

TRISTAN_上

三个探测器和物理

郑志鹏

日本的 TRISTAN 正负电子对撞机在 1986 年 11 月运行,当时质心系能量为 50 GeV,超过了西德的 PETRA 和美国的 PEP,成为世界上能量最高的电子对撞机。到今年年初,能量已达 56 GeV,自然引起了国际高能物理界的关注:有没有新的发现?标准模型受没受到冲击?人们拭目以待。

TRISTAN 上有四个对撞点,相应于四个探测器: AMY、VENUS、TOPAZ 和 SHIP。前三个探测器都是大型通用谱仪,运行一年多来已获得许多有意义的物理结果,我们将在下面加以介绍。SHIP 则是另一种类型的探测器——重电离粒子探测器,我们就不在这里介绍了。

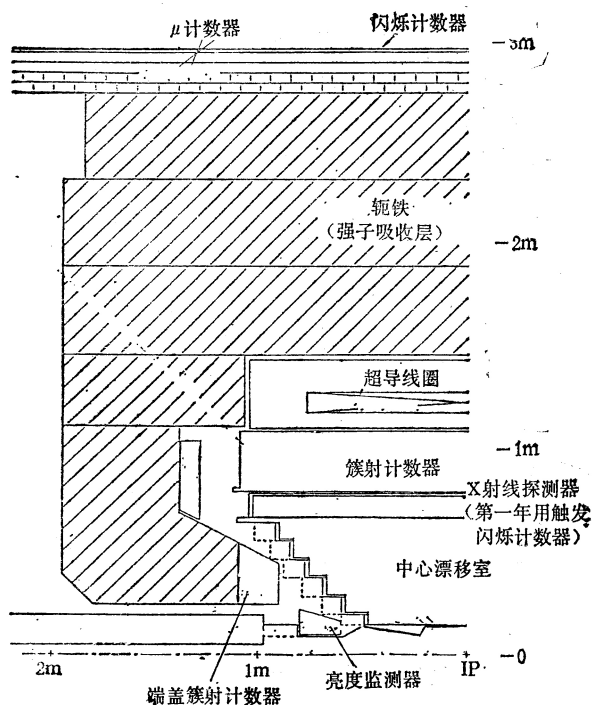


图1 AMY探测器的结构(四分之一)

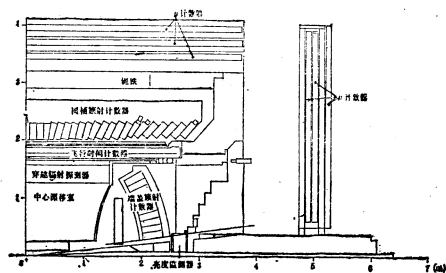


图2 VENUS探测器的结构(四分之一)

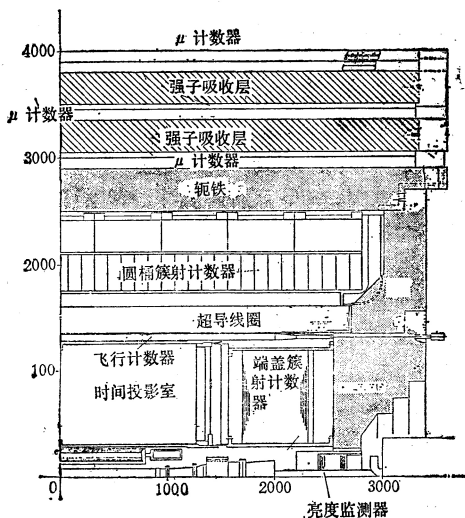


图3 TOPAZ探测器的结构(四分之一)

三个探测器的比较

在介绍物理结果之前,有必要先了解一下三个探测器的结构和它们的特点。

图1、图2和图3分别给出了 AMY、VENUS 和 TOPAZ 探测器的四分之一剖面图。

正负电子就在它们的中心对撞,产生的末态粒子就在这里被探测、分析并获得物理结果。

三个探测器有以下几点共同处:

1. 接收度接近 4π 立体角的大型通用磁谱仪。VENUS 和 TOPAZ 高、宽皆为 8 米,长 10 米;AMY 较小,但长、宽、高也在 6 米上下。

2. 使用超导技术,产生较强的螺旋管磁场。

3. 主要部件基本相同,如束流管道、圆柱型漂移室、飞行时间计数器(或触发计数器)、超导螺旋管线圈、簇射计数器、靶核、 μ 鉴别器以及电子学仪器、气体系统和计算机在线数据获取及离线分析系统。

4. 探测原理基本相同: 测量末态粒子的几种物理量并分辨粒子的种类。我们可以从下表看出被测量的主要物理量及如何实行粒子分辨的目的。表上的物理量有的是直接测量到(如第一排所列的量);有的则是通过两次测量而计算出来的(如动量、质量)。

表 1

位置(径迹)	能量	电离能损($\frac{dE}{dx}$)	时间(速度)	射程
+				
磁场				
↓				
动量				
		→质量←		
				粒子种类

漂移室、飞行时间计数器、簇射计数器和 μ 鉴别器给出带电粒子的位置(径迹)。带电粒子在磁场中偏转,通过其偏转半径的测量便可得知它的动量。簇射计数器可以测量到正、负电子和 γ 的能量;漂移室还可测量带电粒子的电离能损;飞行时间计数器则可测量到次级粒子自对撞点飞到其上的时间(如果再从漂移室知道确切的击中位置,自然可求出粒子的飞行速度)。一旦知道粒子的动量和电离能损或者动量和速度就可以得到带电粒子的静止质量,从而达到粒子的分辨。

此外,由于不同类型的粒子与探测器的作用方式不同、射程不同,因而以不同的幅度,不同的部位被记录下来,这也提供了粒子分辨的信息。例如:正、负电子和 γ 将其能量的绝大部份损失在簇射计数器中,并给出一个比强子、 μ 大得多的电离信号。它们的能量消耗尽了,“死”在簇射计数器中,只有极少数能逃跑。而 μ 就不同了,它几乎不产生簇射,在簇射计数器甚至靶核中消耗能量不大,能够穿透它们跑到 μ 计数器中。因此只要 μ 计数器有击中,我们就可以有较大把握说这是 μ 粒子。

三个探测器还有各自的特点:

1. AMY 是三个探测器当中体积最小,花钱最少(只有 VENUS (或 TOPAZ) 的三分之一),但各种探测器齐全,其性能、指标都不错。它的超导磁场是最强的——2 万高斯,加上漂移室的位置分辨率较好,因而

可以获得好于 1% 的动量分辨率。它有 X 射线探测器,可以较好地分辨电子和强子。由于其长度短,因而有可能加 micro- β 装置,增加亮度三倍以上,提高事例的收集量。该探测器还首先使用 BaF_2 晶体做亮度监测器,有较好的能量分辨率和抗辐照性。

AMY 是由日本、美国、中国和南朝鲜的高能物理学者组成的国际合作小组,有利于经验交流和相互学习。这个组的物理思想非常活跃。

2. VENUS 有一个动量分辨率较好的圆柱型漂移室。使用了 5 千多块铅玻璃做桶部簇射计数器,端盖则有液压簇射计数器,都有较好的能量分辨率。有 96 块飞行时间计数器,时间分辨率优于 200 微微秒。首次在大探测器中采用穿越辐射探测器。其超导磁场强度为 7 千 5 百高斯。

3. TOPAZ 中心漂移室为时间投影室。有 4 千多块铅玻璃做桶部簇射计数器。有 64 块飞行时间计数器,时间分辨率为 220 微微秒。超导磁场强度为 1 万高斯。

VENUS 和 TOPAZ 都是由日本本国的大学、研究所的专家、学者组成的合作组。

从 1986 年 11 月至今一年多来,TRISTAN 对撞机运行良好,能量不断升高,相应于 52 GeV 能量的峰值亮度达 8×10^{30} 厘米⁻²·秒⁻¹。三个探测器也工作正常,各分部探测器都逐步达到设计指标,一批初步的物理结果已获得。虽尚未宣布轰动的消息,但已公布的新结果还是令人关注的。

t 夸克的寻找

迄今为止,只发现了五种夸克(层子),近十年来,人们一直寻找第六个夸克——t 夸克(顶层子)。从三代夸克的理论出发,似乎 t 夸克的存在是不容怀疑的。但,随着加速器能量的增高,人们仍未能找到。理论上对 t 夸克质量的预言也不断提高。十年前,有人猜测 t 夸克的质量为 14 GeV/c² 左右,但当 PETRA 的能量超过那个范围时仍未发现。后来 PETRA 的质心系能

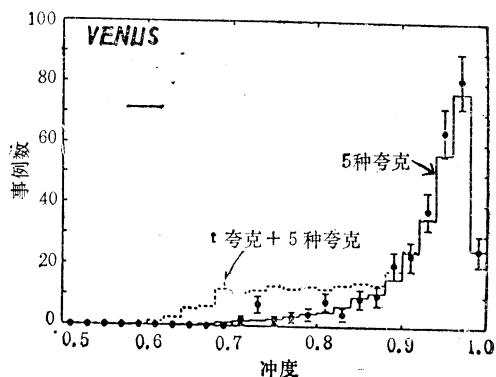


图 4

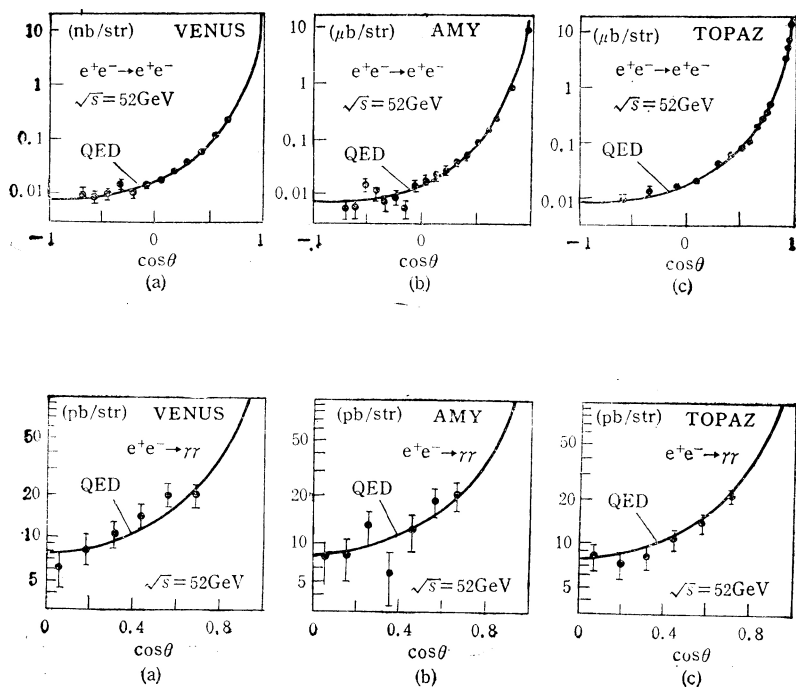


图 5

量继续升高直至 47 GeV 时,仍找不到 t 夸克的踪迹。这时,只好不管理论的预言,在实验上踏踏实实地寻觅 t 夸克。在 TRISTAN 对撞机上,人们又找到了这样一次机会。三个探测器都采用了两种主要的方法搜索 t 夸克:

1. 测 R 值。所谓 R 值是指 $e^+e^- \rightarrow$ 强子的截面与 $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ 的截面之比。如果 t 夸克产生,则 R 值就会明显上升,上升的量约为 $3 \times (2/3)^2 \approx 1.33$ 。2/3 是 t 夸克的电荷量, R 值应与电荷的平方成正比。前面的三倍是因为夸克有三种颜色。这样一个上升量是不小的,当探测器的系统误差和统计误差达到一定精度时是不难觉察得出来的。

三个探测器在 50—56 GeV 能量范围内进行了仔细的扫描, R 值没有发现明显上升,与存在 5 夸克的模型相符合,意味着在这个能区内尚未产生 t 夸克。

2. 对强子喷注进行形状分析。正负电子对撞后产生的强子都向前冲,分布在锥体内,形成喷注(有两个、三个或更多)。对喷注的形状进行分析,可以得到许多有趣的信息。例如,三喷注的发现意味着胶子的存在;喷注冲度的分布分析,可以了解到 t 夸克是否产生。所谓冲度是描述喷注前冲程度的一个量。前冲程度大,喷注窄则冲度(T)值大(T 最大为一)。如果有 t 夸克产生,而 t 夸克几乎是静止的,这样就减弱了喷注前冲的程度,喷注变宽, T 值变小。三个探测器都作了喷注的冲度分布分析,积累了大量的实验数据(相当于

50—56 GeV),都与存在 5 种夸克的 QCD (量子色动力学)的理论计算相符,没有显示 t 夸克产生的迹象。图 4 给出了 VENUS 的实验结果。实线表示 5 夸克的理论预言,实验点与其符合。虚线是假设 t 夸克存在时的理论预言,在低冲度($T = 0.7—0.8$)处有一“鼓包”(由 t 夸克产生引起),与实验点不符。在作喷注形状分析时还使用了扁度和非共面性等物理量来描述。

b 夸克的寻找

前几年,在 PETRA 上的 MARK-J 和 JADE 探测器,在质心系能量 46.3—46.8 GeV 范围内分别找到了 7 和 5 个包含 μ 的低冲度的事例(并且 μ 与冲度轴的夹角较大)。这可以用 1/3 电荷夸克(很自然认为是第四代的 b')的产生来解释。这件事引起了高能物理界的兴趣。

AMY 和 VENUS 在 50—52 GeV 能量范围内对包含孤立的轻子(μ 和电子)的低冲度事例进行了搜索,它们总的积分亮度都大于 MARK-J 和 JADE 的积分亮度,但没有找到 b' 产生的事例。

顺便说一下, b' 夸克的产生也可以从 R 值的上升看到。但实际上,由于 b' 只带 1/3 电荷,因而上升量仅为 0.33,在目前探测精度的情况下是不容易观察到的,不如上述的冲度分析方法好。

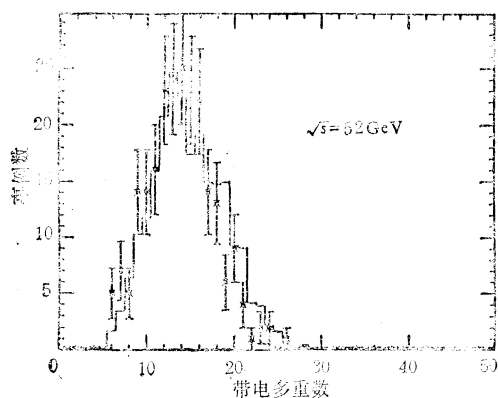


图 6

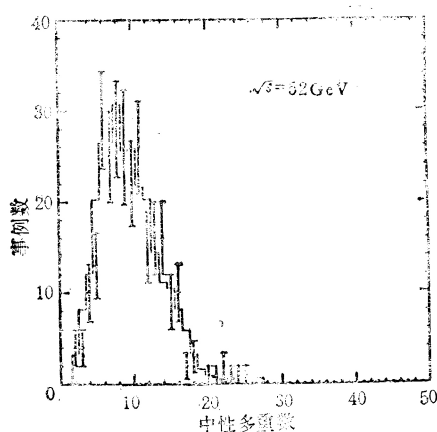


图 7

QED (量子电动力学) 的检验

在 PETRA 能区,实验结果与 QED 符合很好,那末,在 TRISTAN 能区将会怎样呢?

三个探测器都测量了 $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ 和 $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ 反应的微分截面的角分布,在质心系能量 50—56 GeV 范围内,实验结果与 QED 理论仍符合得很好. 图 5 给出了相应 52 GeV 处,三个探测器的实验结果,实线是 QED 的计算值.

三个探测器还从 $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ 过程中得到了这个能区的截断因子 $sA_{\pm}$ 值(约 70—80 GeV). 可以通过测不准关系 $A_{\pm} \cdot a \geq \hbar$ (a 为电子半径)估算出电子的尺度为 $2.5-2.8 \times 10^{-16} \text{cm}$.

弱电统一理论的检验

测量了 $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ 反应的微分截面的角分布,

并计算出 μ 的前后非对称性 A 值. 这一非对称性是由于正负电子湮灭过程产生的 γ 和 Z^0 的干涉结果,它随对撞能量的增高而增加. 到了 TRISTAN 能区,这种弱电干涉效应越来越明显, A 值也变大了.

三个探测器测得的 A 值和理论值的比较列入下表(相应 52 GeV):

	AMY	VENUS	TOPAZ
A 实验	-0.27 ± 0.11	-0.20 ± 0.10	-0.22 ± 0.13
A 理论	-0.180	-0.185	-0.175

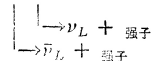
可以看出实验与理论符合得不错,弱电统一理论是经得住考验的.

带电、中性多重数的测量

所谓带电(中性)多重数是指正负电子对撞后产生末态带电(或中性)粒子的数目. 三个探测器都给出了 50—56 GeV 的带电多重数及中性多重数的分布. 实验与理论符合得很好. 图 6、7 给出了 AMY 的结果.

第四代重轻子的寻找

寻找方式大多采用 $e^+e^- \rightarrow L^+L^-$



如果重轻子 L 存在,必然有: 1, 两个不共面的喷注; 2, 大的丢失能量 (ν_L 带走).

AMY 在 56 GeV 处搜索重轻子,没有找到,给出第四代重轻子的质量下限为 $27.6 \text{ GeV}/c^2$ (95% 置信度).

此外,三个探测器还对强子三喷注、四喷注进行了形状分析,获得了有兴趣的结果.

综上所述,可以看到一年多来,TRISTAN 上的三个探测器虽然没有发现新粒子,但对标准模型进行了检验,积累了许多有用的数据.

TRISTAN 的能量、亮度还要继续增高,三个探测器还将继续寻找 t 夸克、 b' 夸克及第四代重轻子,还要对 Higgs 粒子、超对称粒子、中性重轻子等新粒子的寻找给予一定关注. 此外,要继续对标准模型进行检验,积累新数据.

TRISTAN 的最高能量是 70 GeV,在 SLC、LEP 正负电子对撞机运行前,它仍将处于世界领先地位. 加之机器运行稳定,探测器性能良好,积分亮度高,因此高能物理界有理由期望在 TRISTAN 对撞机上得到更有意义的物理结果.