

# 马克-杰装置近一年来实验结果介绍

唐孝威 童国梁

德意志电子同步加速器中心(简称 DESY) 座落在西德汉堡西郊美丽的阿托马欣地区。周长 2.3 公里的加速圈把整个研究所围了起来。这个研究所的佩特拉(PETRA) 正负电子对撞机于 1978 年 10 月开始运转。在佩特拉中, 正负电子束的能量最终目标是 19GeV (19 京电子伏), 即对撞后质心总能量为 38GeV。佩特拉是目前世界上能量最高最先进的正、负电子对撞机, DESY 由此得到极大的声誉, 使它成为当前许多物理学家所向往的地方。

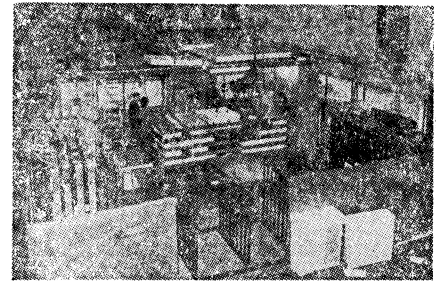


图 1 马克-杰组漂移室实验大厅

在佩特拉中, 高能的正、负电子在预先设计好的四个交叉点上对撞, 发生相互作用。就在这些交叉点上, 物理学家设计了一系列的探测器, 例如漂移室、多丝室、簇射计数器、闪烁计数器、契伦柯夫计数器等, 根据一定的实验目的, 把它们巧妙地组合起来进行实验研究。在佩特拉上, 马克-杰 (Mark-J) 及 PLUTO、TASSO 和 JADE 等装置的实验厅正是分别安在这四个对撞点上。马克-杰组漂移室实验大厅见图 1。

在高能物理领域对实验数据的处理不仅量大, 而且非常复杂, 所以每个高能实验中心都有一个庞大的计算中心, DESY 也不例外。在那儿, 三台当代最先进的

的 IBM 大型计算机(两台 IBM 370/168, 一台 IBM3033) 组成了计算网络, 通过五十个终端与用户联系, 该计算中心服务良好, 效率很高。

丁肇中教授领导的马克-杰组的实验厅位于佩特拉圈的西南角。在这组里工作的科学家来自美、德、中、荷、日、英、法等不同的国家。在丁肇中教授领导下, 通过全组成员的共同努力, 在佩特拉运行不到一年的时间里, 马克-杰组获得了可喜的实验结果。

## 马克-杰实验简介

**马克-杰实验设计的主要目的**

1. 研究电磁相互作用和弱作用的相干效应。按照温伯格-萨拉姆弱电统一理论, 应当存在质量为 70—80GeV 的中间玻色子  $Z^0$ 。在佩特拉能区, 虽然不能产生和探测这种粒子, 但可以通过弱作用和电磁作用的干涉效应的测量来检验弱电统一的理论。
2. 寻找新粒子, 寻找新的层子、胶子和新的轻子。大家知道, 1974 年  $J$  粒子的发现和 1977 年  $\Upsilon$  粒子的发现已把层子的种类扩大到 5 种, 即  $u$ 、 $d$ 、 $s$ 、 $c$ 、 $b$ , 问题是当相互作用能量继续升高时, 会不会出现第六种层子? 另外, 对轻子的研究也存在类似的问题: 电子、 $\mu$  子和近年来发现的重轻子  $\tau$  以及它们所对

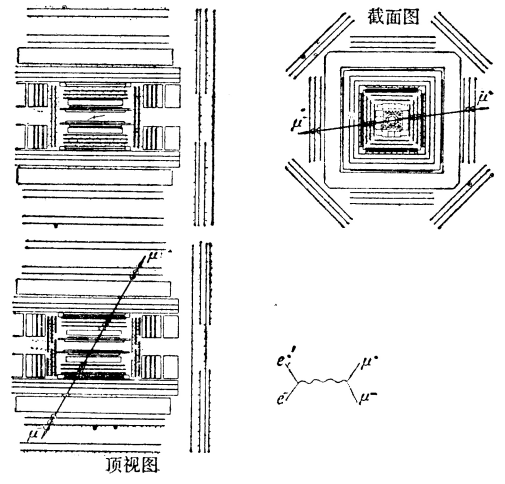


图 2  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$  事例图  
 $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^- (1r)$   
 $E_{CM} = 31.6 \text{ GeV}$

## 世界高能实验中心介绍

应的中微子外,是否还存在新的轻子? 3. 检验在新的能区下,量子电动力学的适用性如何? 在量子电动力学中,电子、 $\mu$ 子和重轻子 $\tau$ 都是作为没有结构的点粒子来处理的,那么在佩特拉这样的高能区,这样的假设还合适吗? 很显然,上述这些问题都是物理学中一些基本的问题,也是一些很有趣的问题。

**实验概况** 关于马克-杰装置的结构在本刊79年第4期中有较详细的描述,这儿从略。

实验数据经过小型计算机在线处理后记录在磁带

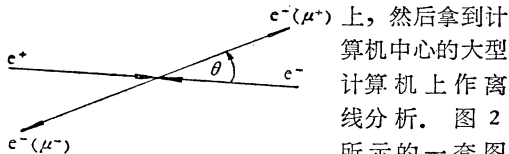


图3  $e^+ + e^- \rightarrow e^+ + e^-$  (或  $\mu^+ + \mu^-$ ) 反应

所示的一套图象反映了一个  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$  事例。因为 $\mu$ 子有很强的穿透作用,所以能穿透一米的磁铁,又由于这种过程的 $\mu$ 子动量很高,几乎等于电子束流的能量,所以 $\mu$ 子径迹弯曲很小。这些相互作用的径迹显示图都是通过复杂的离线分析处理后描出的。

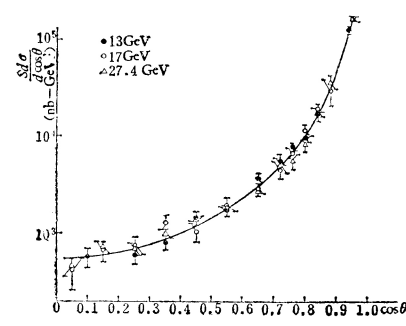


图4  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$  理论与实验比较

**主要实验结果**

1978年10月,佩特拉电子对撞机开始运转,到1979年8月底,佩特拉正负电子对撞机先后运行的质心能量分别是13GeV、17GeV、22GeV、27GeV、30GeV、31.6GeV,在这期间,马克-杰装置取得的主要实验结果有:

1. 量子电动力学的检验我们研究了  $e^+ + e^- \rightarrow e^+e^-$ 、 $\mu^+\mu^-$ 、 $\tau^+\tau^-$  以及  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$  的所有过程,见图3。由量子电动力学,我们可以得出上述各种反应对  $\cos\theta$  的微分截面。而通过实验则可以记录到相应反应的角分布,比较实验点与理论曲线的符合情况,这样就可检验量子电动力学的适用性。图4给出了  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$  散射的理论和实验的比较。可见两者的符合是很好的。

为了在新能区定量地检验量子电动力学,引入了叫做形状因子的参数。

$F(q^2) = 1 \mp q^2/(q^2 - A_{\pm}^2)$ , 这儿  $q^2$  是四动量转移的平方,  $A$  这个量叫截断能量。

通过比较引入了形状因子后的理论结果与实验数据,采用  $\chi^2$  的检验方法,在95%的可信度下求出的截断能量  $A_{\pm}$  见下表。

$$F(q^2) = 1 \mp \frac{q^2}{q^2 - A_{\pm}^2}$$

轻子 $l$	电子 (GeV)	$\mu$ 子 (GeV)	重轻子 ( $\tau$ ) (GeV)
$A_-$	95	97	53
$A_+$	74	71	47



图5(a) 月球环绕地球旋转,地球半径: 6371.2公里,月球直径3477公里=0.27地球直径,月、地距离384,000公里=60.3地球半径(示意图)



图5(b) 电子环绕质子旋转(氢原子系统),质子半径  $\sim 10^{-13}$ cm, 电子半径  $< 10^{-16}$ cm, 氢原子中的“月球”可要小得多

根据实验所求出的  $A$  值,并运用测不准关系,可以说轻子  $e$ 、 $\mu$ 、 $\tau$  的半径都小于  $2 \times 10^{-16}$  厘米,也就是说,量子电动力学在这么小的距离下仍然适用。

2.  $R$  值的测量  $R$  值的定义为  $e^+e^- \xrightarrow{\text{通过单光子}} \text{强}$

子的截面与  $e^+e^- \xrightarrow{\text{通过单光子}} \mu^+\mu^-$  的截面之比。为什么要专门研究这个参数呢? 这是因为  $R$  值的大小与层子的“味”数紧密地相联系。当在某能区出现新的层子时,  $R$  值在这能区中和过后就变大。量子色动力学预言,  $R = R_0(1 + \alpha_s(s)/\pi)$ , 式中  $R_0 = 3 \sum_f Q_{if}^2$ ,  $Q_{if}$  表示  $f$  层子的电荷,  $\sum_f$  表示对层子的所有种类(味数)求和,式中:

$$\alpha_s = \frac{12\pi}{(33 - 2N_f)} \frac{1}{\ln s/\lambda^2}, S = E_{CM}^2 \text{ (即质心能量平方)}, \lambda \text{ 由实验决定. } N_f \text{ 表示层子的味数,即在这种能量下出现的层子的种类数.}$$

下表给出了各种层子所带电荷值

层子种类	$u$	$d$	$s$	$c$	$b$	$T$
电荷	$2/3e$	$-1/3e$	$-1/3e$	$2/3e$	$-1/3e$	$2/3e$

表中  $T$  层子(顶层子)仅是一种预言,尚未被实验证实,  $e$  表示电子电荷(绝对值)。

下表给出了利用上述  $R$  的理论公式,质心总能量

$E_{CM}$  分别为 22GeV 和 31.6GeV 情况下的  $R$  预期值。

层子 味数	$E_{CM}$	
	22 (GeV)	31.6(GeV)
$u, d, s$	2.14	2.13
$u, d, s, c$	3.56	3.54
$u, d, s, c, b$	3.92	3.90
$u, d, s, c, b, T$	5.35	5.32

而马克-杰测得的实验  $R$  值列表如下：

马克-杰实验  $R$  值

质心能量 (GeV)	积分亮度 (nb <sup>-1</sup> )	事例数	$R$ 值±统计误差	系统误差
13	53	98	4.6±0.5	0.7
17	60	68	4.9±0.6	0.7
22	50	42	4.7±0.7	0.7
27	508	216	3.8±0.3	0.6
30	604	254	4.2±0.3	0.6
31.6	243	88	4.0±0.5	0.6
总计	1518	766		

实验表明,在佩特拉能区,实验结果与五味层子的假设相符。

3. 喷注结构的研究 在  $e^+e^- \rightarrow$  强子的事例

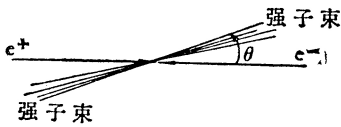


图 6 喷注现象

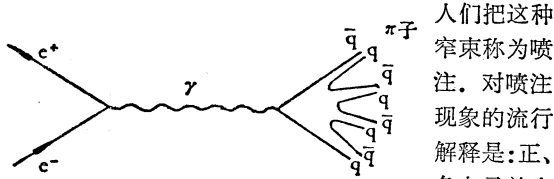


图 7 喷注产生的解释,  $(q\bar{q})$  表示一个介子 湮没为虚光

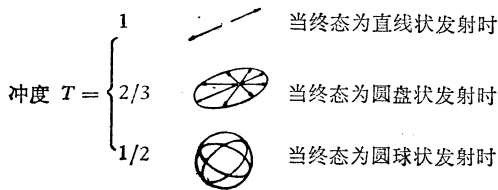


图 8

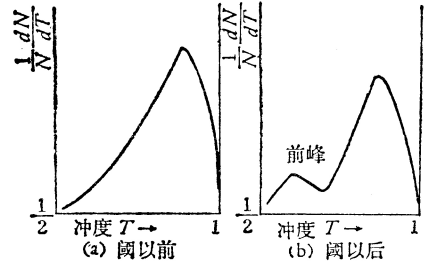


图 9

子,然后虚光子物质化为自旋 1/2 的类点的正反层子(由动量守恒,被产生的正、反层子必然是反向的)。这两个正、反层子分别激发产生出一束强子,而这些被

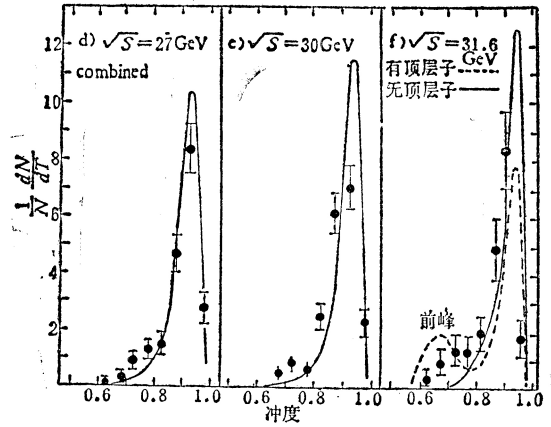


图 10(a) 实线表示采用五味层子  $u, d, s, c, b$  的预期值,虚线表示采用六味层子的预期值,黑点表示实验数据,并给出了误差

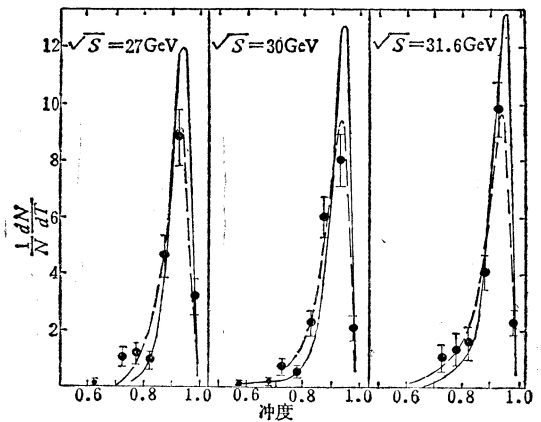


图 10(b) 实线表示采用了  $u, d, s, c, b$  五味层子的预期值,虚线表示采用加上胶子的五味层子  $u, d, s, c, b$  的预期值,黑点表示实验数据点,并给出了误差,显然强子事例的冲度分布,也与胶子存在的假设符合

产生的强子相对于最初的层子大都有较小的横向动量(其平均值  $\langle p_T \rangle \sim 350 \text{ MeV}/c$ ),故两个相反方向的层子、反层子形成两个相反方向的窄喷注,见图 6、7。

喷注现象的研究是很有意义的,比如,人们在实验上发现,喷注轴相对于  $e^+e^-$  轴的极角  $\theta$  具有  $1 + \cos^2\theta$  的分布,这种分布正好反映了层子是  $1/2$  自旋粒子。

为了研究喷注结构,引入了冲度  $T$  这个参数。

$$\text{冲度 } T = \max \frac{\sum_i |p_i^x|}{\sum_i |p_i|}, \text{ 这儿 } p_i^x \text{ 表示第 } i \text{ 个强子的}$$

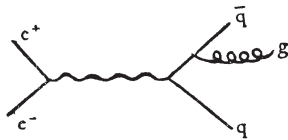


图 11 终态有一个层子发射胶子

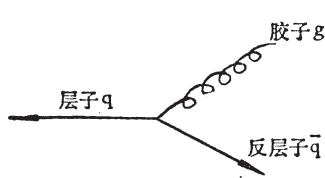


图 12 层子、反层子和胶子是共面的

动量  $p^i$  在某一给定轴上的平行分量,  $\sum_i$  表示对所有的强子求和,通过改变给定轴的方向,最后找到一个

$$\text{方向使得 } \frac{\sum_i |p_i^x|}{\sum_i |p_i|}$$

为极大,这时,该轴叫冲度轴,求得的极大值即为冲度值。在马克-杰组,

$p_i$  实际上用了  $E_i$  值(能流)。

很明显,根据这样的定义,我们有图 8 所示的冲度值,  $T$  的值反映了喷注的分布情况。

强子事例的冲度分布是研究是否存在第六种层子  $T$  的重要方法。假设  $T$  层子的质量为  $14\text{GeV}$ , 则产生  $(T\bar{T})$  介子的阈能值为  $28\text{GeV}$ , 当超过阈值时,采用 6 味层子的蒙特卡罗模拟 (Monte Carlo) 的冲度分布与采用五味层子的冲度分布有很大的不同。如果只存在  $u, d, s, c, b$  五味层子时,冲度峰接近 1, 见图 9(a)。如果加上  $T$  层子后,在低  $T$  的地方会出现一个前峰,见图

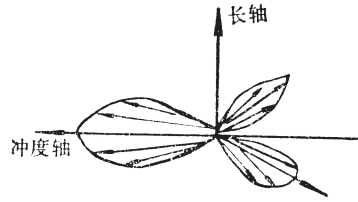


图 13 强子三喷注现象

9(b), 前峰峰值的大小决定于  $T$  层子的电荷。图 10(a)、(b) 给出了在各能区时得出的冲度分布。实验结果没有

那样的前峰,这也从另一个角度证实了直到  $31.6\text{GeV}$  的能区,不存在带  $2e/3$  电荷的  $T$  层子的迹象。在强子事例的喷注结构研究中,发现了一些三喷注现象,这是马克-杰组的重要成果之一。量子电动力学认为,带电的粒子间发生的电磁相互作用是通过交换光子实现的,与此类似,量子色动力学认为层子之间发生的强作用是通过交换胶子实现的。层子和胶子都可发展为强子束。由于在  $e^+e^-$  质心能量较低时,发射的胶子很软(能量低),三喷注现象就不显著。当  $e^+e^-$  质心能量增大时,发射出的胶子变硬,三喷注的现象渐渐显著。

有关强子三喷注的发现,在本刊 79 年第 4 期中已有专文报道,这里就不重复了。

综上所述,近一年来马克-杰装置的主要实验结果表明:

1. 轻子(电子、 $\mu$ 子和重轻子  $\tau$ )的半径小于  $2 \times 10^{-16}$  厘米。
2. 由  $R$  值的测量和喷注结构的分析,直到质心能量为  $31.6\text{GeV}$  时,没有发现带  $2/3$  电子电荷的  $T$  层子的迹象。

3. 实验上直接观察到三喷注现象,这个发现是有力地支持了胶子存在的学说,提供了最新的重要证据。

(栏头设计: 陈世锋)