

1982年2月,美籍著名物理学家丁肇中教授在北京作了题为“一个未来的实验”的学术报告。报告后丁教授将英文原稿交唐孝威教授转本刊发表。英文原稿由唐教授译成中文。

LEP——西欧核子研究中心即将建造的最新正负电子对撞机,质心能量为100GeV。它建成后将成为世界上能量最高的电子-正电子对撞机。

丁教授在此文中详细地介绍了他所领导的国际合作实验组<sup>1)</sup>准备在LEP上进行实验的规划。他们制定了物理实验的目标,并根据物理实验的需要,设计一个具有独特性能的先进探测器,探测、分析正负电子对撞后产生的末态电子、 $\mu$ 子和光子,来寻找可能存在的传递弱相互作用的中性中间玻色子、希格斯粒子、超对称性粒子等。

# 一个未来的实验

丁肇中 (美国麻省理工学院)

## 一、前言

我们目前对基本粒子的理解基于以下两个原理:规范不变性和对称性破缺。对规范不变性曾经进行过实验探索,有了相当好的了解,量子电动力学、量子色动力学和标准弱电理论的成功都是证明。LEP(莱泼)对撞机将大大增进我们这个方向的认识。但是对称性破缺的意义和规则却仍然是一个谜。人们设想,对称性破缺是产生包括中微子在内的所有粒子质量的起因。同样现象也是CP破坏、宇称破坏、弱混合角产生、规范理论可重正性和预言能力等等的基础。对称性破缺的基石是预言有新的标量粒子。可能这种粒子只有一个(希格斯粒子 $H_0$ ),也可能有许多个(在多色模型中带电和中性紧密结合的赝标量)。与“规范王国”(“gauge-land”)相反,“标量王国”(“scalarland”)至今还没有被探索过。过去二十年间理论的巨大努力,并未导致任何具有唯一性真理的方案。而实验直到现在只给出过一个间接的线索,即带电弱流与中性弱流振幅比。显然,对LEP的一

个最大希望就是探索“标量王国”。为此,需要有能够精确测量很小分枝比的干净道(clean channels)的探测器。考虑了这些要求后建造起来的探测器,对处理令人惊奇的结果也会是最合适的。

## 二、设计考虑

与任何理论猜测无关,近年来质子加速器和正负电子对撞机上得到的粒子物理学的重大发现,都是用专门设计的、能够非常精确地测量轻子道和光子道的探测器作出的。这是因为单光子道和(或)轻子道提供了干净信号;本底很小,且易于了解和控制。只是由于探测器的质

1) 合作实验组的成员有:瑞典,隆德大学;西德,齐根大学;西德,马克斯·普朗克研究所;荷兰,核与高能物理所;瑞士,苏黎世高工;瑞士,日内瓦大学;瑞士,洛桑大学;法国,昂西粒子物理所;意大利,弗拉斯卡蒂实验室;意大利,佛罗伦萨大学;西班牙,马德里原子能所;中国,北京,高能物理所;中国,合肥,中国科技大学;美国,檀香山,夏威夷大学;美国,帕萨迪纳,加州理工学院;美国,诺曼,俄克拉何马大学;美国,哥伦布,俄亥俄州立大学;美国,匹兹堡,卡内基-梅隆大学;美国,普林斯顿大学;美国,纽黑文,耶鲁大学;美国,哈佛大学;美国,麻省理工学院。

量分辨率达到了  $\Delta M/M \leq 2\%$ ，才可能发现像  $J \rightarrow e^+e^-$  和  $\Upsilon \rightarrow \mu^+\mu^-$  那样的新粒子族。由于能清楚地测量单色  $\gamma$  射线，才可能有  $P_c$  态的重要发现。由于探测器能清楚地鉴别  $\mu c$  道，同时覆盖接近  $4\pi$  立体角，以确认中微子的丢失，才可能发现  $\tau$  子。晶体球探测器取得了值得注意的成绩，原因在于它有测量 10MeV 以上的单个光子能量的能力，并且有很好的能量分辨率。

在历史上，粒子加速器得到的重大发现，大多数是在建造它们的时候完全没有预料到的。因此，为慎重起见，要设计一个当物理上有需要时能够很快加以改动的探测器。

我们提出一个用常规磁铁给整个实验大厅的体积中加以强度 0.45 T (特斯拉) 磁场的方案。仪器的质量分辨率可以和  $Z^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$  的自然宽度相适应。

### 三、探测器发展

过去两年来，我们合作组的成员进行许多国家间的合作，致力于发展 LEP 实验的新探测器。在 AGS 加速器、佩特拉对撞机 (PETRA)、美国费米实验室 (FNAL) 和西欧中心 (CERN) 的 PS 加速器上进行了探测器技术性能的试验。这些发展集中在下面几个方面：

1. 美国麻省理工学院的 Francis Bitter 国家磁学实验室研究了经济地设计和建造一个大的“磁大厅”的方法。

2. 研究了一种称为时间扩展室的新型漂移室。它提供约  $30\mu m$  的位置分辨率和  $\Delta x \leq 500\mu m$  的双径迹分辨率。计划在 1983 年把第一个这种类型的漂移室用于佩特拉的“马克-杰”实验中。另一种可以提供高的空间分辨率的设备是微条固体探测器，现正在进行广泛的试验。

3. 用硅二极管读出方法对锗酸铋晶体 (BGO) 进行了分辨率的试验。这样，晶体就可以在磁场中工作。还对铅片夹层之间充以液体闪烁体的聚四氟乙烯管子组成的取样量能器进行了试验。还试验了以有限流光方式工作的

正比室读出的强子量能器。

4. 研究了高精度大面积 ( $3 \times 6m^2$ ) 漂移室，系统误差可控制到  $\approx 30\mu m$ 。建造了模型，来研究这种漂移室的结构、对准、定位问题，及这种漂移室在磁场中工作的气体放大系数。此外，对串音、系统误差、分辨率及用电离激光器对准等进行了试验。过去几年中，我们曾在西欧中心交叉贮存环 ISR 和佩特拉对撞机上应用约 200 个这种大漂移室；在漂移室结构和对准方面取得了宝贵的经验。

这些技术发展的成果，大部分曾经或即将在 *Nuclear Instruments and Methods* 及其他杂志上发表。这些成果为我们设计第一代 LEP 探测器提供了足够的知识。

### 四、建议的探测器

我们提出建造：

- 一个大体积、低场强的螺线管磁铁；
- 一个小的、有非常高的径迹分辨率的中心径迹探测器，
- 一个高分辨率的电磁量能器，把中心探测器包围起来；
- 一个强子量能器，同时用作  $\mu$  子过滤器；
- 高精度的  $\mu$  子径迹室；
- 一个双光子过程的标记设备，同时用

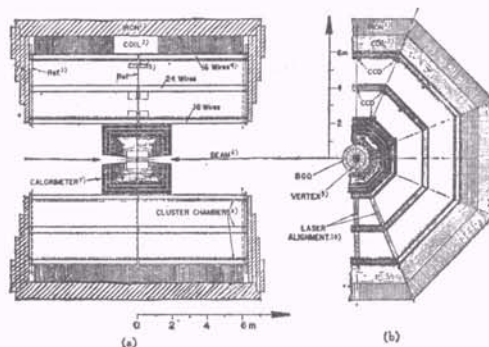


图 1

(a) 探测器的侧视图；(b) 端视图

- 1) 铁； 2) 线圈； 3) 参考； 4) 丝； 5) 前置放大器； 6) 束流； 7) 量能器； 8) 集团漂移室； 9) 顶点漂移室； 10) 激光对准

作精密的亮度监测器。

这个探测器基本上是以圆柱形几何(八边形)排列,有平的端盖,见图1。

下面我们分别描述探测器的各个部件、测试结果以及正在研究的其它方案。

### 1. 磁铁

常规磁场强限制在 0.5 T 左右是较经济的。磁铁要足够大,以获得好的分辨率。总的  $BL^2$  是  $16 \text{ T}\cdot\text{m}^2(\text{m}\cdot\text{米})$ 。对于  $\mu$  子谱仪,  $BL^2 = 7.2 \text{ T}\cdot\text{m}^2$ 。不用低温设备、结构简单(没有高压容器、热屏蔽和细支柱等)、机械结构坚实、可改动,因而实验设备可以快速维修。此外,常规磁铁可以很快地接上和切断。磁铁的参数见图2。

#### (1) 线圈

我们选用大电流,减少必需的接点数目。线

圈连接的具体办法(螺栓、铆接或焊接),主要取决于时间进度和实验区的通风条件。主要的工程问题是如何减少加工和安装费用。图2是长方形厚片线圈的设计。

#### (2) 磁铁

可以采用截断的铁锥体,由水泥粘合或焊接在一起。整个结构像是一座房屋,但铁多而水泥少。也可以用粗切割的板做磁铁,见图2。图3是安装顺序图。建造这种磁铁是比较经济的。

### 2. 顶点漂移室

大家知道,一个最小电离粒子在它径迹上留下许多互相分开的电离束团,正像在泡室中的一个气泡。如果能够确定全部束团的位置,带电粒子位置的测量结果会最好。这就是所提

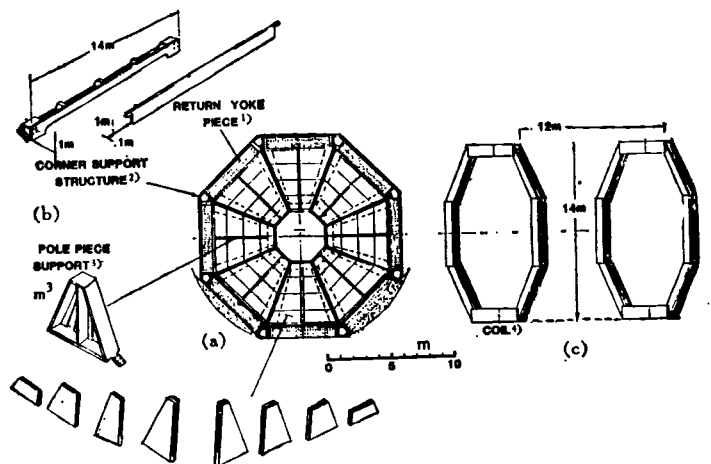


图2 磁铁的结构和参数

(a) 端视图(朝磁极端盖看); (b) 各块的透视图; (c) 一短节线圈的透视图

1) 铁轭块; 2) 角部支撑结构; 3) 极块支撑; 4) 线圈

性能		元件重量	
场强	0.45T	铝导体	800t
功率	4MW	铁框和结构	7600t
电流	86kA	导体单元总数	400
电压	47V	平均匝长	43.1m
安匝数	4.3MA 匝	绕线包装因子	0.53
导体电流密度	677kA/m <sup>2</sup>	匝间隙	10cm
线圈		绝缘材料	G-10
导体材料	Al 1350 型	绝缘厚度	1.3cm
导体单元大小	5.8×1.0×0.127m <sup>3</sup>	供水	水
导体单元重量	2.0t	冷却剂流量	2000 l/min
导体单元/匝	8	水的温升	30℃
总匝数	50		

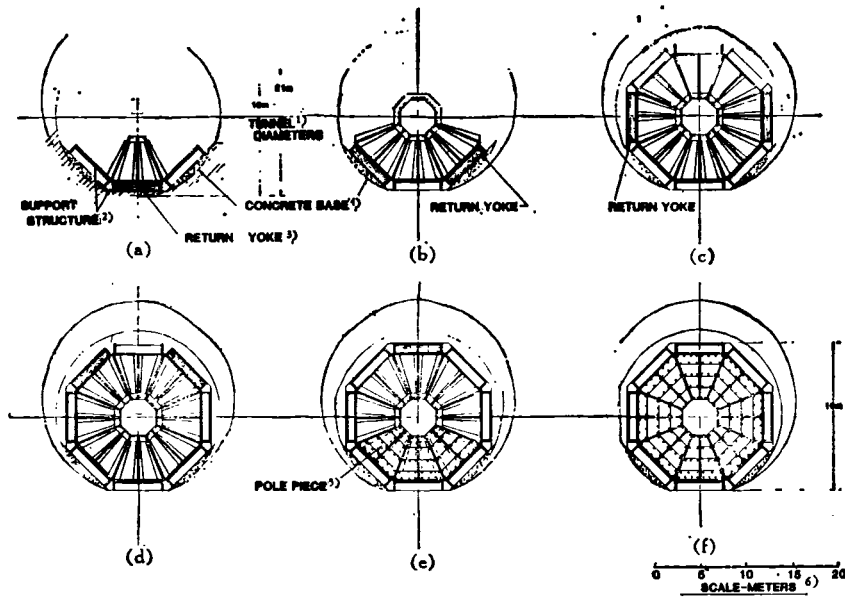


图3 安装顺序

(a) 铁轭块已在地面安装, 相邻块的支撑结构已就位; (b) 铁轭的相邻两块已堆到支撑结构上;  
 (c) 和 (d) 又分别加上两块; (e) 顶部已堆上, 同时一部分底部极块已固定到支撑结构上; (f)  
 全部极块已固定好, 磁铁准备通电

1) 隧道直径; 2) 支撑结构; 3) 铁轭; 4) 水泥基础; 5) 极块; 6) 尺度: 米

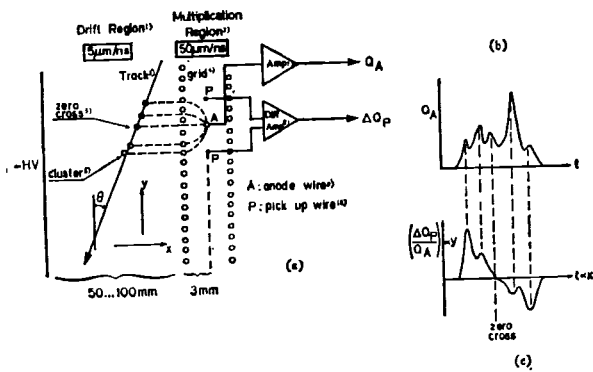


图4 时间扩展室: 高精度读出的原理

两根拾取丝的差分信号  $\Delta Q_P$  和阳极丝信号  $Q_A$  用快速 ADC 数字化后, 处理得到坐标、径迹角度和电荷沉积 (charge deposited) (见正文)

1) 漂移区; 2) 气体放大区; 3) 径迹; 4) 栅;  
 5) 过零; 6) 束团; 7) 放大器; 8) 差分放大器;  
 9) 阳极丝; 10) 拾取丝

出的时间扩展室的工作原理。在通常的漂移室中, 入射粒子留下的束团中的最先到达的电子给出信号。而在所提出的时间扩展室中, 则是用下面方法测量各个束团的坐标的:

(a) 用一个细栅网 [图4(a)]<sup>10</sup> 隔开漂移区和

气体放大区。漂移速度调节得足够小 ( $5\mu\text{m}/\text{ns}$ ), 因而阳极信号可以反映出电离的束团结构 [图4(b)].

(b) 靠近阳极的两根“拾取丝” (pick-up wires) 的差分信号给出束团原有的  $y$  坐标 [见图4(c)]. 为了说明这个原理, 图4中画出了一根相对于  $y$  夹角为  $\theta$  的径迹。

#### (1) 布置

探测器又分成两个同心部件 [图5(a),(b)]. 内室从半径  $r_1 = 65\text{mm}$  到  $r_2 = 125\text{mm}$ , 由12个扇形体组成。外室从半径  $r_3 = 150\text{mm}$  到  $r_4 = 500\text{mm}$ , 由24个扇形体组成。内室的尺寸小, 保证可以达到所需要的机械精度。内室的主要作用是测量次级衰变顶点。外室同给出高精度信息的内室合在一起, 可以测量带电粒子的动量。在各组精密丝中间, 夹着安放“图象识别丝”, 采用电荷分配读出, 可以测量沿丝方向的坐标, 分辨率为丝长度的1%。

1) 文中物理量符号按习惯都排斜体, 但图上的照原稿未作改动。

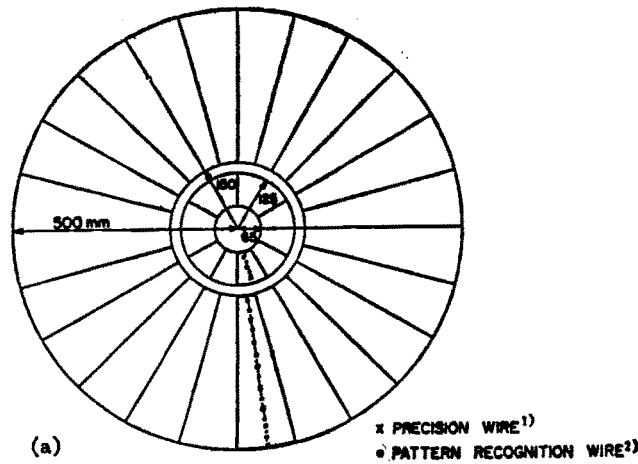


Figure 5 (A) VERTEX CHAMBER LAYOUT

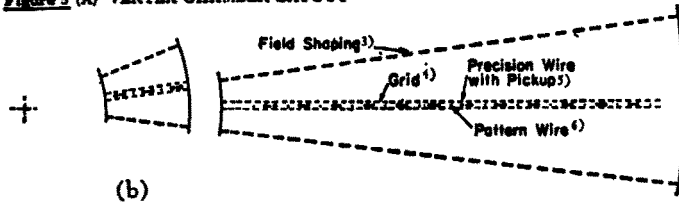


图 5

(a) 顶点漂移室布置; (b) 扇形体结构

内漂移室提供三个高精度测量 ( $\sigma < 30 \mu\text{m}$ ) 和两个“图象识别”信号, 它们给出精度  $\sigma = 100 \mu\text{m}$ , 但双径迹分辨率很好 ( $\Delta x \leq 0.5 \text{mm}$ )。由图象识别丝的电荷分配确定  $x$  到  $\approx 5 \text{mm}$ 。内漂移室的长度是 45cm, 它覆盖  $4\pi$  立体角的 80%。

外漂移室提供 12 次图象识别测量和 12 次高精度测量, 它也覆盖  $4\pi$  立体角的 80%。

对于  $B = 0.45 \text{T}$ , 得到动量分辨率  $\Delta P/P = \sqrt{9 + 0.5P^2}$  (%)

1) 精密丝; 2) 图象识别丝; 3) 电场整形; 4) 栅; 5) 带拾取的精密丝; 6) 图象丝

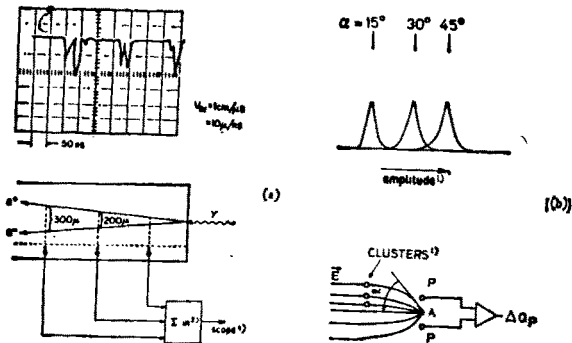


图 6

(a) 在时间扩展室中测量的双径迹分辨, 由三根丝测得的信号, 显示时相互移动了 180ns; (b) X 射线产生的三个不同位置的束团的差分信号的幅度谱  
1) 幅度; 2) 束团; 3) 输入; 4) 示波器

## (2) 试验

试验工作集中于研究时间扩展室的下面两

个新特点:

(1) 测量软 X 射线在试验室中产生的单个束团的阳极信号宽度。测量结果同扩散数据的预期值相符合。图 6(a) 中表示两个靠近的最小电离径迹的信号。如果相距在  $\Delta x \approx 200 \mu\text{m}$  以上, 它们就能够分开, 这也同扩散数据的预期值相符合。

(2) 对于 X 射线产生的一个束团, 两根拾取丝(在阳极丝两侧各  $200 \mu\text{m}$  处)的差分信号, 削波到 FWHM 为 20 ns。图 6(b) 是在三根不同电力线处产生的、以不同角度  $\alpha$  到达阳极的电离的幅度分布。得到角度分辨率是  $\Delta\alpha = 5^\circ$  FWHM。这比上面引用的位置分辨率所需要的还好。

这些试验是没有磁场时做的。计划做有磁

场时的试验。还正在发展一个时间扩展室的模型。

### (3) 刻度

在采用的刻度系统中，激光束位置可以稳定在约  $5\mu\text{m}$  的精度。激光束的移动是由激光干涉仪控制的可移反射器来实现的。

### (4) 一个重要的改进

固体探测器 (solid state detectors) 最近发展得很快。这里我们提出一个用固体顶点探测器(图7)代替内部时间扩展室的改进方案。这个顶点探测器用高空间分辨率的微条装置做成，能够分辨  $10\mu\text{m}$  rms；能分开相距  $2.5\text{mrad}$  以上的粒子，没有左右不确定性；能在半径相距

小于  $1\text{mm}$  的点上给出二维坐标读出。

这个探测器是八边形的，每边有四个双面读出的平面，内边距离束流  $6\text{cm}$ ，外边  $11\text{cm}$ ，每  $90^\circ$  开槽，可以把横向于束流的条上的引线引出。图7是从束流看去的一个微条探测器的结构细节。安排微条的间距是  $30\mu\text{m}$ 。采用电荷分配法，只需要每五条取一次样。如果放大器的噪声保持在  $0.2\text{ fC rms}$  ( $\text{fC}$ : femtocoulombs, 毫微微库仑) 以下，空间分辨率和由每条读出所得到的分辨率是可比较的。在任意  $150\mu\text{m}$  的区域中，发生多次击中的径迹小于  $6\%$ 。面板上多路传输将外部连接减少到  $1000$  道左右。

固体探测器的材料会使全部  $\gamma$  射线的  $1.2\%$  发生转换，也就是大约每个事例中  $1/4$  的  $\gamma$  射线。从顶点看去，固体探测器给出的横向分辨率是

$$\Delta x = [(80/P\beta)^2 + (15)^2]^{1/2} \mu\text{m} \quad (P \text{ 用 } \text{Gev}/c),$$

其中第一项来自多次散射，第二项来自固有分辨率。估计动量测量误差对  $\Delta x$  的贡献小于  $5\mu\text{m}$ 。用一个  $2\text{ Gev}/c$  径迹作为衰变变的典型例子，我们得到  $\Delta x = 43\mu\text{m}$ 。对典型衰变变，衰变长度的误差大致是  $80\mu\text{m}$ 。我们引用  $2\sigma$  截断来分开产生顶点与衰变顶点，并且要求衰变带电粒子动量之和，与来源于产生顶点附近的一个母粒子一致。预期在全部衰变变中有  $1/3$  以上可以被分辨。

如果对于典型的  $30\mu\text{m}$  轻子碰撞参数，在每一投影中采用  $2\sigma$  测量，这个探测器也能增进  $\tau$  子的鉴别能力。

在  $10^{13}$  个最小电离粒子/ $\text{cm}^2$  的作用下，探测器没有影响，但是相等数量的强电离粒子则会使它损坏。在中子阈以下，这种探测器可以经受  $5\text{MR}$  (兆伦琴) 的 X 辐射。用 P 型硅，辐射阻抗还可以增高一个数量级。

正在进行深入的发展工作，我们计划 1982 年秋在费米实验室的束流中用大面积的装置来拟合顶点。

### 3. 量能器

我们所提出的探测器中包括  $\gamma$ 、 $e$  量能器和强子量能器。

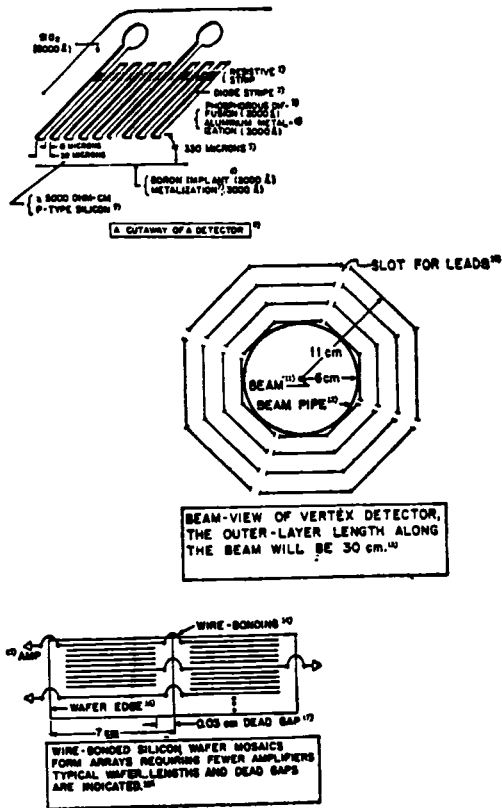


图7 硅微条顶点探测器

- 1) 电阻条； 2) 二极管条； 3) 磷扩散； 4) 铝金属膜； 5)  $\mu\text{m}$ ； 6) 硼注入； 7) 金属薄膜； 8) 探测器的剖面图； 9) p型硅； 10) 引线槽； 11) 束流； 12) 束流管道； 13) 沿束流方向看的顶点探测器，外层沿束流方向的长度为  $30\text{cm}$ ； 14) 连接线； 15) 放大器； 16) 片边； 17) 死区； 18) 用线连接的硅片镶嵌阵列，所需放大器较少，图示典型的薄片长度与死区

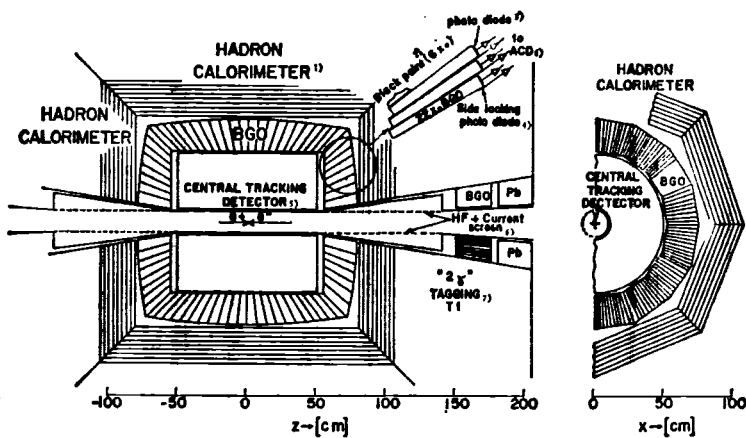


图8 电磁量能器和标记系统的第一段

电磁量能器由~12000块长度为21—22 $X_0$ 的BGO块组成,指向相互作用点。插图  
中表示光二极管的位置。量能器覆盖 $\theta$ 角度区域是7°到173°。标记系统由BGO块的环  
组成。(1×1×20cm,光二极管读出),放在±150,±330cm处和(如果有大直径超导四  
极磁铁的话)±950cm处。标记角可从8 mrad(只用前两段时是22 mrad)到120 mrad。  
在每段前面的多层正比管可以区别带电粒子和中性粒子

- 1) 强子量能器; 2) 黑漆; 3) 光二极管; 4) 侧视光二极管; 5) 中心径迹探测器;  
6) 高频和电流屏蔽; 7) 标记; 8) 去ADC

### (1) 电磁量能器

要测量能量和位置,选择高分辨率的锗酸铋晶体(BGO)电磁量能器是很理想的,因为它的光学性能好、密度高,对潮湿不灵敏。这个量能器由约12000块长度22 $X_0$  ( $X_0$ 是辐射长度)的单块晶体组成。晶体指向相互作用区而排列成桶形,还有平的端盖(图8)。桶部内腔直径100cm,长度100cm。桶部外围,包括读出、热屏蔽和支架在内,直径160cm、长度160cm。所用BGO总的体积为1300—1400立升。

我们准备用硅光二极管读出,它可以在磁场中工作。为了得到沿晶体方向能量沉积的信息,在晶体的一个面上附加一个光二极管,只用它看最后15 $X_0$ 一段。这对于电子/强子分辨是很重要的。因为我们可以利用簇射横向发展及纵向发展的信息。预期单个簇射的空间分辨率约 $\sigma_{x,y}=2\text{mm}$ (这同能量有关),导致角度分辨率为 $\sigma_{\theta,\phi}=4\text{mrad}$ 。两个相邻的簇射直到50 mrad的张角还可以被分开,由此给出 $\gamma/\pi^0$ 分辨的限度是 $\pi^0$ 能量 $\leq 3\text{GeV}$ 。

### (2) 试验

预期能量分辨率的计算值是 $\sigma/E=(0.5\%/$

$\sqrt{E})+0.3\%$ ,还要加簇射从背部泄漏的贡献。M. Cavalli-Sforza 等曾在30和50 MeV能量下测量过一块体积小,不均匀性和簇射泄漏都很大的晶体,测得分辨率 $\sigma \approx 2\%$ 。我们计划在1982年上半年试验所提出的量能器中的一部分。已经获得了第一批大小接近的、均匀度为 $\pm 1\%$ 的晶体。将要在西欧中心和佩特拉对撞机上进一步做BGO的试验工作。我们试验过用标准商品的大面积硅光二极管读出,给出 $\sigma_{\text{读出}}=1.2\text{MeV}$ ,灵敏度是每MeV的沉积能量产生850个光电子。

### (3) 强子量能器

在电磁量能器外面,围绕着一个常规的强子量能器,半径从80cm延伸到200cm(包括支撑结构)。为了提供满意的 $\mu$ 子过滤器,总共要有7个核吸收长度 $\lambda_0$ (电磁量能器为 $1\lambda_0$ ,加上强子量能器 $3.5\lambda_0$ ,再加上附加吸收体 $2.5\lambda_0$ )。

我们选用夹层的量能器,用厚度为2.5cm、相距12mm的铜板,中间放置直径为1cm、以有限流光方式工作的管子(图9)。从阴极平面分支信号,各层平面按一定图样蚀刻,构成一个指向相互作用区的塔形几何结构。塔的数目还

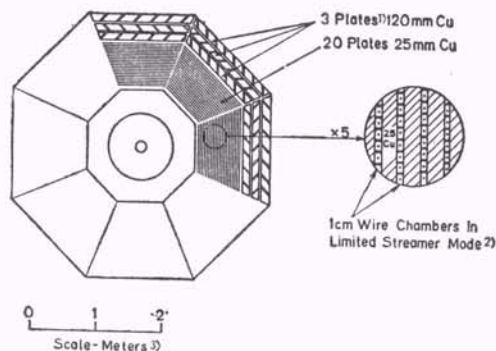


图9 强子量能器(端视图)

- 1) 板; 2) 1cm 丝室以有限流光方式工作;  
3) 尺度: 米

没有最后确定,它取决于空间分辨率的试验,大致将是 1000 个到 3000 个。强子的能量分辨率预期为  $\sigma/E = 75\% / \sqrt{E}$ ,而且如果适当地用高分辨率电磁量能器的信息取权,还可能进一步加以改进。为了全部吸收强子,在强子量能器后面加三层铜板,每层厚度 12cm ( $0.8\lambda_0$ ),其间放置正比计数管,可以测量  $\mu$  子径迹和探测强子簇射的后期发展。

在  $z_0$  处,这个综合量能器总的能量分辨率预期好于 7%。因此对  $e^+e^-$  湮灭事例提供了非常有效而又简单的触发,还可以探测大部分能量被中微子带走的事例。

#### (4) 标记

用  $4\pi$  立体角的量能器同双光子标记设备结合,就成为一个鉴别湮灭事例与双光子事例的有力工具。把“细颗粒”的 BGO 量能器延伸到靠近束流轴的小角度,沿着张开的束流管道,安排成斜罩(图 8 中表示第一段),可以把标记设备做得很紧凑。如果能够得到大直径超导 IR 四极磁铁,我们打算从第一个 IR 四极磁铁标记,这时偏开原初束流轴只有 8 mrad。用这个装置可以标记大部分的  $2\gamma$  过程,而且还可以用作亮度监测器。它也能够探测  $\gamma$  量子靠近束流方向飞出的一部分初态辐射过程。这个装置对能量低到 50MeV 的光子都灵敏,固有的能量分辨率好于 10MeV,空间分辨率小于 1mm。工业试验表明,在辐照剂量 3MR (伦琴)的 X 射线后, BGO 的闪烁效率损失约 10%。

物理

#### 4. 可供选择的方案: 铅-液体闪烁体电磁量能器

如果到时候得不到需要数量的 BGO,一个可能的选择方案是采用液体闪烁体量能器。在西欧中心一个直接光子实验中曾经发展过这种探测器。模型试验也是成功的。这种结构的主要优点是空间分辨率高,双光子分开能力好以及价钱便宜。

##### (1) 布置

我们提出用桶形几何结构: 长度 160cm,内直径 100cm,厚度 25cm。用聚四氟乙烯管作为元件,分左右绕组绕成两组螺线。中间再放一组平行于轴的元件,提供第三度读出(见图 10)。聚四氟乙烯管一直伸到铅板所限定的基准体积之外,在桶部的两侧合起,再用一根数米长的光导将光引出磁场。光导设计和量能器本身类似,是在直径较大的(20—30mm)聚四氟

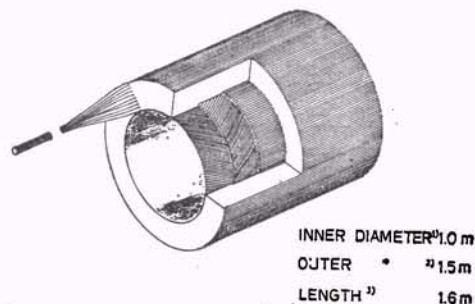


图 10 铅-液体闪烁体取样量能器。图示聚四氟乙烯管的安排

内部基本的“三个一组”(triplet)包括自内向外的以下各层:

- (1) 一个 3mm 厚的铅筒;
- (2) 一组直径 4.5mm 的聚四氟乙烯管(628 个),  $30^\circ$  角的右绕螺线;
- (3) 一个 3mm 厚的铅筒;
- (4) 一组直径 4.5mm 的聚四氟乙烯管(628 个),  $30^\circ$  角的左绕螺线;
- (5) 一个 3mm 厚的铅筒;
- (6) 一组直径 5.2 mm 的管,平行于轴(628 个)。

这个基本的“三个一组”的内半径和外半径为 50 cm/52.3cm。次一组由第一组向外扩充,比例为 52.3/50.0。依此类推,直到总共 10 组。这种几何尺寸保证了相继螺线间的相称性(correspondence):由相互作用区发出的簇射,总是击中确定的元件。将由几何中心看去、在各自投影内的十个管子(或是螺线、或是直管)合成一束。因此每侧给出  $3 \times 628$  束。

每束通过封在末端环上的石英窗收光。整个结构用不锈钢层盖起来,除充闪烁体需要的通道以外,内部充环氧树脂,总体结构是牢固和自承的

- 1) 内直径; 2) 外直径; 3) 长度



乙烯管内装高折射率液体。在每根光导的端部接一个光电倍增管。两侧总共用大约 4000 个光电倍增管，ADC 的数量与此相同。采用这种几何结构时，还留一个半径为 50cm 的圆形区域放顶盖。顶盖的设计正在研究中。

(2) 性能

模型试验的结果表明，它的性能准确地符合模拟计算的预言值。所以有把握预期以下几点：

(a) 能量分辨率。其中包括正常的取样分辨率，约  $0.14/\sqrt{E}$ ；以及由量能器不均匀性和刻度误差等引起的剩余分辨率，估计约 2.5%。分辨率受各元件间衰减长度分散性的限制。测量表明，衰减长度相当大（约 190cm）。直管衰减长度的分散是 1%。

(b) 空间分辨率。用 1cm 宽度元件时对簇射剖面的拟合表明，位置可定到  $\sigma < 0.8\text{mm}$ 。预期用 5mm 宽度元件时精度将会好于 0.5mm。

(c) 双簇射分开。用 1cm 宽度元件时对 16 GeV/c 数据的拟合表明，如果两个光子相距大于 16mm 就能够分开。预期用 5mm 宽度元件时两个光子相距大于 10mm 就能够分开。因此在距离 50cm 时可以明确地鉴别动量小于 14

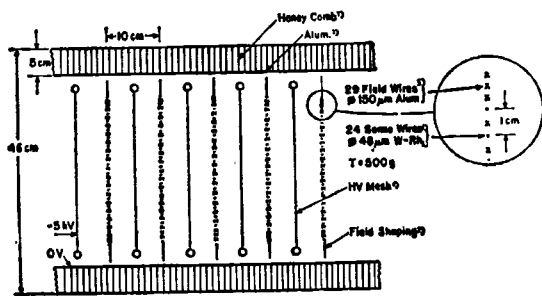


图 11 中间的集团漂移室

24 根直径为  $48\mu\text{m}$  的钨铼丝，拉的张力为 500g，间距 1cm，用玻璃边拉在一个平面上。中间夹放  $150\mu\text{m}$  硬铝的场丝以抑制串音。漂移场是由薄的铝网电极产生的，它平行于灵敏丝，距离为 5cm，加 5kV 的负高压。灵敏丝平面和高压电极都伸展得使电场均匀。从我们在 BNL 的试验知道，这种结构是静电稳定的，给出分辨率为  $120-180\mu\text{m}$ ，虽然丝很长，而且是单端读出。除平均坐标外，每个漂移室还给出径迹的局部斜率，准确到 1mrad

- 1) 蜂窝状壁； 2) 铝； 3) 场丝； 4) 灵敏丝；
- 5) 钨-铼； 6) 高压网； 7) 电场整形

GeV/c 的  $\pi^0$  介子。

5.  $\mu$  子漂移室

(1) 布置

见图 1(a),(b)。在双  $\mu$  子质量 100GeV 处，优化设计探测器，达到 1.25% 的质量分辨率。用三组漂移室测量磁偏转弧矢到 1.8%。丝的长度是 6m，中间有支撑，平行于 4.5kG 磁场安放。为了改善分辨率，每个漂移室中装有  $N$  根丝组成的匹配好的集团 (matched clusters)。

漂移室的精度取决于丝集团 (clustered wires) 的精确相对定位。为此，将全部丝拉在一个光学平的 ( $\approx \lambda$ ) 玻璃边上。玻璃块安装在用计算机控制车床精密加工过的铝板上上面。所

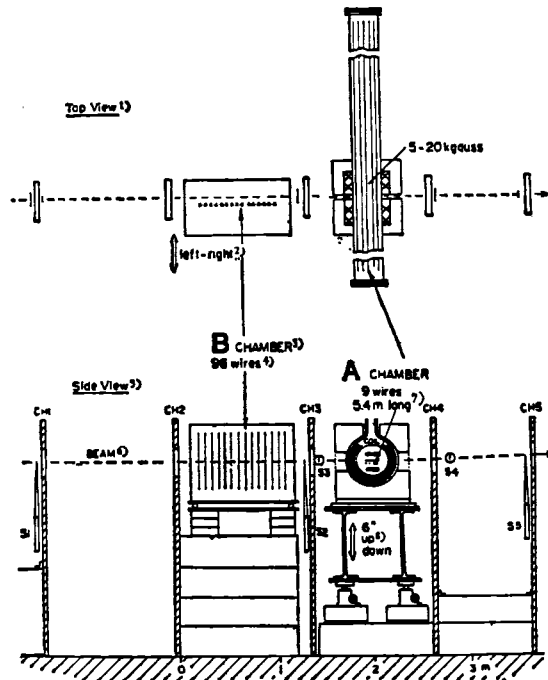


图 12 在 BNL 实验室的试验装置

A 漂移室。它用了 9 根直径  $45\mu\text{m}$  的钨铼合金丝，张力 450g，长度 5.4m，间距 1cm。详细研究了像实际大小一样的室的对准和性能（不同的气体、压力、磁场和漂移电场）。束流由计数器 s1, s2, s3, s4, s5 确定。漂移室和磁铁放在水压台上，移动它就可以改变漂移距离。

B 漂移室。这是在阿姆斯特丹制造的。漂移距离为 10cm，灵敏丝长度为 80cm，间距为 1cm，总共 96 根丝。用薄的印刷电路箔，得到  $1.06\text{ kV/cm}$  的非常均匀的漂移场

- 1) 顶视图； 2) 左-右； 3) 漂移室； 4) 丝； 5) 侧视图； 6) 束流； 7) 长； 8) 上下

有漂移室的玻璃板都完全相同，而且可以精确检验。为结构简单和定位起见，把漂移室做成长度均匀的盒子。采用蜂窝状壁来减小多次散射。采用薄的超绝缘层来保证热屏蔽。

图 11 是“集团漂移室”的详细结构。用一个在磁场中工作的长度为 5.4m 的 9 根丝的模型，和另一个在 NIKHEF 研究所建造的 96 根丝的漂移室，来确定静电的和机械的结构。过去两年中，这两种漂移室都曾在 AGS-BNL 6GeV 质子试验束中广泛试验过。

(2) 技术发展和试验结果

漂移室两个主要特性是：磁场中单端电子学读出的长丝的性能，以及径迹定位随  $1/\sqrt{N}$  改善的关系。图 12 表示 5.4m 长的试验漂移室 (A) 水平放在螺线管内，而另一个漂移室 (B) 垂直放在它前面。

(a) A 漂移室的结果：图 13(a) 给出一个

大气压的氩：乙烷 63% : 37% 混合气体的结果。在  $B = 0$ 、漂移场 1.2kV/cm 时，测得饱和漂移速度为  $5.1\text{cm}/\mu\text{s}$ 。在  $B = 0.5\text{T}$  时，电子在洛伦兹力作用下，以角度  $\alpha$  向丝漂移。由位移  $x$  与延迟的关系曲线[图 13(a)] 给出投影漂移速度，从而确定  $\alpha = 18^\circ$ 。

比较分辨率测量结果，表明每根单丝的位置分辨率是  $\sigma = 180\mu\text{m}$ 。这是将某根丝的信息同其他 8 根丝的拟合信息进行比较得到的。从图 13(b) 可以看到击出电子的贡献（朗道分布的尾巴）。引入松的截断（相当于图 13(b) 中的线），排除的单丝测量小于 10%，但可以使漂移距离为 0.6cm 和 5.0cm 时的分辨率分别改善到  $\sigma = 130\mu\text{m}$  和  $180\mu\text{m}$ 。

(b) B 漂移室的结果：在布鲁克海文实验室试验束中的测量结果见图 13(c)。平行径迹分析如下：用一根穿过漂移室内开头和最后 25

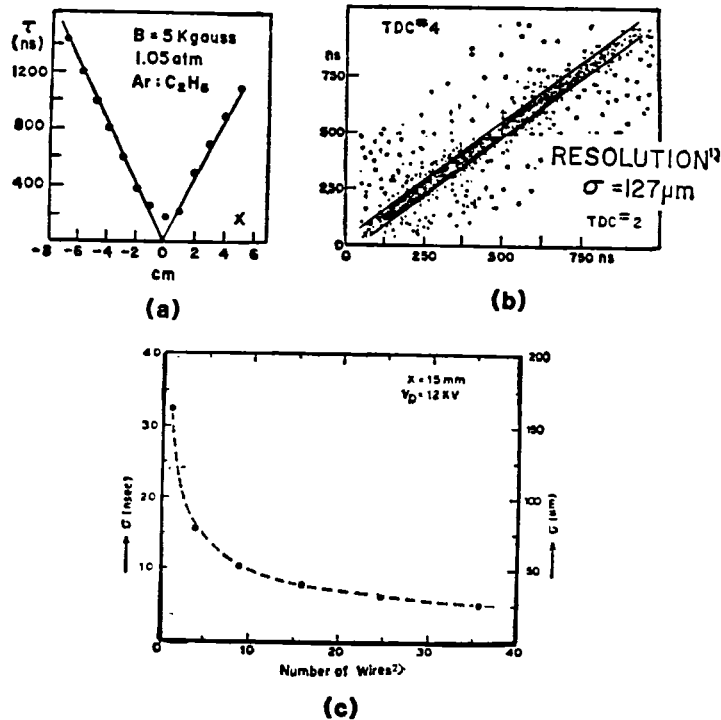


图 13 在 BNL 实验室测量的结果

(a) 5.4m 模型 (A)，漂移时间与对于束流位移的函数。  $x = 0$  时的值是因束流有限大小造成的；(b) (A) 中两根丝记录时间的相对标绘。由此给出分辨率为  $127\mu\text{m}$ ，见文中说明；(c) 96 根丝模型 (B) 中，精度与取样丝数目的函数。未引入截断。这是位移 15 mm、充气 1 大气压氩-乙烷的数据

1) 分辨率； 2) 丝数

个点的直线进行拟合;用室中心的 36 根丝研究相对于直线拟合的偏离值  $\delta_{\text{观察}}$  和分辨率  $\sigma$ ; 用 1, 4, 9, 16, 25 和 36 根丝的组合计算平均点; 由这些组合相对于直线的平均点定出距离  $\delta_{\text{观察}}$ . 图 13(c) 表示平均于灵敏丝的径迹的精

度  $\sigma_{\text{真实}}(\sigma_{\text{观察}}^2 = \sigma_{\text{真实}}^2 + \sigma_{\text{直线}}^2)$  同测量丝数的函数关系. 观察的  $1/\sqrt{N}$  规律符合于 Glueckstern 公式. 对于 36 根丝, 得到  $25\mu\text{m}$  的精度! 因为还没有引入截断, 这些数值是很保守的.

(3) 对准

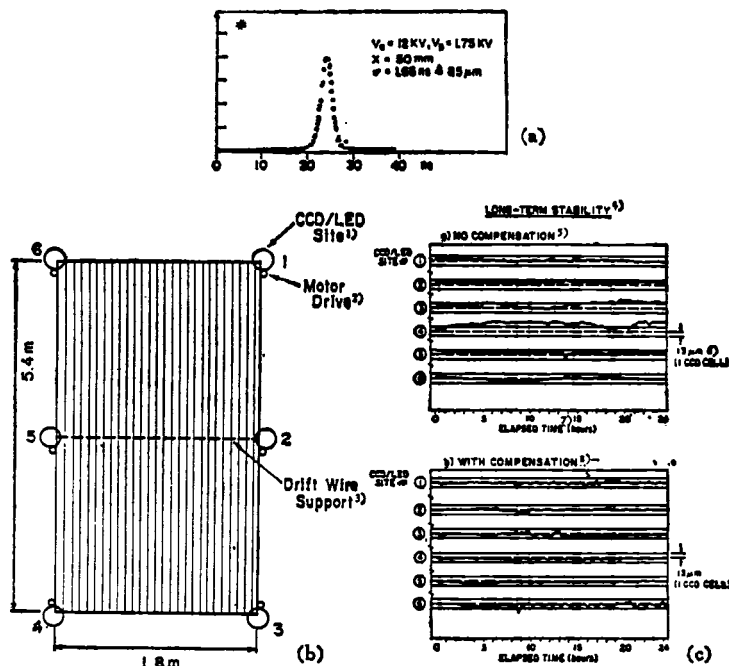


图 14  $\mu$  子漂移室的对准和稳定性

(a) 单根丝看到的、激光产生的信号; (b) 在 MIT 用反馈补偿机械畸变的大漂移室的示意图;

(c) 机械不稳定性的动态补偿

1) 位置; 2) 驱动马达; 3) 漂移丝支撑; 4) 长时间稳定性; 5) 无补偿; 6) 单元; 7) 时间; 8) 有补偿

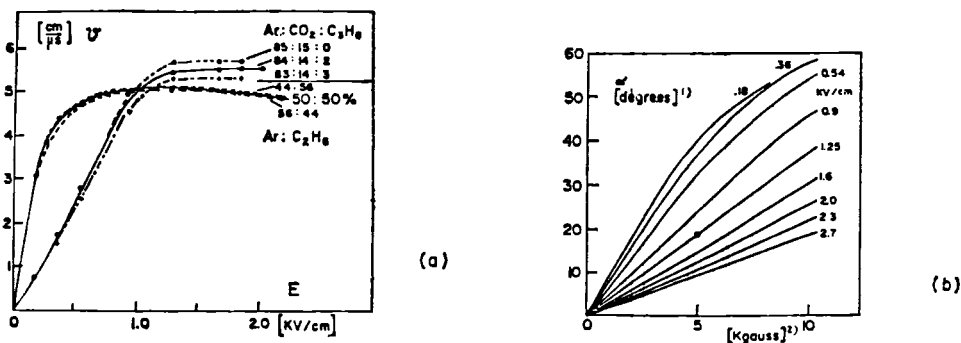


图 15 气体的研究

在磁场中对混合气体进行过广泛研究: (a) 氩-乙烷的漂移速度特性. 列出不可燃的氩-二氧化碳混合气体的结果作为比较. (其中加了  $\geq 2\%$  丙烷以抑制火花). 氩-二氧化碳-丙烷混合气体和氩-乙烷混合气体不同: 后者用  $E = 1\text{ kV/cm}$ , 当电压和气体混合比例变化时速度是稳定的, 但前者需要严格的控制; (b) 对氩-乙烷混合气体, 磁场中偏转与磁场强度关系的测量值 1) 度; 2) 千高斯

可用紫外激光束模拟在磁场中的漂移室内的直( $p=\infty$ )径迹。在图 1(b)中表示用小的、无窗的气体管子把全部漂移室层联系起来,可用定位光学仪器 and 电离激光器进行精密的相对对准。图 14(a)是一根丝记录到的高强度  $N_2$  激光束的剖面。在这个测量中,束平行于 96 根灵敏丝,距离 50mm。分布的重心可以定到  $< 15 \mu m$ 。图 14(b)是一个和图 1 中类似大小的漂移室的示意图。在四个角的每一角,及在中间支撑的两边,用一个有 256 个大小为  $13 \times 13 \mu m^2$  的单元的电荷耦合装置 (CCD),来测量相对于一个参考系统的运动。这个参考系统是无应力的,带有聚焦光源。数字信息对温度和压力不灵敏,记在磁盘的刻度文件上。经过持久运转后,用马达驱动的楔体可在 0.5T 磁场中执行由计算机控制的补偿。图 14(c)的上图表示框架在复杂应力作用下长时间的翘曲。由下图看到,补偿可使全部偏差限制在  $13 \mu m$  以下,而且整个系统能在长时间中保持重复性。

#### (4) 气体

广泛研究了磁场中混合气体的性能,结果见图 15。

以上几项试验总起来表明:

(i) 长丝是稳定的。在  $B = 0.5T$  的磁场中工作时,具有好的分辨率  $\sigma = 200 \mu m$ 。就整个系统而言,  $250 \mu m$  是合理的分辨率数值。

(ii) 直到  $25 \mu m$  时  $1/\sqrt{N}$  规律还成立。

(iii) 显示出长时间的机械可重复性。用电离激光器进行刻度是力所能及的。

### 6. 实验区

能够容纳所提出磁铁的实验厅,将和 Villars 会议上定的标准不同。它的主轴将平行于束流方向。至少要为一个,最好要为两个端盖提供宽阔通路。举例说,把一个厅转动,就可以做到这一点。

安装磁铁或卸开磁铁,通常要好几个月。但我们设计了一个制成有标准组件的结构,可以很快安装和移开内部部件。应当注意到,我们所提出的磁铁几乎能容纳任何其他替换的探测器。替换我们的探测器只需要几个星期的时间。

### 7. 数据分析

在我们的合作组中,许多成员曾经用量能器技术(光子、电子、强子)参加  $e^+e^-$  物理实验(“马克-杰”、晶体球、LENA, CUSB)。另一些成员参加过用质子加速器和贮存环研究轻子对和粲粒子的产生。我们可以利用这些经验,把我们现有的软件发展为所提出的探测器的在线与离线程序。在我们的初期规划中,预计用三台现有的 VAX 计算机同微处理机相连接,并利用本单位的大计算机中心。对西欧中心计算机时间和计算机连接的要求,我们将过一段时间后再提出。

### 8. 费用与资源

表 1 中列出了预估的探测器费用。

表 1 按 1981 年百万瑞士法郎的估价

部 件		估价 (百万瑞士法郎)			
主要部件	替换方案	主要部件		替换方案	
		低价	高价	低价	高价
顶点漂移室(时间扩展室)及电子学	固体硅探测器+时间扩展室	2.0	3.0	6.8	7.8
高分辨率簇射计数器 (BGO)	液体闪烁体阵列	17.3	18.3	2.9	3.7
强子量能器及读出		6.0	6.0		
$\mu$ 子漂移室及电子学		5.7	5.7		
标记量能器 (BGO)		1.5	3.5		
磁 铁		21.0	26.0		
支撑和对准装置		5.3	5.3		
触发逻辑		3.7	5.7		
储备费		0	5.3		
在线计算机		可利用 3 台 VAX 计算机			
数据处理能力					
总 计		62.5	78.8		
总计(如果提供磁铁)		53.5	67.8		

## 9. 参加合作

我们合作组有兴趣同其他研究单位讨论合作问题。

## 五、探测器的特色

这个探测器对测量光子和轻子是最好的。用它寻找含轻子的稀有衰变和测量低到50MeV的 $\gamma$ 射线谱是很理想的。它有以下一些特色:

### 1. 顶点漂移室

顶点漂移室的空间分辨率为 $30\mu\text{m}$ 。我们得到 $\Delta P/P = \sqrt{9+0.5P^2}$  (%)。漂移室的双径迹分辨率好 ( $\approx 0.5\text{mm}$ )、体积小、场强低,用它进行图象识别和径迹重建工作,比强场、大体积螺线管容易得多。因为体积小、场强低,卷曲动量 (curlup momentum) 是 $P \approx 21\text{MeV}$ ;而对于 $r = 150\text{cm}$ ,  $B = 15\text{kG}$ 的磁铁,临界动量要比它坏一个数量级以上。这顶点漂移室能测量动量高达 $50\text{GeV}/c$ 粒子的电荷。我们还能用它研究普通的带电强子谱。

### 2. 量能器

BGO的能量分辨率是 $\Delta E/E = (0.5/\sqrt{E} + 0.3)\%$ 。对于强子, $\Delta E/E \leq 0.75/\sqrt{E}$ 。中心探测器内带电粒子独立的动量测量,将在至少 $4\pi$ 立体角的70%内简化电磁量能器和强子量能器的刻度工作。对 $\beta < 0.8$ 的粒子,可用顶点漂移室测量动量、用BGO的第一段测量 $dE/dx$ 来鉴别粒子。

300 MeV 以上的电子可在 $4\pi$ 立体角的98%内被探测到(在99.9%内效率稍低)。用(1)两次能量测量,(2)簇射深度取样,或者可用(3)内探测器电流分配读出得到 $dE/dx$ 信息,对数GeV以下的 $e/h$ (电子/强子)的排斥比可以好于1/1000。在1GeV时,由顶点漂移室得到 $\Delta P/P \approx 3\%$ (包括多次散射),由BGO得到 $\approx 1\%$ 。 $dE/dx$ 分辨好于 $4\sigma$ 。由于用(1)纵向簇射取样,(2)横向簇射取样,及(3)强子量能器反符合,对高能 $e/h$ 的排斥比可好于1/500。

中心探测器系统很紧凑,因此可以对束流-气体相互作用或同步辐射本底进行有效的屏

蔽。可以把IR四极磁铁放到离相互作用点 $\pm 220(170)\text{cm}$ 的近处。用大直径超导四极磁铁,还可在离原初束流轴 $8\text{m rad}$ 的近处进行标记。我们可用标记系统将湮灭事例进一步从大量 $2\gamma$ 事例中分开,并且可以对大部分的辐射过程进行标记。

### 3. $\mu$ 子漂移室

1.8GeV以上的 $\mu$ 子可在 $4\pi$ 立体角的75%以内被测量到。探测器具有小的衰变体积。顶点漂移室能探测非常小的衰变拐折。量能器同时也起 $\mu$ 子过滤器的作用。由于在中心探测器和外边径迹漂移室内两次的动量测量,可以对动量1.8—10GeV的 $\mu$ 子得到丰富的信息。估计衰变和穿透的本底约 $\approx 10^{-3}$ 。

在计算动量分辨率时,我们假设漂移室空间分辨率是每个平面 $250\mu\text{m}$ ,而且每个漂移室平均会有两个坏的测量(由于 $\delta$ 射线及本底),或者会有较差的分辨率(由于畸变电场)。因此弯曲平面内的16-24-16取样测量,可以得到14-22-14好的测量。在 $\mu$ 子漂移室对用氦袋时, $\mu$ 子的分辨率 $\Delta P/P = 1.8\%(P = 50\text{GeV})$ ,或者说,对于 $m = 100\text{GeV}$ , $\Delta m/m = 1.3\%$ (如 $\sigma = 200\mu\text{m}$ ,改善到1.1%)。

### 4. 分辨率

探测器对光子和轻子的能量分辨率好,使我们能测量窄共振( $\tau, Z^0$ )的真正宽度,而且有很好的信号本底比。这是非常重要的,因为辐射效应会使 $Z^0$ 谱的上部畸变约10倍。对末态粒子进行精密测量,将大大增加寻找新粒子的灵敏度,并且提高测量 $Z^0$ 质量、宽度与电荷不对称性的精度。对轻子的分辨率很好,因此我们可以通过测量 $Z^0 \rightarrow l^+l^-$ 来逐个事例地鉴定 $e^+e^- \rightarrow Z^0 + \gamma$ 类型的事例。如果没有精确测量末态粒子,可以用辐射修正,但是不能改善信号与连续本底之比。

### 5. 灵活性

中心探测器制成有标准组件的结构,并且很紧凑,这使我们可能在有未预测的需要时,很快地改动探测器,并且还可以在LEP开始运转之前对大部分设备进行试验。

## 六、物理例子

如前所述，过去粒子加速器上的重大发现往往是在建造它们时完全没有预料到的。此外，目前的一些问题可能在今后几年内得到解决。因此，我们仅仅列举几个例子，来指出我们探测器的特色。

### 1. 单轻子态

内含轻子谱可以给出有关新味道 (flavors)、新轻子，电子、 $\mu$ 子和 $\tau$ 子的超对称性对应物，激发态轻子  $\mu^* \rightarrow \mu + \gamma$  和  $e^* \rightarrow e + \gamma$  以及长寿命轻子的信息。图 16 中举出一个例子，表明我们能够从  $Z^0 \rightarrow t\bar{t}$  ( $20 < M_t < 45\text{GeV}$ ) 探测裸的味道 (naked flavor)。 $\mu\bar{\mu}$  和  $t\bar{t}$  电荷不对

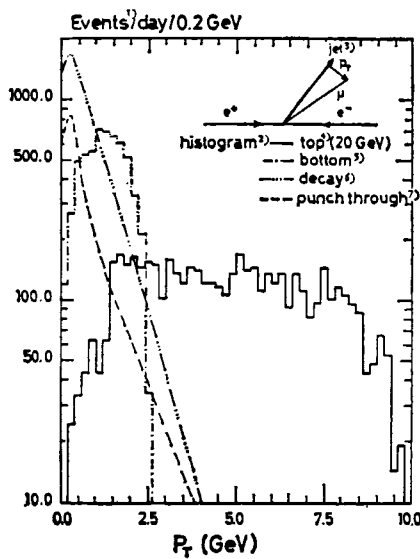


图 16 将  $Z^0 \rightarrow t\bar{t}$  与其他过程分开

图示  $dN/dP_T$  对  $P_T$  的关系。 $P_T$  是  $\mu$ 子相对于喷注轴的横动量。如果  $t$  夸克的质量小于  $Z^0$  质量的一半，会大量发生过程  $e^+e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow t\bar{t}$ 。这类事例的清楚特征是产生两个宽喷注，在其中一个喷注中含有一个  $\mu$ 子。因为  $t$  夸克质量比  $u, d, s, c, b$  夸克高，在  $t$  夸克时， $\mu$ 子相对于伴随的强子喷注的  $P_T$  比在轻夸克时的  $P_T$  大 (图中设  $M_t = 20\text{GeV}$ )。因此，观察  $\mu$ 子相对于伴随强子喷注的  $P_T$ ，可以把  $t\bar{t}$  事例同本底  $Z^0 \rightarrow u\bar{u}, d\bar{d}, s\bar{s}, c\bar{c}, b\bar{b}$  区分开。如果  $M_t > 20\text{GeV}$ ，区别将会更大。衰变本底和穿透本底中的尾部是由硬胶子辐射造成的。用多喷注分析可以把它们进一步压低

- 1) 事例数; 2) 直方图; 3) 喷注; 4) 顶夸克; 5) 底夸克; 6) 衰变; 7) 穿透

称性值过零点之差是对  $\sin^2 \theta_w$  的直接测量，而不需要辐射效应之类的修正。

### 2. 单光子

晶体球探测器在共振处研究内含光子，其丰富内容给人以很深印象。现在我们可以  $Z^0$  质量处或在新层子素态处用类似的技术，例如寻找下面过程的单色光子：

(1)  $Z^0 \rightarrow H^0 + \gamma$ ，它在标准模型中是压低的，分枝比约  $BR \approx 2.4 \times 10^{-6}$  (相当于产生  $10^7$  个  $Z^0$  时有 24 个单色高能光子的事例)。主要本底是由  $Z^0 \rightarrow Q\bar{Q}\gamma$  产生的连续谱，其中光子倾向于靠近一个  $Q$  的方向。

(2) 顶层子素  $t\bar{t} \rightarrow H^0\gamma$ ，对  $M_{H^0} < 0.9M_{t\bar{t}}$ ，其分枝比  $\approx 1\%$ 。本底也是由  $t\bar{t} \rightarrow \gamma_{ss}$  产生的连续谱。在引入运动学截断前，本底数量与信号

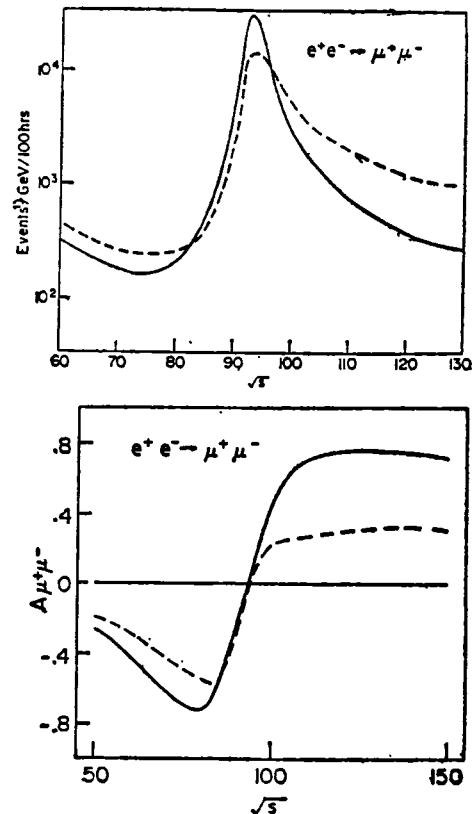


图 17

$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$  过程表现事例数和电荷不对称性与质心能量的函数关系 (虚线)。实线是除了辐射效应后的曲线

- 1) 事例数

接近。

在上述两例中，信号本底比都正比于光子的能量分辨率和空间分辨率。如果  $\Delta E_\gamma/E_\gamma < 1\%$ ，空间分辨率为 2mm，我们估计本底小于  $Z^0 \rightarrow H^0 + \gamma$  的 50%。对于  $t\bar{t} \rightarrow H^0 + \gamma$  的情况，本底可以忽略(如  $M_{H^0} < 0.9M_{t\bar{t}}$ )。因此用所提出的探测器，有可能在上述道中发现这类粒子。

(3) 如果 LEP 在稍稍高于  $Z^0$  峰之上运行，则可通过反应  $e^+e^- \rightarrow Z^0 + \gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}\gamma$  研究中微子计数。

(4) 用  $\gamma$  谱学研究结合的和开放的  $t\bar{t}$  态。

### 3. 双轻子态

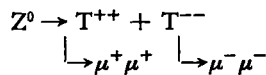
(1) 在  $Z^0$  共振附近，精密测量  $e^+e^-$  和  $\mu^+\mu^-$  末态，定出它的质量、宽度和电荷不对称性参数(图 17)。

(2) 精密测量宽度给出中微子数目的信息。如果有  $10^5$  个事例数， $\Delta M/M \simeq 1\%$ ，我们预期  $\Delta\Gamma \simeq 40\text{MeV}$ ，它可以同每种味道的中微子部分宽度  $\Gamma_{\nu\bar{\nu}} \simeq 180\text{MeV}$  相比较。

(3) 精密测量层子素的轻子衰变。

### 4. 多轻子态

Gelmini-Roncadelli 的非正统理论预言存在一个  $T^{++}$ ， $T^+$  和  $T^0$  粒子家族，它们主要衰变为  $\mu\mu$ ， $\mu\tau$  或  $\tau\tau$ 。例如：



对于  $M_T = 20\text{GeV}$ ，我们可以确定  $M_T$  到 160 MeV 的精度。

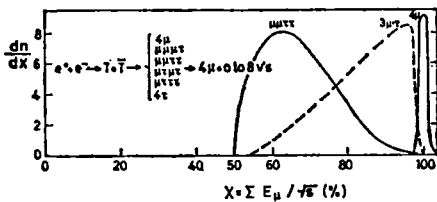


图 18 对于三种不同中间态的  $e^+e^- \rightarrow T^{++} + T^{--} \rightarrow 4\mu + \nu$  过程，我们探测器观察的  $\mu$  子总能量的分布

利用约束条件  $m_{\mu\mu} = m_T$  和  $E_{\mu\mu} = 1/2\sqrt{s}$ ，可以把它们同另外三个道区分开。从图中可看到，需要有非常好的动量分辨率，才能够鉴别每一种谱

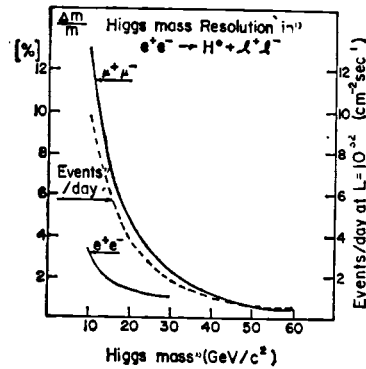


图 19 通过  $e^+e^- \rightarrow H^0 + Z^{0*}$  寻找希格斯粒子

这种过程非常稀少。对质量大于  $45\text{GeV}/c^2$  的希格斯粒子，即使亮度  $L = 10^{32} \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$  时，预期计数率小于每天 1 个事例。但是，它有明显的特征，因为主要衰变方式是  $H^0 \rightarrow f\bar{f}$ ，其中  $f$  是最重的费米子 ( $b, t, \text{新的重轻子, 等等}$ )，而且  $M_f < 1/2M_{H^0}$ 。最可能的情况是  $H^0 \rightarrow b\bar{b}$ ，可以预期有一个或两个宽喷注，同时出现一对高质量的  $\mu$  子对

1) 在  $e^+e^- \rightarrow H^0 + l^+l^-$  中希格斯粒子的质量分辨率； 2) 希格斯粒子质量； 3) 事例数

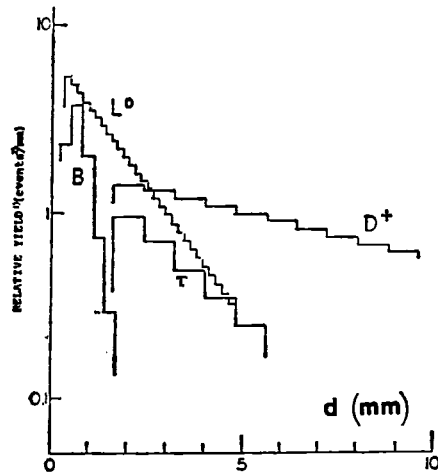


图 20 长寿命粒子衰变长度的分布

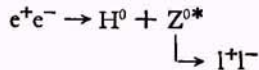
可以用空间分辨率高和径迹分开好的时间扩展室，通过重建衰变顶点，来研究由  $Z^0$  衰变产生的、相当长寿命的粒子 ( $10^{-13} < \tau < 10^{-10} \text{sec}$ )。在给定分辨率  $\sigma$  时，可以确定沿径迹方向顶点位置到  $\Delta d = \sigma/\theta$ ，其中  $\theta$  是用来重建顶点的两个带电次级粒子之间的夹角。因为  $\theta_{\text{max}} \sim 1/r = M/E$ ，衰变长度  $d = r\tau$ ，比值  $d/\Delta d$  是与粒子能量无关的。图示不同粒子的平均衰变长度、分辨率及顶点和相互作用距离的分布。以 mm 计的距离分布相应于  $E \simeq 1/2 M_{Z^0}$ ，这只对  $\tau^\pm$  和高质量轻子是严格正确的。  $\Delta d$  的分布与能量无关。可以看出，如果粒子以合理的分枝比衰变为多个带电粒子末态，而且它们的寿命在  $10^{-13}$  到  $10^{-10} \text{sec}$  范围之间，用我们的探测器测量它们的寿命是可行的

1) 相对产额； 2) 事例数

如果一些  $\mu$  子被  $\tau$  子所替代, 事例的特征将是伴随着强子多重数低和丢失能量大的轻子信号(图 18).

### 5. 双轻子和强子喷注

我们的探测器可以精确测量轻子和喷注. 一个有趣的例子是通过



寻找希格斯粒子.

图 19 给出丢失质量分辨率和计数率.

### 6. 长寿命粒子的寿命

在图 20 中表示不同粒子的平均衰变长度、分辨率和从相互作用点到顶点间距离的分布. 可以看到, 我们能够测量的寿命范围是  $10^{-13}$  sec 到  $10^{-10}$  sec

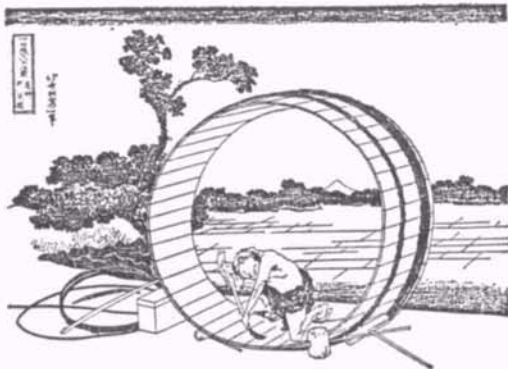


图 21 装配的细节

图中一个高技巧的技师在最后调节对准有名的富士山的一段“探测器”. 这也许是现代世界中许多实验设备的先驱吧. 特别要注意的是, 技师专心致志于工作, 工件结构非常简单, 风景也是很美的

(上接第 434 页)

们利用测量到的深中心分布, 并考虑其对浅杂质测量的影响, 得知浅杂质在结区附近也有所下降, 这与实际情况是相符的.

## 四、讨论

(1) 由于双相关法确定的观测区在体内, 因此表面的影响可以消除.

(2) 当固定一组脉冲高度, 通过改变偏压

## 七、可供选择的方案

1. 可在距离相互作用点 2.2m 处安装超导小  $\beta$ (mini- $\beta$ ) 装置. 如把探测器稍加改动, 还可把小  $\beta$  装置放在 1.7m 处. 指明这点是有趣的, 在 CESR 对撞机上曾经成功地用过一个非对称的小  $\beta$  装置.

2. 可以部分地或全部地移开量能器, 以高的动量分辨率研究喷注中的单个粒子. 还可以在“磁大厅”中加  $dE/dx$  计数器、飞行时间计数器或切伦科夫计数器.

3. 把  $\mu$  子鉴别和测量扩充到向前方向.

4. 飞行时间计数器. 可在顶点漂移室和 BGO 中间加进 6mm 厚的桶部和顶盖部闪烁体, 不致使电磁量能器的分辨率变坏. 因为飞行距离短、闪烁体薄, 这种装置只能提供一个适中的(虽是不能忽略的)粒子鉴别, 但它对简单试验和产生触发是有用的. 可以用补偿线圈保证光电倍增管正常工作. 或者可用近聚焦的(proximity focused)微通道板光电倍增管, 它们的可靠性和价钱慢慢变得可以接受的了.

5. LEP 未来的极化束和更高的能量. 我们的探测器只需作很小改动, 即可在更高能量下工作, 电磁量能器的能量分辨率只稍稍变坏. 强子量能器可以多加一个吸收长度和附加铜吸收体而得到改善. 外部探测器可以忍受同步辐射能量的增高, 而内部探测器是相当容易屏蔽的(但固体探测器是例外, 因为它们是对中子辐射损伤敏感的).

来进行测量时, 每个观测区都处于相同的电场下, 从而消除了由于电场不同而造成对发射率的影响.

(3) 若固定偏压而改变脉冲高度, 则该方法可用来研究电场对发射率的影响.

(4) 该方法灵敏度高, 适合测量低浓度深中心在体内的分布. 对于高浓度深中心分布的

(下转第 446 页)