

喷射现象

郁 宏

“Jet”通常译作“喷射”，也有人认为译作“注”比较贴切。它指的是在高能电子和正电子对撞、高能电子和强子碰撞、高能中微子和强子碰撞、以及高能强子的对撞中，会产生许多终态强子，它们并不是朝四面八方以同样几率飞出去(就是说，不是各向同性的)，而是形成“喷射”，即终态强子集中在某些方向射出，如图2所示。这些方向称为“喷射”轴(“Jet”轴)。这种“喷射”是认识强子结构的一种十分重要的物理现象。

在研究强子结构的进程中，1969年提出了一种唯象的物理模型——部分子模型，它认为强子是

由点状的部分子所组成的，以高能电子和强子的深度非弹性散射为例(见图1)，在某种特定的坐标系中，强子高速运动，由于相对论时间延缓效应以及量子力学测不准原理，在碰撞的瞬间，虚光子只和强子中的单个部分子发生相互作用，而部分子与部分子之间并不存在相互作用(准自由)，因而也就没有相干效应。这样，电子和强子的深度非弹性散射实际上就是电子和组成强子的各个部分子的弹性散射的总效应。分析起来特别简单。这是部分子模型在解释著名的无标度性规律等方面取得很大成功的精华所在。

那么部分子是什么东西?由实验事实，例如测得纵向极化虚光子引起的散射总截面 σ_L 与横向极化虚光子引起的散射总截面 σ_T 之比 $R = \frac{\sigma_L}{\sigma_T}$ 接近于零，可

以推断带电部分子是自旋为 $1/2$ 的费米子。一个十分自然的设想就是认为带电部分子即夸克，现在这一点已被大多数人所承认。所以通常称这个模型为夸克-部分子模型。可是，迄今为止人们只看到散射后出来很多强子，并没有发现自由夸克。当然，一种可能是夸克质量很重，现有的高能加速器的能量还不能把它轰出来；还有一种可能是由于某种动力学的原因，夸克被禁

闭在强子中，不能被分离出来。夸克-部分子模型是这样来解释并处理这个问题的，它认为重子由三个夸克(价夸克)组成，介子由一对正反夸克(价夸克)组成，在它们作高速运动的情况下，由于真空极化效应，在它们周围存在着大量低速微夸克形成夸克海。仍以高能电子和强子的深度非弹性散射为例，当强子中的一个夸克与虚光子相碰，它就获得了很大的动量，但还没走多远，这个反冲的夸克即与周围的微夸克发生复杂的终态相互作用，最后结合成许多强子射出。这个过程通常称为这个夸克碎裂成许多强子，形成“喷射”。按照这种解释，一方面说明了为什么在这类高能碰撞过程中见不到自由的夸克，同时很自然地预言了这些高能碰撞过程最终会有“喷射”出现，“喷射”轴的方向就是这个反冲夸克的动量方向。

对于高能碰撞过程末态强子现象的研究，由于终态相互作用不清楚，所以一般是很复杂的，只能作一些唯象的讨论，或者用统计模型对集体行为作一些讨论。但如果我们抓住“喷射”这个重要的物理现象，

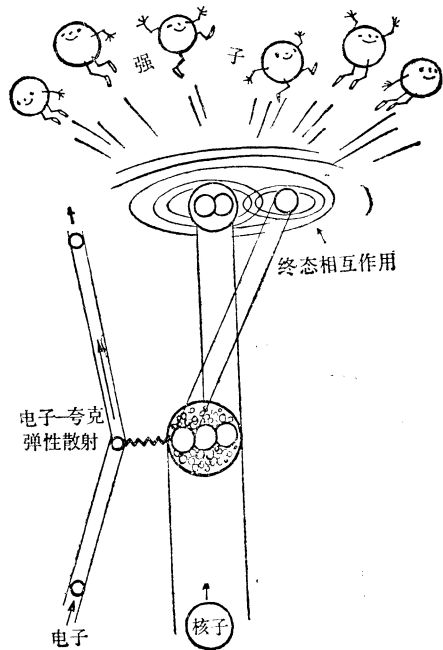


图 1

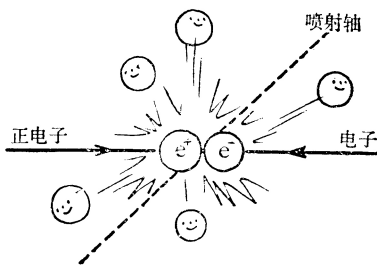


图 2(a)

则可以情况大为简化,并且可以深入到强子内部,使我们得到不少有关强子结构的知识。

我们以高能电子与正电子碰撞为例。当电子和正电子以相当高的能量互相对撞时,它们湮没成一个虚光子,这个虚光子又转化为一对正反夸克,它们各带有很大的动量,在与周围的微夸克发生相互作用后就形成两个强子“喷射”,喷射轴就是正反夸克的动量方向。见图3。若取电子和正电子的质心坐标系,那么这二个“喷射”轴就在一直线上。这个图象从理论上及实验上提供给我们处理这个问题的有效方法。比方说,从理论上,我们可以用简单的夸克-部分子模型及相当准确的量子电动力学的方法,求出这个反应过程末态强子的角分布;而从实验上简单地讲,我们可以对每一个事例定义一个叫做“球度”的量,用 S 表示,其定义为

$$S = \frac{3 \sum_i p_{\perp i}^2}{2 \sum_i p_i^2}$$

其中 i 用来标志事例中的带电强子, $p_{\perp i}$ 为相对于某一方向的第 i 个强子的横向动量。 p_i 就是第 i 个强子的动量,使 S 极小的这个方向就是“喷射”轴的方向。这样我们就

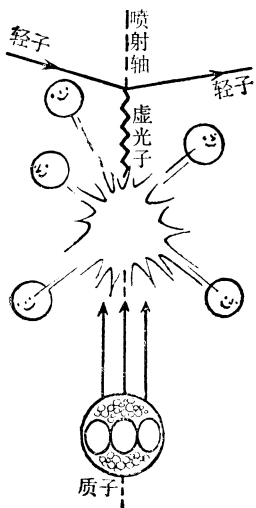


图2(b)

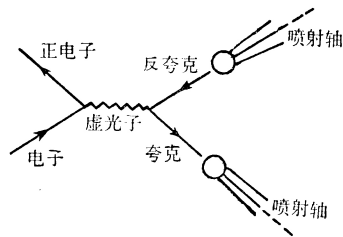
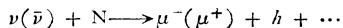
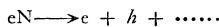
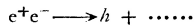


图 3

能最后得到实验上的这个过程强子“喷射”的角分布。由于目前加速器所能达到的能量还不够高,再由于实验上的几何接收度,触发偏差,动量分辨率,数据分析截断,中性粒子的处理,确定“喷射”轴的误差等等因素,问题不是这么简单,但是我们可以考虑这些因素,用蒙特-卡罗模拟方法来比较好地处理这个问题。最后得到的角分布和理论上的结果(假定夸克自旋为 $1/2$)符合得相当好。在这里能够确定夸克的自旋就是 $1/2$,无疑也是对夸克-部分子模型的一个有力支持。

对于下列高能单举和双举反应:



我们可以抓住“喷射”这个共同的特点(为简单起见,可略去强子垂直于“喷射”轴的动量分量及它的质量,在高能情况下这是很好的近似),引入夸克衰变函数 $D_q^h(Z)$ (它表示 q 夸克在 $Z \rightarrow Z + dZ$ 间隔中产生强子 h 的数目,其中 Z 是此强子带 q 夸克动量的份额),将这几类过程联系起来,得到与实验符合的结

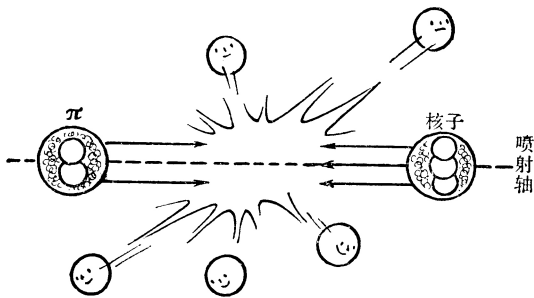


图2(c)

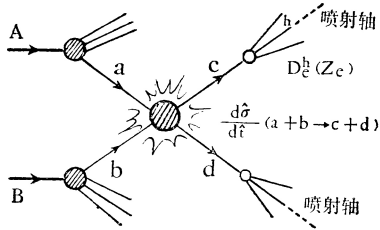


图 4

果。这也反过来说明这种机制是相当合理的。

高能强子碰撞过程中的大横动量现象对于研究强子结构和动力学是很有意义的。这种带大横动量的强子是如何产生的?这直接反映了组成强子的夸克是如何相互作用的,因此十分重要。当然可以构造许多模型来讨论这个问题。例如多重边缘模型、火球模型等等,而一个认为较好的作用机制如图4所示:

其中A、B是二个强子,当它们相碰时,来自A强子的 a 夸克和来自B强子的 b 夸克发生大角度弹性散射 $a + b \rightarrow c + d$,然后 c 夸克再碎裂成一簇强子,形成大横动量“喷射”,其中包括强子 h 。用这种机制可以对高能强子碰撞中的大横动量现象进行细致的讨论。可具体给出夸克弹性散射的微分截面 $\frac{d\sigma}{dt}$ 的形式,还可给出一些很有趣的预言,对于进一步了解相互作用机制是十分有益的。

目前,在实验上寻找是否有3“喷射”以至多“喷射”现象存在是一件很令人感兴趣的事情。因为对夸克-部分子模型的分析发现,夸克

所携带的动量只有强子总动量的一半,而另一半上哪儿去了?它应由不参加电磁作用和弱作用的另一种中性部分子所携带,这种部分子普遍认为就是胶子。在一种目前引起普遍重视的强相互作用动力学理论——量子色动力学(QCD)理论中,胶子是作

为色规范场的量子而引进的。根据这种理论，在高能电子和正电子碰撞中，在高能碰撞产生的重夸克的束缚态(如 Υ) 的衰变中，等等，应出现多“喷射”现象。所以如果发现了这种多“喷射”现象，无疑是对 QCD

的一个强有力支持，也是对强子结构认识上的一大进展。

此外，更加细致地研究“喷射”现象，特别是对初态很简单的高能电子和正电子碰撞产生的“喷射”的方位角关联等等问题的研究，也是

当前 QCD 研究中的一个重要内容。

总之，关于“喷射”这种物理现象的研究，对于我们进一步了解强子结构，认识“基本”粒子相互作用及相互转化的规律是十分重要的。

(题图、插图：吴文渊)