

北京正负电子对撞机 (BEPC) 上的 试验束及其物理工作

刘念宗 张彩娣 郑林生 胡力东 赵小健 钟学初
邓虎 朱善根 张戈 张竹湘 张良生 周永参
徐建国 谈益平 韩树荣 韩纓

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)

鲍秀敏

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘 要

本文介绍了北京正负电子对撞机 (BEPC) 上的试验束的初级束的研制; 报道了次级束的产生和次级束中正电荷粒子的鉴别与测量; 简单介绍了利用试验束进行的量能器模块的辐照损伤研究。

一、引 言

几乎所有的高能加速器都要开辟一条或几条试验束。试验束是由加速器上引出的一条束流, 它利用加速器正常运行的闲置时间工作, 可以满足以下几个需要:

- a. 试验、研究探测器的原型;
- b. 校准或标定探测器;
- c. 摸索实验方案的可行性;
- d. 支持研究与发展 (R&D)。

BEPC 上的试验束是拓展 BEPC 直线加速器功能的一个实验设施。它的建成, 不仅使 BEPC 的电子直线加速器由单纯的注入器变成了多用途的电子加速器; 而且还可通过打靶, 将 BEPC 能够提供的粒子束, 由单纯的正负电子束增加为正负电子束、 π 束、 μ 束和质子束等。

BEPC 上的试验束分为初级束和次级束两个部分, 见图 1。初级束是从直线加速器末端用两块偏转磁铁 (B_1, B_2) 将束流偏转引出的, 再通过有五块四极磁铁 (Q_1-Q_5) 和四块导航磁铁 (HV_1-HV_4) 的运输段引入试验束实验大厅。束流监测系统包括荧光靶-工业电视和束流变压器 (BCT)-模数转换器 (ADC) 两个系统。次级束是由初级束打靶产生的, 它包括次级束通道、分析磁铁 B_3 、以及探测器监测系统 (见图 1 及第三节有关内

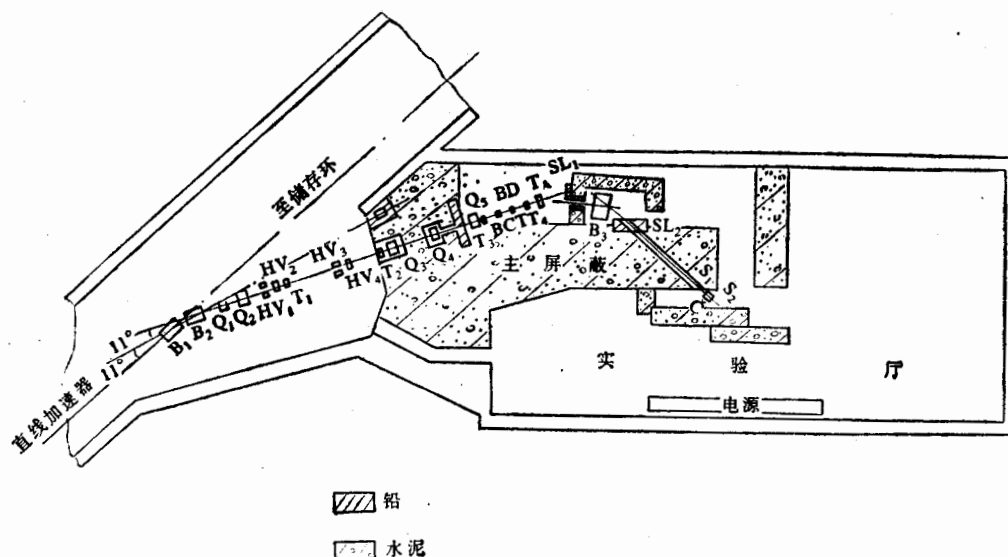


图1 试验束装置布局

$B_{1,2}$ 偏转磁铁, B_3 分析磁铁, Q_{1-4} 四极磁铁, HV_{1-4} 导航磁铁, T_{1-4} 荧光靶, T_A 产生靶
BCT 束流变压器, BD 束流探测器,

容)。目前已测到动量范围在 $120-500\text{MeV}/c$ 内的, 含有 e^+ 、 π^+ 、 μ^+ 、 p 的次级束。

试验束的工作特点是使用灵活, 可以根据不同的实验要求, 设计不同的实验方案, 以提供不同的束流种类。试验束的建成, 为我国中高能物理实验及探测器的研究与发展提供了一个简易的试验设备。

本文将首先介绍试验束的初级束, 然后报道已经完成的正电荷次级粒子的测量和量能器辐照损伤实验两项物理工作。

二、初级束

初级束是指将直线加速器输出的 1.1GeV 高能电子束引入试验束实验大厅, 总长约 20 米的束流输运段。整个束流线使用尽量少的磁铁、磁透镜等元件, 设计得尽量简单, 但又要能满足实验要求。初级束的主要性能指标如下:

- 束流类型: e^- ;
- 束流能量: 1.1GeV ;
- 束流峰值强度: $50-600\text{mA}$ (或更大);
- 束流脉冲宽度: 2.5ns ;
- 束流频率: 12.5Hz ;
- 束斑尺寸: $8\text{mm} \times 5\text{mm}$ (或 $1\text{cm} \times 1\text{cm}$)。

初级束共分三段: 第一段为偏转部分。考虑到偏转角度比较小, 直线加速器的能散小于 1%, 所以采用了直接偏转的办法。共用两块二极磁铁, 每块偏转 11° , 共 22° 。

第二段为输运部分。从偏转磁铁 B_2 出口到产生靶 T_A 的距离大约 17 米。要用最少

数量的四极透镜把电子束传送到 17 米,可采用漂移传输的方法。传输的距离与束流的初始条件有关^[1]。初级束中四极透镜 Q_1 、 Q_2 用来聚焦电子束,使初始条件满足远距离漂移的要求。

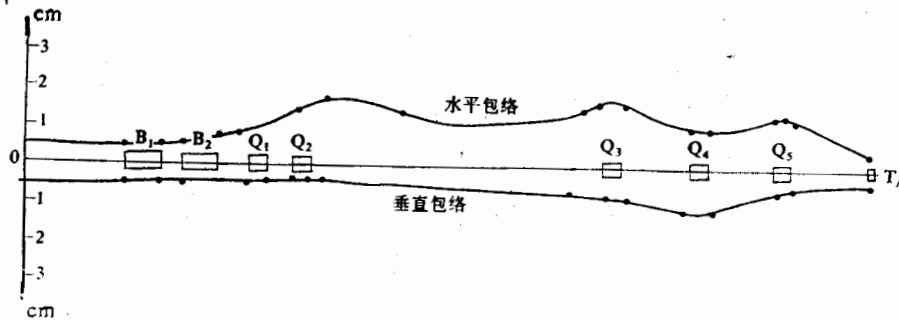


图2 初级束束流包络

第三段为聚焦部分。这部分采用了三个四极透镜 (Q_3 、 Q_4 、 Q_5) 组成的透镜组,它比两个四极透镜组成的透镜组能获得更小的束流包络。包络用《运输系统计算程序》计算^[2],其结果如图2。

初级束由磁铁、电源、束流观测与流强测量、真空系统四部分组成。

1. 磁铁

初级束共包括 5 种 11 块磁铁,它们是 50TB 二极偏转磁铁 2 块,50TBH(V) 二极导航磁铁 4 块,50TQ 四极聚焦磁铁四块,BM01 扁四极聚焦磁铁一块。

初级束偏转后的第一块聚焦磁铁 Q_1 ,因受安装位置的限制,要求横向尺寸不超过 400mm,为此设计了 BM01 扁四极磁铁。磁场梯度设计值与实际测量结果,在好场区内误差不超过 0.3%。

为了扩大次级束分析磁铁的好场区,对 BM03 磁极面边缘场进行了垫补。经过垫补后,在极面宽 260mm 范围内的好场区指标比垫补前提高一个量级,达 1×10^{-3} 。

2. 电源控制

所有磁铁电源在运行开始时要置初值,运行过程中要能根据需要改变电流,并对每块磁铁的电流进行不断的置值和检测。为此,初级束上 9 块磁铁的励磁电源是由计算机控制的。其参考电压由型号为 3016 的 CAMAC 插件提供,精度能达到 1.5×10^{-5} 。按参考电压,通过计算机对每台电源每隔 15 秒置值一次,从而提高了供电电流的稳定性。每台电源电流的测量是由 14 位、型号为 2032 的 CAMAC 插件提供,精度 6×10^{-5} ,数据送入计算机显示或打印。电源控制的方框图如图 3 所示。

3. 束流的导向、观测和流强的测量

调整导航磁铁 HV_1 — HV_4 的电流是为了改变束流的位置和方向,当粒子束偏离磁铁的轴心和中心线时,可又被重新偏回来。为了观察束流的位置和截面,安装了荧光靶束流截面探测器。利用荧光靶上的坐标定出束流的位置和观察束流的截面,精度能达到

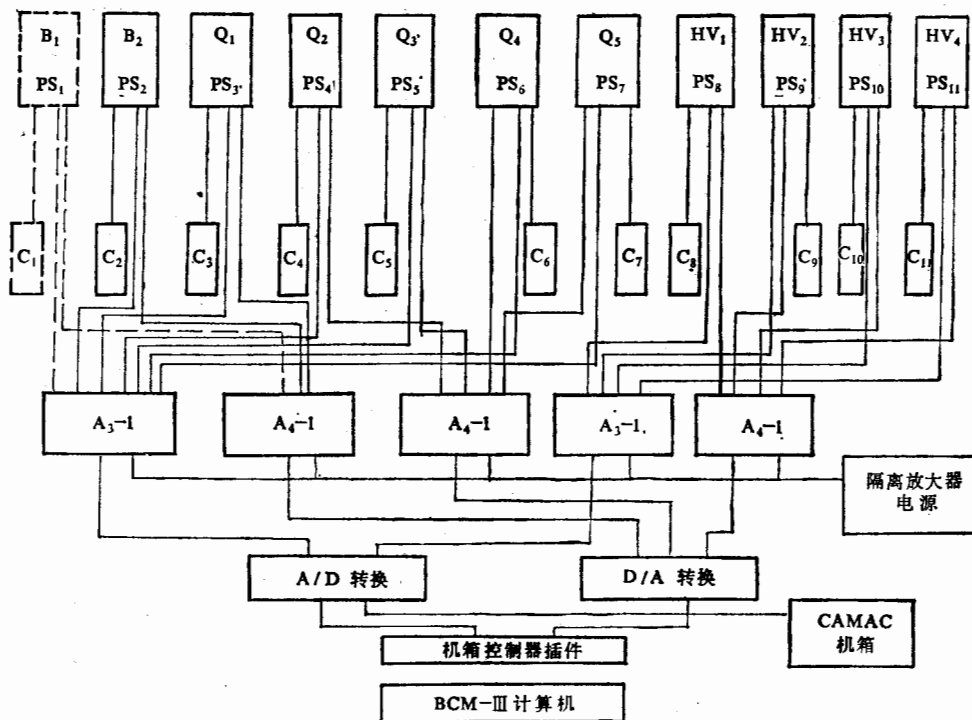


图3 电源控制的方框图

PS₁₋₁₁ 磁铁电源, C₁₋₁₁ 控制器, A_{3-i} 输入隔离放大器, A_{4-i} 输出隔离放大器

0.3mm。

束流强度是由安装于初级束末端的束流变压器 (BCT) 测量的。当束流穿过 BCT 时,在 BCT 上感应出一个电荷正比于粒子数目的信号, ADC 将此信号转换成数字量后,送入计算机处理,能够获得脉冲束流的峰值流强和平均流强。

4. 真空系统

初级束的真空系统全长 18.55 米,内径为 4.5 厘米。装有溅射离子泵、真空规管、插板阀、荧光探头等。由于初级束的真空系统与直线加速器的真空系统相连,所以真空度要达到直线加速器真空系统的真空度,即 10^{-4} — 10^{-5} Pa。我们设置了一台 50 l/s 溅射离子泵和一台 450 l/s 移动式涡轮分子泵机组来达到此真空度。

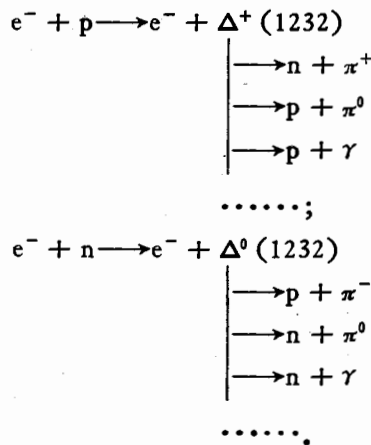
三、正电荷次级束的产生及测量

初级束建成以后,立即开始打靶产生带正电荷的次级强子束。经过测量确认,次级束中包含 e^+ 、 π^+ 、 μ^+ 、 p 四种粒子。

1. 高能电子打靶产生 π 介子和 μ 子的物理过程

高能电子束打靶,通过下述过程可以产生次级强子:

虚光子过程: 入射高能电子与靶材料中的核子通过虚光子交换形成共振态, 共振态立即衰变成次级强子, 例如:



产生的 π^0 很快衰变成两个光子, π^\pm 在飞行过程中衰变成 μ^\pm .

实光子过程: 入射高能电子在靶材料中的原子核附近通过韧致辐射放出高能光子, 高能光子主要引起两个过程: (1) 电磁簇射; (2) 与核子作用形成共振态, 这些共振态衰变, 放出 π 介子、质子、中子。在 BEPC 电子直线加速器的能量范围内 (1.1—1.4 GeV), 可能产生的次级粒子总共有: π^\pm 、 π^0 、 γ 、 e^\pm 、 n 、 p 及 π^\pm 衰变出的 μ^\pm 。

实验上往往并不区分具体产生过程, 而是给出总的产生截面。所以 π 介子的产额为:

$$Y = i \cdot n T \cdot \frac{d^2\sigma}{dp_x d\Omega} \cdot \Delta p_x \cdot \Delta \Omega, \quad (1)$$

其中 i 为入射电子的平均流强, n 为靶中核子的密度, T 为靶厚, $\frac{d^2\sigma}{dp_x d\Omega}$ 为产生 π 的微分截面, Δp_x 为探测器接收的 π 的动量范围, $\Delta \Omega$ 为探测器的接收立体角。利用公式 (1) 可以粗估 π 产额。

2. 产生 π^+ 及 μ^+ 的装置

如图 1 所示, 初级电子束打靶, 产生的次级粒子由用以屏蔽的铅和水泥构成的通道进入分析磁铁 B_3 , 经磁场选择某一固定动量的粒子进入次级束线。

1) 产生靶

靶是由 2mm 厚的钨叠加 24mm 厚的碳构成的, 直径为 20mm。靶前放一个中间有孔的 ZnS 片, 初级电子束通过小孔打到钨-碳靶上, 并在小孔周围激发荧光, 作为束流监视。

靶中采用钨是由于其辐射长度特别短 (0.35cm)^[3], 可以使高能电子把较多的能量转换成高能光子从而产生强子。采用碳是由于其原子序数 Z 低, 对 π^+ 的吸收比较小, 并且电子对产生截面正比于 Z^2 , 所以 e^+ 产生的少, 而 π^+ 在碳中的产额比较高。

2) 分析磁铁

分析磁铁 B_3 是一块二极磁铁, 产生一个均匀磁场。带电粒子经过该磁场后被偏转,

偏转的曲率半径 ρ 和粒子动量 p 的关系为:

$$p(\text{MeV}/c) = 299.79 \times B(\text{T}) \times \rho(\text{m}). \quad (2)$$

曲率半径由入射准直孔道 SL1 和出射准直孔道 SL2 (图1) 的位置和方向决定, $\rho = 2.116 \pm 0.036\text{m}^{[4]}$ 。这样, 次级粒子的动量就由磁场强度 B 决定了。其动量分辨率为 $\pm 1.7\%$ 。

用数字式磁通计和数字式电压表测量了分析磁铁的场强 B 与供电电流 I (实际是供电电流在一个精密电阻上的压降 V) 的关系。测量结果如图4所示, 实验中通过电压表上的读数得到磁场的强度。

3. π^+ 的测量方法、结果及分析

测量次级粒子的动量用飞行时间 (TOF) 法。飞行时间计数器由位于初级束出口处的束流探头 BD 和位于次级束上的闪烁计数器 S_1 组成。束流探头 BD 给出束团到达的信号, 闪烁计数器 S_1 给出各种次级粒子到达的信号, 通过 TDC 测量这两个信号之间的时间差, 就可以得到各种粒子的飞行时间谱。

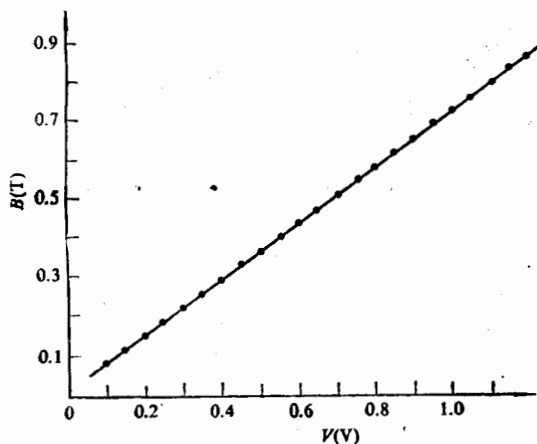


图4 分析磁铁 B_3 的刻度曲线

闪烁计数器 S_1 的时间分辨只有几百 ps, 而束团的宽度为 2.5ns, 这就使入射粒子到达的时间有 2.5ns 的不确定性。因此, 飞行时间计数器的时间分辨本领主要由束团的宽度决定, 大约为 2.5ns。

实验前和实验中都对 TOF 系统进行了刻度, 刻度中用到时间刻度器 (ORTEC 462)。

实验测量了动量范围为 120—500MeV/c 的次级粒子 TOF 谱。图 5(a) 和图 5(b) 分别是 371MeV/c 和 210MeV/c 的 e^+ 、 π^+ TOF 谱。图 6(a) 和图 6(b) 分别是 371MeV/c 和 279 MeV/c 的 e^+ 、 π^+ 、 p 的 TOF 谱。

从靶到闪烁计数器 S_1 这段飞行距离 L 里, 粒子需要的飞行时间为 $t = L/\beta c$, βc 为粒子的速度。对于动量为 p 的相对论粒子,

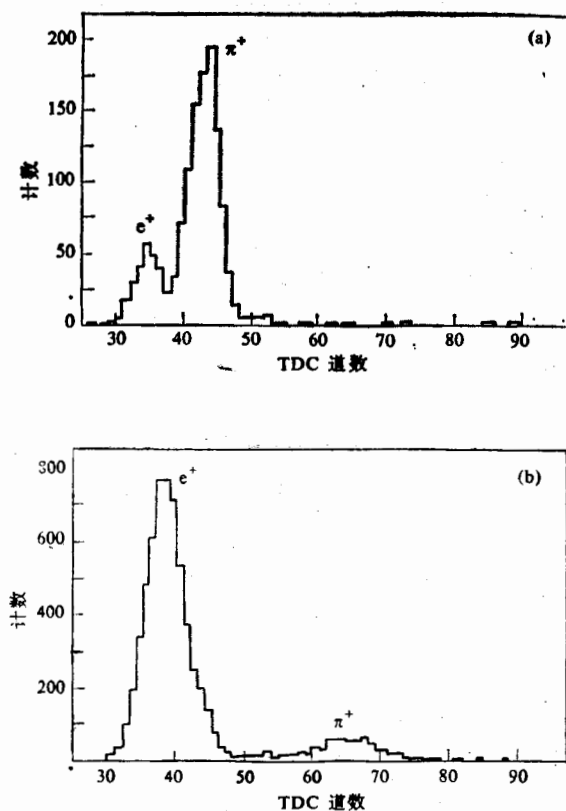


图 5 e^+ 、 π^+ 的 TOF 谱
(a) 371MeV/c (b) 210MeV/c

$$\beta = \frac{p}{\sqrt{p^2 + m^2}} \quad (3)$$

对于动量为几百 MeV/c 而静止质量只有 0.5MeV 的 e^+ , $\beta \sim 1$. 已知 π^+ 的质量为 140MeV, μ^+ 的质量为 105MeV, p 的质量为 940MeV, 可见 e^+ 、 π^+ 、p 的质量差别很大, 相同动量下速度差别也很大, 在 TOF 谱上能很明显地分开这三种粒子, 而 μ^+ 的质量与 π^+ 差别较小, 它们在 TOF 谱上就混在一起了.

从式 (3) 中还可以看出, 随着动量的升高, 几种粒子的速度差别越来越小, 这使得在 TOF 谱上 e^+ 、 π^+ 、p 三个峰逐渐靠近 (见图 6), 在 506MeV/c 动量时, e^+ 、 π^+ 峰已经完全合在了一起 (见图 7).

利用飞行时间谱上 e^+ 峰和 π^+ 峰或 e^+ 峰和 p 峰的时间差 Δt , 可以得到次级束的动量

$$p = \frac{m}{\sqrt{\left(\frac{\Delta t \cdot c}{L} + 1\right)^2 - 1}} \quad (4)$$

上式中 m 取 π^+ 的质量时, Δt 就取 e^+ 峰和 π^+ 峰的时间差; m 取 p 的质量时, Δt 就取 e^+

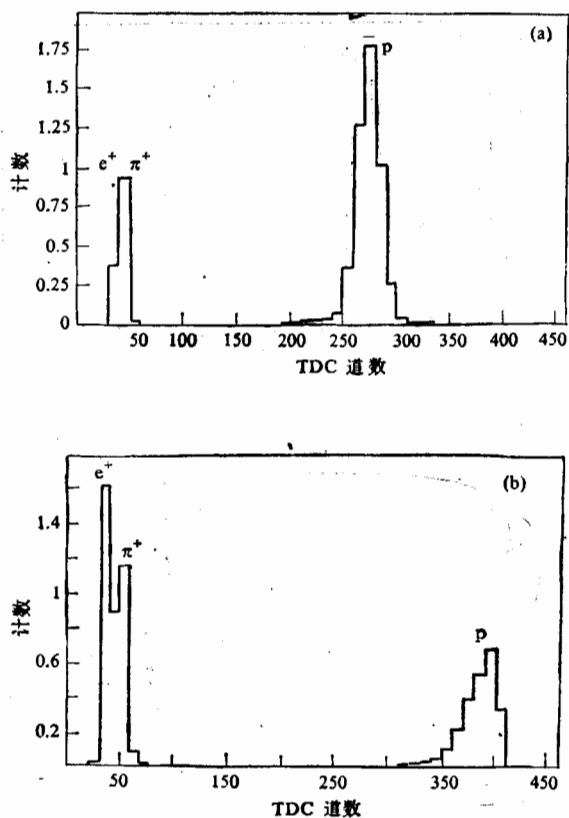


图6 e^+ 、 π^+ 、 p 的 TOF 谱
(a) $371\text{MeV}/c$ (b) $279\text{MeV}/c$

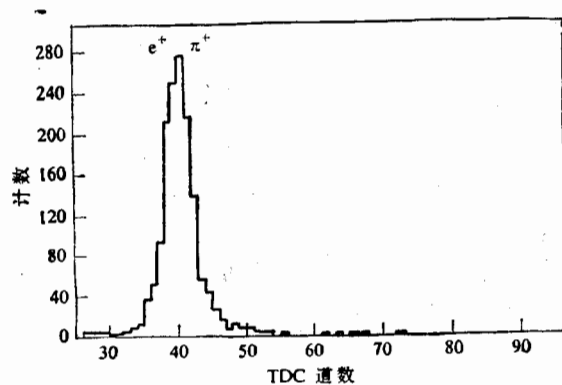
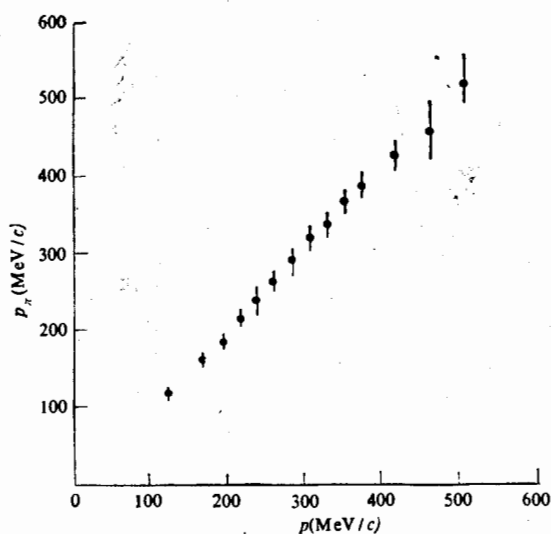
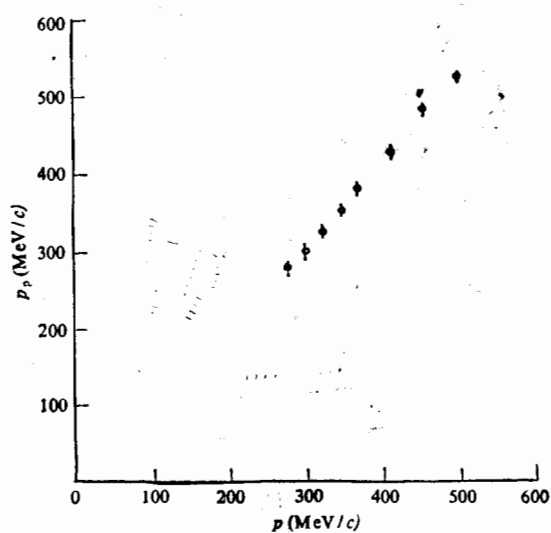


图7 e^+ 、 π^+ 的 TOF 谱 ($506\text{MeV}/c$)

峰和 p 峰的时间差。另外，利用实验中测出的磁场强度 B 也可以通过式 (2) 算出次级束的动量。图 8 和图 9 中分别比较了这三种方法算出的动量，拟合得到的结果如下：

$$p_{\pi} = 1.015p + 0.75; \quad (5)$$

$$p_p = 1.092p - 36.6, \quad (6)$$

图 8 p_{π} 与 p 的比较图 9 p_p 与 p 的比较

p_{π} 表示由 e^+ 峰和 π^+ 峰时间差得到的动量, p_p 表示由 e^+ 峰和 P 峰的时间差得到的动量, p 为磁场决定的动量。

误差分析:

1) 从图 8 可见, p_{π} 的误差随着动量增大而增大。这是由于动量增大使 e^+ 、 π^+ 峰位接近, 而峰宽不变, 因而由峰宽引起的动量误差增大。

2) 公式 (6) 中可见斜率偏离 1 比较远, 同时有比较大的负载距。这是由于在所测的动量范围内, 质子的电离能损比较大。次级粒子是在空气中飞行的, 从靶到 S_1 的飞行距离内质子要损失 10—20MeV 的能量, 而且动量越低损失的能量越多。由此造成了负载

距,而对 π^+ 来说,在所测动量范围内大体都在最小电离值附近,所以这个影响不太显著。

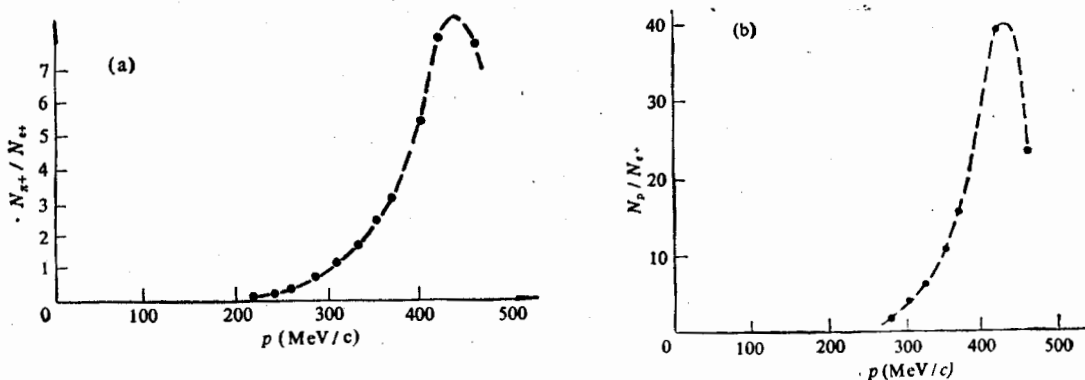


图 10

(a) π^+ 、 e^+ 的相对比例 (b) p 、 e^+ 的相对比例

最后还得到了在不同动量下,次级束中 π^+ 、 p 、 e^+ 成分的相对比例(图10(a)、(b))。图中 N_{e^+} 、 N_{π^+} 、 N_p 分别代表 e^+ 、 π^+ 、 p 的数目。

4. μ^+ 的测量方法、结果及分析^[5]

在前述的实验中未发现 μ^+ ,原因有两个。一是 TOF 的时间分辨不够好,二是 e^+ 数目太多。这两个因素造成 TOF 谱上 π^+ 和 e^+ 峰连在一起,使得 μ^+ 事例被淹没。为了测到 μ^+ ,对实验进行了两个方面的改进。第一,在束线上加入一个阈式 Cherenkov 计数器,使之探测到 e^+ 而对其他粒子不响应,从而用反符合的办法抑制 TOF 谱中的 e^+ 峰;第二,在实验中有意减小初级束的脉冲持续时间,使束团宽度减小到 1ns (BCT 的脉冲宽度),以提高 TOF 的时间分辨。

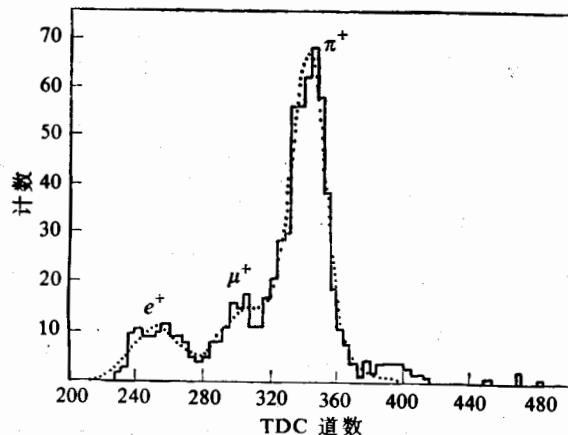


图 11 e^+ 、 π^+ 、 μ^+ 的 TOF 谱 (257 MeV/c, 实测)
虚线为拟合结果

分析磁铁选择次级束的动量为 $257\text{MeV}/c$, 测到了如图 11 所示的 TOF 谱, 谱中左边的峰为被阈式 Cherenkov 计数器抑制后的 e^+ 峰, 右边的峰为 π^+ 峰, 中间的峰即为 μ^+ 峰。

为了进一步证实 μ^+ 峰, 对次级束中 π^+ 衰变到 μ^+ 的过程进行了模拟计算。模拟计算分为两部分: 第一部分是经过分析磁铁选择后的 π^+ 在飞到 S_1 之前衰变出 μ^+ 并被 S^1

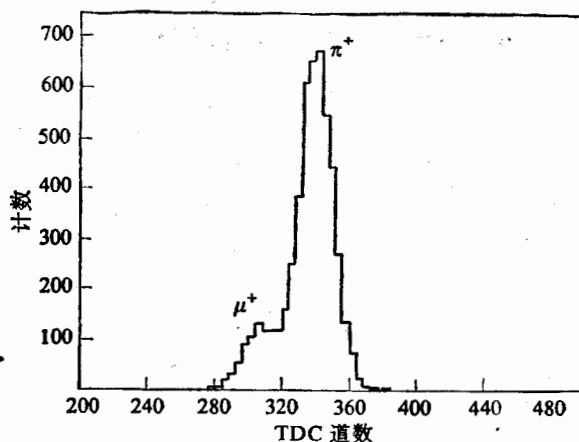


图 12 π^+ 、 μ^+ 的 TOF 谱 ($257\text{MeV}/c$, Monte-Carlo 模拟)

接收; 第二部分是从靶中产生的 π^+ 飞到分析磁铁之前衰变出 μ^+ , 被分析磁铁选择其中动量和方向都合适的一部分进入次级束并被 S_1 接收到。模拟计算的结果见图 12, 图中没有 e^+ 峰 (e^+ 被 Cherenkov 计数器抑制)。

最后得到结论:

- 1) 实验中测到的 e^+ 、 π^+ 峰之间的小峰确实是 μ^+ 的贡献。
- 2) μ^+ 数目与 π^+ 数目的比例为 1:5, 此时动量为 $257\text{MeV}/c$ 。
- 3) μ^+ 峰中主要成分是由 π^+ 在进入分析磁铁之前衰变产生的。

四、闪烁体量能器的辐照损伤实验

高能物理的发展要求即将建造的新一代加速器, 如美国的超导超级对撞机 (SSC) 和欧洲的大型强子对撞机 (LHC), 朝着更高能量和更高亮度的方向发展。这将使运行于其上的探测器面临许多新的挑战, 其中一个重要的挑战便是探测器是否能承受强烈的辐照剂量。 $20\text{TeV} \times 2$ 的 p-p 对撞机 SSC 的亮度为 $10^{34}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$, 10 年的累积剂量在量能器的桶部为 0.6Mrad , 而在端盖最大为 50Mrad ^[6]。世界各国的高能物理学家都在研制抗辐射的量能器, 美国费米实验室的闪烁体加铅或铁的量能器是其中很有前途的一种。我们所做的辐照损伤实验就是为了研究这种量能器对辐照的承受能力。

虽然 SSC 是一个几十 TeV 量级的对撞机, 但产生的末态粒子大部分在几个 GeV 能区, 因此 BEPC 试验束的 1.1GeV 初级电子束是很理想的模拟 SSC 运行情况的辐照源。四个瓦片式闪烁体量能器模块被辐照到 6Mrad 累积剂量, 对每一步辐照剂量, 都测量了在模块的不同断面上的光输出, 从而可了解模块不同部位的损伤程度; 研究了闪烁

体经受 6Mrad 辐照之后的恢复过程;观测了光输出及恢复过程对环境气体——空气、氮气和氧气的依赖关系;还对实验结果进行了理论归纳的尝试。

本实验中辐照剂量的监测是靠 BCT-ADC 流强监测系统。因为 BCT 输出脉冲的大小精确正比于电子通量,把 BCT 脉冲输入 ADC,就可获得束流中电子通量所对应的数字值。IBM/PC 计算机通过 CAMAC 系统读出和记录 ADC 数值,并把它们转换成束流强度和辐照剂量。BCT 和 ADC 都用精密脉冲发生器做过刻度,并用实际束流做过校验。

在辐照过程中,四个待测模块被安置在一个可移动的实验车上。该车可实现远距离遥控。为了使四个模块都能被均匀地辐照,我们使载有四个模块的桌面不断地在水平和垂直方向上来回地匀速运动。每个模块的前面都贴有一张涂有荧光粉的纸,电子束打在量能器上时纸就发光,这样就能够利用工业电视系统监测模块被辐照的情况。

量能器模块在辐照前后性能变化的刻度和测量,是通过一个可遥控运动的放射源实现的。细小的 ^{137}Cs 源直接制作在一个金属细丝前端,源驱动器以遥控方式控制金属细丝的运动,从而把源经由塑料细管和金属细管推入到模块的各个部分。第 5 号模块的第 2 片

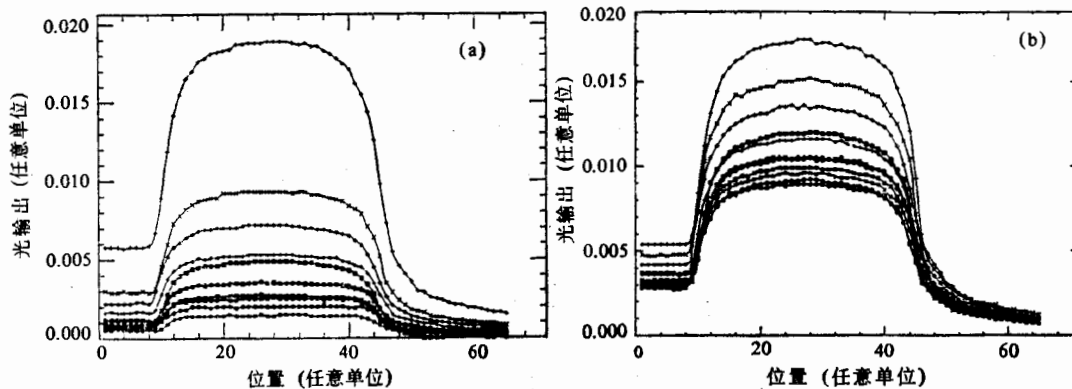


图 13 瓦片不同位置上的光输出

(a) 模块#5,瓦片2,无黑漆; (b) 模块#5,瓦片18,无黑漆

每条曲线相应的累积剂量由上至下分别为: 0.000, 0.300, 0.750, 1.125, 1.500, 2.250, 3.000, 3.750, 4.500, 5.250, 6.000Mrad

和第 18 片瓦片,经不同剂量照射之后,在瓦片不同位置上的光输出如图 13 所示^[7]。

经过大量的数据处理和分析,最后得到以下几点结论:

1) 当累积剂量达 6Mrad 时,该量能器模块簇射极大处的闪烁体瓦片已没有光输出。但经过恢复后,相对光输出可达到辐照前的 22% 左右(空气中)。

2) 在氮气中辐照时,永久性损伤比在空气中略小,但在高辐照剂量状况下不太明显,空气中恢复速度远大于氮气中。

3) 经过 6Mrad 辐照之后,闪烁体瓦片的横向均匀性能满足要求;模块光输出的纵向分布与电磁簇射的纵向能量分布密切相关。

4) 这种量能器完全能够承受 SDC (Solenoidal Detector Collaboration) 探测器量能器桶部 10 年总累积剂量为 0.6Mrad 的辐照。

为试验更耐辐照的闪烁体,并进一步考虑用对不同波长光灵敏的光纤和光电倍增管, BEPC 上的试验束正在准备新一轮辐照损伤实验。辐照损伤的进一步减小,将使该类型量能器不仅能够更可靠地运行于桶部,而且可把它们选作处于更高辐照剂量区的端盖量能器。

在试验束的预制、建造、及随后的物理研究过程中,有关人员做出了不懈的努力。于关键时刻得到了 BEPC 工程指挥部、运行车间、高能所九室、八室等兄弟单位的及时帮助。此外,院、所、室各级领导一贯的关心和资助是试验束各项工作成功的保证。谨在此向各级领导和有关单位表示衷心的感谢。

在此还要特别感谢毛慧顺和王国良两位同志,他们在量能器辐射损伤研究中做出了重要贡献。韩世温、初晓梅同志在不同的时期做了一些具体工作,在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] A. P. Banford, *The Transport of Charged Particle Beams*, E. & F.N. Spon Limited, London, 1966, 28.
- [2] K. L. Brown et al., SLAC-91, Rev. 2, UC-28(1/A), 1977.
- [3] Review of Particle Properties, *Phys. Lett.*, **B239**(1990), III5.
- [4] 徐建国,《TOF 方法测量试验束次级束中正电荷粒子》(硕士论文).
- [5] 谈益平,《BEPC 试验束中正电子本底的抑制》(硕士论文).
- [6] G. Trilling, CCAST-WL Workshop Series Vol. 15, Beijing, Oct. 3-8, 1991, 300
- [7] 毛慧顺等,高能物理与核物理, **16**(1992),

The Test Beam on BEPC and Physics Works on It

LIU NIANZONG ZHANG CAIDI ZHENG LINSHENG HU LIDONG ZHAO XIAOJIAN

ZHONG XUECHU DENG HU ZHU SHANGEN ZHANG GE ZHANG ZHUXIANG

ZHANG LIANGSHENG ZHOU YONGSHEN XU JIANGUO TAN YIPING

HAN SHURONG HAN YING

(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing 100039*)

BAO XIUMIN

(*Institute of Atomic Energy, Beijing 102413*)

ABSTRACT

This paper reports the design and construction of the primary beam of the test beam on BEPC, as well as the acquirement of the positive-charged secondary beam, and the various particles, e^+ , π^+ , μ^+ , p , in the secondary beam have been measured with TOF method and threshold Cherenkov counter. The radiation damage studies of SDC calorimeter modules using the test beam have also been briefly described.