方电荷。实验表明，所有这些测量与夸克模型预料的值相一致。

强子的夸克结构还可以从以下一个有趣的实验中得到证实：在强子碰撞中产生 $\mu^+\mu^-$ 对。 $\mu^+\mu^-$ 是轻子，它不可能通过强作用力产生，所以在通常的强子碰

撞中一般不会产生。但是，偶而，在强子之一中的夸克与另一个强子中的反夸克发生电磁湮灭，同时产生一个重光子，并衰变成 $\mu^+\mu^-$ 。同样， μ^- 子对作为能量和产生角的函数分布一般与 $q-\bar{q}$ 湮灭的预言值相一致。

强子喷注。看到单个夸克的证据莫过于 e^+e^- 湮灭时强子的产生了。在 SLAC 的 PEP 贮存环对撞束实验中和在 DESY 的 PETRA 贮存环实验中观察到了强子喷注。图 3(a) 示出了强子喷注发生的两个阶段：① e^+e^- 对撞时，发生电磁性的湮灭，产生 $q-\bar{q}$ 对，就像上述产生 $\mu^+\mu^-$ 对的过程一样；②当 $q-\bar{q}$ 分离时，由于它们之间的强作用力建立起了能量，这能量转换成更多的 $q-\bar{q}$ 对，这些夸克和反夸克的结合形成强子。新的强子趋向于沿着原来产生的 $q-\bar{q}$ 分离的方向，这就形成了背靠背的强子喷注。相互作用能量越高，喷注越准直，包含的粒子越多。图 3(b) 为 PEP 加速器实验上的一个典型的 e^+e^- 相互作用产生强子喷注的事例。



在 $p\bar{p}$ 碰撞中,两个旁观夸克也形成喷注,因此总共有四个喷注,两个沿着碰撞粒子的方向,两个趋向于被散射夸克的方向.被散射夸克形成强子的过程称之为强子电离.

夸克间的强相互作用. 我们知道,所有的强子,抑或由三个夸克组成(重子),或由一个夸克、一个反夸克组成(介子).是什么原因不能两夸克或四夸克的组成呢?再说,量子力学的泡里不相容原理说明在粒子内同一个态上不可能存在两个完全相同的费米子.这在原子和原子核物理中得到了成功的应用.我们预料,它对强子谱也应有同样的应用.按照泡里不相容原理,我们所观察到的重子 $\Delta^{++}(uuu)$ 以及 $\Omega^-(sss)$ 不能存在.因为它们中的三个相同的夸克在同一个态上.但在实验上又确实观察到了它们的存在.为了顺从泡里原理,我们可以假定每一种夸克存在三种不同的态,用颜色红、绿、兰分别标记.这些 Δ^{++} 中的三个 u 和 Ω^- 中的三个 s 就不是完全相同的费米子了.我们可以认为三个红、绿、兰的夸克构成一个无色(或白色)态的重子;一个带颜色的夸克和一个带颜色的反夸克构成一个无色的介子.也可以说仅仅是夸克组成的无色态才能分离出来,成为我们可观察到的强子.其他的两夸克或四夸克的组合不能形成无色态,所以不能构成相应的粒子.

为什么直到现在还观察不到自由夸克?这可以认为夸克之间的相互作用是异常强烈的,大概永久地被囚禁,这也与颜色单态不能单独地分离出来的思想相一致.但是,夸克又能与高能入射粒子猛烈地起作用,说明它在强子中又是比较自由的.这种矛盾的情况可以这样解释:夸克在极小的距离上仅表现为弱相互作用,当距离加大时,作用力就增强;当到达强子大小的距离时,作用力达到极大,起码现有加速器的能量不能把它们拉出来.可以把强子想像成一个泡,夸克在泡中能自由地运动,但不能从泡中逃离.

如何从动力学上来理解夸克的这种怪癖脾气?我们先观察一个电现象.如果我们说某物体带了一个单位的电荷,这是一个确定的和固定的量.但是,如果把把这个电荷放在其他带电荷的、且可自由运动的物质之中,这个电荷的效应就可以被改变.例如,把一个电子放在介质中,介质分子正、负电端被电子影响,使之不再随机取向,如图 4(a) 所示,而是按一定规律排列起来,如图 4(b) 所示.这些分子的取向效应(介质极化),使电子的电荷效应在有限距离上被屏蔽或减弱了.只有当观察的距离非常小时,电子电荷的整个大小才显示出来.所以可以说,在短距离范围,电子的有效电荷较大,远距离范围,它的有效电荷较小.

我们再看在量子理论意义下的真空,它是一个复杂的、沸腾的介质.在其中,有时可以瞬时存在虚带电粒子对(主要是 e^+e^- 对),这叫做真空涨落.真空

涨落和分子一样可以被极化.因此在量子电动力学(QED)中,预料有效电荷在短距离上增加,显示有较强烈的作用力.事实上,在原子谱中观察到了这种效果.



图 4 电极化的分子减小了电子的电荷效应.

(a) 介质分子随机取向;(b) 介质分子极化.

强相互作用理论中,有两个相反的效应.一个是:涨落真空的颜色荷的极化带来的屏蔽效应.屏蔽或真空极化可以这样理解:真空就像是随机取向的三角(三色)物体的集合,如图 5(a) 所示.但是当把一个颜色(如绿夸克)放到该真空中,颜色三角就定向排列,如图 5(b) 所示,就把颜色屏蔽起来,使得在较大的距离上呈现较小的颜色荷效应.另一个效应是称为“伪装”的效应.颜色是夸克的属性,而轻子没有.把颜色考虑成相互作用荷,当在红、蓝、绿夸克中取颜色对称性作为度规理论的基础时,在夸克中引起的相互作用是由胶子传递的.对于不同的颜色-反颜色的结合,有 8 种胶子.在量子色动力学(QCD)中,夸克可以如图 6(a) 相互作用,这里一个蓝夸克和一个绿夸克经过胶子的作用交换颜色,成为相应的绿夸克和兰夸克.因为胶子携带颜色,它们可以发生自相互作用,如图 6(b) 所示.QED 中的光子是电中性的,所以没有自相互作用.这后一个效应使夸克间的相互作用在极短距离上减弱.强相互作用荷(有效作用荷)是以上两种相反效应之间竞争的结果.最终的效果是有效作用荷在短距离上减小,与简单夸克模型及夸克禁闭的条件相符.

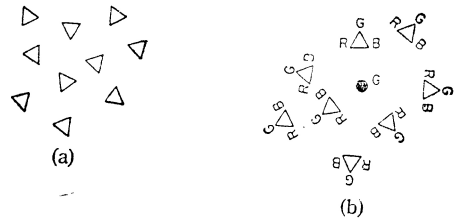


图 5 真空效应屏蔽了夸克的作用力

正因为在小距离范围,夸克的作用为弱作用,因此在一次猛烈的高能碰撞中,它的反应率可以用 QED 方法计算.如图 7(a) 所示, e^+e^- 碰撞,通过交换 ν 产生 $q\bar{q}$ 对,最后形成两强子喷注.同时也可能产生图 7(b) 所示的现象,反应出的一个夸克发射一个胶子.像夸克一样,胶子通过“物质化”也形成一个强子

喷注。在 PEP 和 PETRA 贮存环上研究 e^+e^- 湮灭

反应时清楚地探测到了三喷注事例。

QED 图解法在高能碰撞研究中有很高价值，但也有问题。首先，在现有能量下，即现有的碰撞粒子距离上，强相互作用仍然明显地强于电弱相互作用。第二，图解法是描述的孤立的夸克、胶子的反

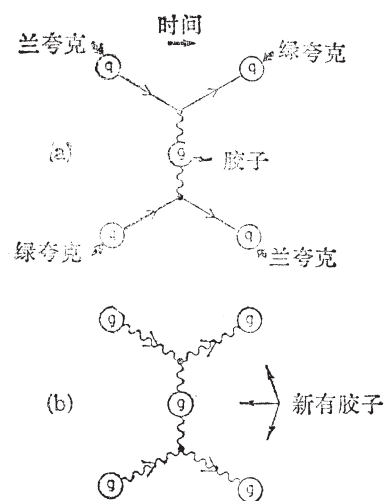


图 6 夸克-胶子相互作用和胶子-胶子自相互作用

应。但是，迄今为止，在实验室中，夸克和胶子只在强子中存在，因此还必须考虑强子结构的有效相互作用，而这样的理论还没有成功。

现代理论

计算和实验的结果，似乎表明夸克和胶子永远禁闭，但是，人们是不甘心的。有什么办法使夸克、胶子解禁呢？物理学家的推论和设想是：当把强子物质压缩到高密度和加热到极高温度（通过极高能的粒子碰撞达到），强子将失去它的个性，可能出现相变。强子泡迭加和合并时，夸克和胶子也许可以在大的距离上自由迁移。这样的物质叫做夸克-胶子等离子体。在宇宙中，夸克-胶子等离子体可能存在于塌缩的超新星和中子星中，实验室中，物理学家建议建造相对论性的重离子碰撞机，以实现夸克-胶子解禁这一伟大目标。

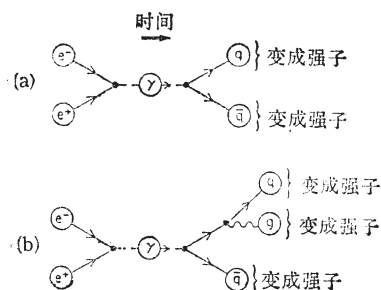


图 7 很高能粒子碰撞中夸克的相互作用

有了夸克的概念和弄明白了强子怎样由夸克组成以及夸克怎样相互作用，使我们对物质性质的理解大大地推进了一步，而且在所有类型的相互作用中——电磁的、弱的和强的相互作用中都揭示了物质的夸克结构，使我们有可能在最基本的水平上测量和理解基本力的特征。

有了夸克的概念和弄明白了强子怎样由夸克组成以及夸克怎样相互作用，使我们对物质性质的理解大大地推进了一步，而且在所有类型的相互作用中——电磁的、弱的和强的相互作用中都揭示了物质的夸克结构，使我们有在最基本的水平上测量和理解基本力的特征。