

三喷注的发现

——丁肇中实验小组的一个最新实验

唐孝威 郑志鹏

1979年8月在高能物理界传来了一个好消息:在能量27.4—31.6 GeV范围内,丁肇中教授领导的实验小组和在佩特拉加速器上工作的其它三个小组互相独立地发现了三喷注的现象。许多科学家认为这意味着人们首次找到了胶子*辐射的实验证据。十年前,理论物理学家就预言着胶子的存在,认为这是一种传递层子和层子之间强相互作用的媒介,可是在实验上一直没有找到令人信服的证据。而三喷注的发现,直接显示出胶子的踪迹,使得人们对基本粒子的认识又前进了一步。这个发现也是对目前的量子色动力学(QCD)理论的有力支持。

实验是在西德汉堡德国电子同步加速器研究中心的“佩特拉”(PETRA)加速器上进行的,因此首先介绍一下这台加速器。

佩 特 拉

佩特拉将正、负电子分别加速到足够能量然后相撞,因此也称正、负电子对撞机。它的周长是2.3公里,功率为4.5兆瓦,加速的最高能量(设计指标)是

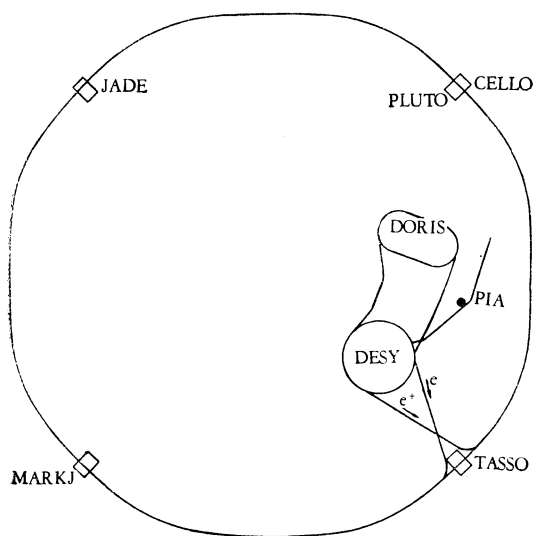


图1 佩特拉(PETRA)加速器和四个实验区

2×19 GeV(即19 GeV的正电子和19 GeV的负电子相撞)。这是目前世界上能量最高的正、负电子对撞机,它有两个预注入器:一个叫DESY,一个叫DORIS(图1)。DESY是一台电子同步加速器,最大能量为6.5 GeV。为了提高正电子的流强,首先将正电子在DESY中加速到2.2 GeV,然后进入DORIS存储环“贮存”起来(以后将由一个称为PIA的存储环取代),积累到一定流强后再回到DESY加速至6.5 GeV。正、负电子从DESY注入到佩特拉对撞机,沿着相反的方向运转。因为正、负电子都分别调制成两个“束团”沿轨道运动,而且束团的发射时间又严格按一定规律,因此使得正、负电子束团只在四个固定点相撞。相应于每一个碰撞点有一个实验区,一共可以有四个实验组,分别在四个实验区,以同样能量的正、负电子同时做实验。丁肇中领导的“马克-杰”(MARK-J)小组就是其中的一个。

马 克 - 杰

马克-杰小组是由五个协作单位组成,包括西德亚琛大学第三物理研究所、德国电子同步加速器研究中心、美国麻省理工学院、荷兰核子和高能物理研究所以及中国科学院高能物理研究所(以上按英文字母顺序排列)。我国有二十七名实验物理工作者参加了这个组的工作。全组共有七个国籍的五十几名科学工作者。在一年左右的时间内,这个组建造、安装、调试好了一台称为“马克-杰”的探测装置。当正、负电子相撞时,要产生各种粒子,“马克-杰”装置如同“眼睛”一样,可以辨别、分析、记录这些粒子。马克-杰小组就是用这台大型探测装置发现三喷注的。

马克-杰装置的长、宽、高都有四、五米,重四百多吨。是由数百个不同类型的探测器、数千台电子学仪器、一个大型磁铁和数台电子计算机组成。为了能记录射向各个方向的粒子,探测器像一个用积木块堆集起来的方盒子,将对撞中心包围起来,使得探测角度近于 4π 立体角。下面,我们从里向外分层介绍各个探测器的结构和作用。

图2给出了马克-杰装置的剖面图。正、负电子在束流管道内相撞。我们定义粒子出射方向与束流管

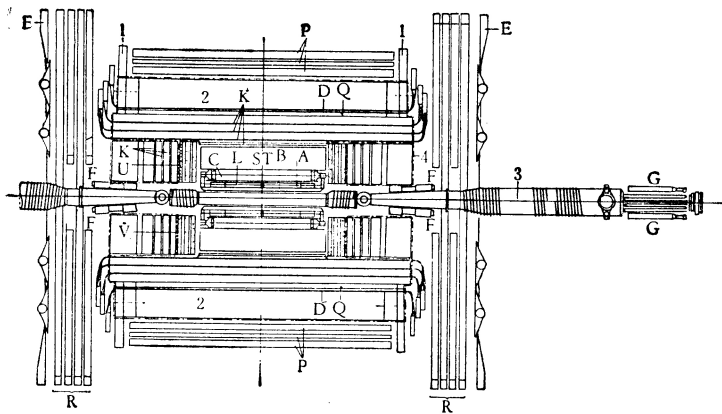


图2 Mark-J探测器剖面图

A、B、C 簇射计数器, D、E 触发计数器, F、G 监测器,
K 量能器, L 有机玻璃契仑柯夫计数器, S、T、U、V、Q、
R、漂移室
1 转动铝环 2 磁铁 3 束流管道 4 线圈

道中心线的夹角(极角)为 θ , 而围绕中心线的转角(方位角)为 φ , 则马克-杰装置复盖的范围是 θ 方向: 9° 到 171° , φ 方向: 0° 到 360° . 紧靠束流管道是32个有机玻璃契仑柯夫计数器, 它们只记录带电粒子, 而对中性粒子不灵敏. 往外是簇射计数器, 分别由A、B、C三层组成. A计数器二十个, B计数器二十四, 它们都由三层塑料闪烁体(厚0.6 cm)和铅板(厚0.5 cm)交错组成夹层. C计数器比A、B都大, 共有十六个, 每个由12层塑料闪烁体和铅板组成. A、B、C每一个计数器两端都分别接有一个快速光电倍增管. A、B、C簇射计数器是用来测量粒子的能量以及位置的. 再往外是八个漂移室(每个11层), 它们用来测量强子簇射的径迹和测量 μ 子的角度. 漂移室外是量能器, 由磁铁和闪烁体夹层组成. 闪烁体共有四层, 每一层厚度为1 cm. 量能器的作用是测量强子能量. 量能器最后一层是叫作D的触发计数器, 它可以作 μ 子的触发选择, 又可以排除宇宙线本底. 磁铁中的磁场是环流型的, 强度为一万七千高斯, 用来偏转 μ 子. 最外一层是漂移室, 用来测定 μ 子的出射角和动量. 在两端小角度区, 有四层闪烁计数器(厚为1 cm), 插到10厘米厚的铁板当中, 用来测量 $12^\circ < \theta < 30^\circ$ 区域的簇射能量.

正、负电子对撞, 不外乎产生: 正、负电子、 γ 光子、强子和 μ 子(重轻子衰变为中微子、强子或电子或 μ 子). 正、负电子和 γ 光子产生很强的电磁簇射, 很快损失能量, 因此它们不会穿过C计数器以外, 而强子产生电磁簇射的可能性小, 它们可穿过簇射计数器跑到量能器, 将剩余能量全部损失掉, 停在里面. μ 子的射程最长, 可穿过量能器、外层漂移室. 因此根据粒子的径迹和能量则可区别出粒子的类型.

粒子出射 φ 方向的位置是由探测器的几何位置确

定的; θ 方向的位置是由簇射计数器、量能器输出的时间、脉冲幅度的信号计算得到的. 对马克-杰探测器, θ 和 φ 的精度分别达到 $<5^\circ$ (对 e, τ)和 $<15^\circ$ (对强子).

这台装置的特点是: 可以测量除中微子以外的中性粒子(例如 $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$, 而 γ 很容易在簇射计数器中探测到); 可以沿 θ, φ 方向转动, 由于采用积木式结构, 建造、安装也较方便, 提高了建成速度.

三喷注的发现

马克-杰装置建造的目的之一是对正、负电子对撞产生的强子喷注*的现象进行研究, 这是了解强子内部结构的一个很重要的方法. 在正、负电子质心系总能量低于17 GeV时, 只能

观察到双喷注*现象. 当能量增加到27.4 GeV以上, 马克-杰小组观察到了过去从未见到过的三喷注*现象. 目前最合理的解释是除两个喷注是层子喷注外, 其中第三个喷注是胶子辐射引起的.

那么, 三喷注现象是如何在实验上发现的呢? 为了对三喷注现象进行定量的分析, 针对马克-杰装置的特点, 引入了能流和扁度两个物理量.

下面我们先介绍一下能流和扁度这两个用来描述喷注的概念. 我们对每一个事例中打中某一计数器的粒子或粒子束, 定义一个能流矢量 E_i , 它的方向为从对撞中心到计数器发出信号位置的连线方向, 它的大小为这个计数器中所测到的能量. 这些数据都可以从实验中直接得到.

我们再用下面的方法来定义三条正交轴, 描述每个事例的能量分布:

1. 第一条轴 e_1 : 能流在 e_1 方向的投影值达到最大值. 由此同时又可定义冲度:

$$\text{冲度} \equiv \max_i \frac{\sum_i |E_i \cdot e_1|}{\sum_i |E_i|}$$

E_i 是第 i 个计数器量到的能流, $|E_i \cdot e_1|$ 是能流在 e_1 方向的投影绝对值, \max 是指出要选择 e_1 , 使 $\sum_i |E_i \cdot e_1|$ 取最大值. $\sum_i |E_i|$ 是观察到的总能量. e_1 称为冲度轴.

2. 第二条轴 e_2 : 在与冲度轴 e_1 垂直的平面上, 又有各个方向, 能流在这些方向的投影也各不相同. 但是可以找到一个 e_2 方向(它也在与 e_1 垂直的平面上), 使能流在 e_2 方向的投影大于能流在上述平面中其他

方向上的投影。由此同时又可定义长轴量：

$$\text{长轴量} \equiv \max_i \frac{\sum_j |\mathbf{E}_j \cdot \mathbf{e}_2|}{\sum_j |\mathbf{E}_j|} \quad (\mathbf{e}_2 \text{ 限于在垂直 } \mathbf{e}_1 \text{ 的平面上})$$

3. 再定义与 \mathbf{e}_1 、 \mathbf{e}_2 正交的一个方向为 \mathbf{e}_3 ，它也在垂直于 \mathbf{e}_1 的平面上，实验上观察到能流沿这个轴的投影的总和非常接近于极小值，同时又可定义短轴量：

$$\text{短轴量} \approx \min_i \frac{\sum_j |\mathbf{E}_j \cdot \mathbf{e}_3|}{\sum_j |\mathbf{E}_j|}$$

min 的意思是在与 \mathbf{e}_1 垂直的平面上找一个方向 \mathbf{e}_3 ，使得能流在 \mathbf{e}_3 方向的投影绝对值小于能流在上述平面中其他方向上的投影绝对值。

我们再定义一个很重要的概念：扁度

$$\text{扁度} \equiv \text{长轴量} - \text{短轴量}$$

很显然，在双喷注情况下，在 \mathbf{e}_2 、 \mathbf{e}_3 所在平面上，

能量的分布是各向同性的，因此扁度近似于零。而在三喷注情况下，胶子带走了一部分垂直动量，因而破坏了 \mathbf{e}_2 、 \mathbf{e}_3 所在平面上能量分布的各向同性，因此扁度 > 0 。

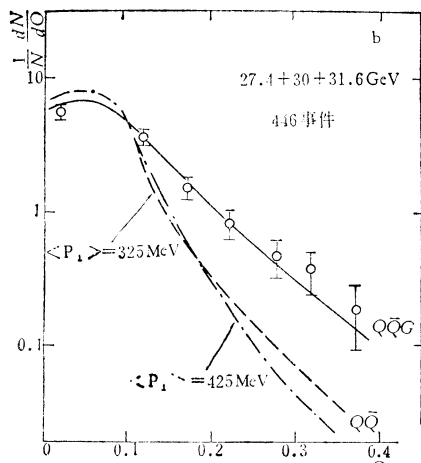


图3 胶子存在的一个证据

在马克-杰实验中，当正、负电子质心系总能量在 17 GeV 以下，实验值与双喷注模型符合较好。在 27.4, 30, 31.6 GeV 三个能区，共获得 446 个强子事例（在四个组中是最多的一个）。用这些事例绘成图 3，横坐标是扁度 O ，纵坐标是每单位扁度的事例数 dN/dO 除以总事例数 N ，虚线和点划线相应于用双喷注模型计算的结果（虚线相应于平均横动量 $\langle P_{\perp} \rangle = 325 \text{ MeV}$ ，点划线相应于平均横动量 $\langle P_{\perp} \rangle = 425 \text{ MeV}$ ）。很明显，实验点在虚线或点划线上，与双喷注模型偏离很大，但引入三喷注（即包括胶子辐射）模型，则计算值（实线）与实验点符合相当的好（使用量子色动力学理论计算）。因此实验显示出三喷注的特性。

另外，还可以从另一个方面更形象地看到三喷注的能流分布情况。图 4 给出冲度轴、长轴量轴平面，

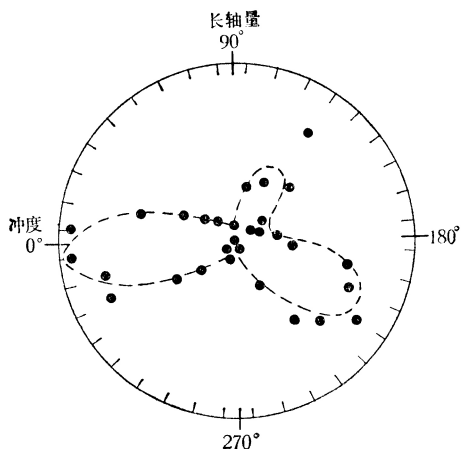


图 4

即层子、反层子、胶子所在平面的累积能流分布图。黑点是实验点，清晰地显示出三喷注分布，其中右上角的是胶子引起的喷注，虚线是包括胶子辐射的计算值，与实验符合较好。

综上所述，马克-杰实验发现了三喷注，找到了胶子辐射的证据。这是迄今为止人们了解到有关胶子的最直观、可靠的情报。这样，胶子就不再是一种抽象的，仅仅是理论上假设的粒子。马克-杰以及佩特拉其它三个小组的实验揭开了胶子的神秘的外衣，为人们进一步了解它、认识它创造了一个良好的开端。

展 望

我们说这个最新实验仅仅是一个良好的开端，是因为还有许多有关胶子的特性有待于我们去揭示。例如：胶子的质量是多少？自旋，宇称等特性怎样？胶子是不是矢量粒子？……这许多问题有待于实验去解决。这就需要把实验做得更精、更细。提高实验精度的办法有以下几个：

1. 积累更多的强子事例，使统计误差更小，增加实验精度。
2. 对胶子辐射进行更多的定量的研究。例如测量胶子引起喷注的角分布。
3. 提高加速器能量。因为加速器能量越高，打出的胶子就越多，实验现象也就越明显。在不久的将来，佩特拉加速器总能量将提高到 38 GeV。
4. 对探测装置做进一步改进，提高能量、位置的分辨率……以获得更精细的喷注分析结果。马克-杰实验也有这样的计划。

我们可以满怀信心地期望：不久将会传来关于胶子方面的更鼓舞人心的实验结果。

* 请参考本期名词解释