

北京中高能标准粒子试验束流装置

(Beijing-BTF)

李家才

2010.10

- 一 前言
- 二 B-TBF 束流线介绍
- 三 主要设备和性能
- 四 应用研究
- 五 运行开放和受理

一、前言

有高能加速器的地方就有自己的试验粒子束，试验束也称标准粒子束，目前包括是电子、Pion 介子和质子的单粒子束流。试验粒子束流对探测器模型的性能测量和电子学刻度，必不可少。为新型探测器研究开发提供了真实的粒子束流试验，为原创思想和探测器模型进行初试阶段的检验提供了手段。试验粒子靶室辐射环境是多种粒子成分的混合粒子辐射场，为材料科学、农学和遗传学科提供了地面上类似空间宇宙线成分的辐照及辐照损伤研究环境。

高能所试验束作为探测器性能测试的标准粒子束已运行 8 年。早在 1990 年物理一室就完成直线加速器末端引入到 10 号厅（原名：核物理实验厅）的全能量初级电子束线建设，形成了试验束雏形。后来经历了 10 年的维护和相关应用。2000 开始在全所的支持下改造建设，2003 年建成了可用于粒子探测器测试的单粒子(e, Pion, Proton) 试验束流线，及时为 BEPCII-BESIII 子探测器束流试验和电子学刻度提供了测试条件。2007-2010 年在中国科学院重大科研装备项目支持下，试验束提高了束流性能并扩大了应用领域，使它成为了我国对外开放的北京中高能标准粒子试验束流装置和多学科应用试验平台（BTBF）。B-BTF 包括 3 条试验束流线：1 条专门提供打靶来产生慢正电子的初级电子线（E1 线）；1 条全能量（直线加速器输出能量）可变强度的多粒子试验线（E2 线）；另 1 条是全能量电子束打靶后由聚焦型磁谱仪引出的次级单粒子束流试验线（E3 线）。这条单粒子试验线引出确定的粒子能量，具备粒子位置测量和粒子鉴别功能，提供探测器性能测试和相关电子学刻度。基于高能加速器的试验束流装置，多数都是寄生模式运行，不占用主加速器束流应用时间。高能所试验束利用直线加速器给储存环两次注入束流的间隙（同步辐射模式 6-8 小时）开展试验束应用，这也是 BEPC 上直线加速器“一机多用”（储存环注入器、10 号厅试验束）的初衷。10 号厅目前的 3 条试验束流线的应用分别是：

- 1) E1 线成为慢正电子产生和应用的专用束流线；
- 2) E2 全能量电子线上的束流测量刻度和多电子试验，以及电子束打靶产生的靶室辐射环境，用于材料和探测器辐照损伤试验，电子束与低 Z 材料相互作用产生的靶室混合粒子辐射场，为农作物品种及其 DNA 样品辐照变异研究开辟了新的途径，靶前向角上丰富的质子流应用于单粒子效应试验；
- 3) 电子束流打靶后引出一条次级粒子分析束流线是 E3 线，这条分析线提供能量可调的单粒子束，主要应用是为高能探测器研究和原型试验提供试验束流，进行粒子探测器全面的性能试验和检验。

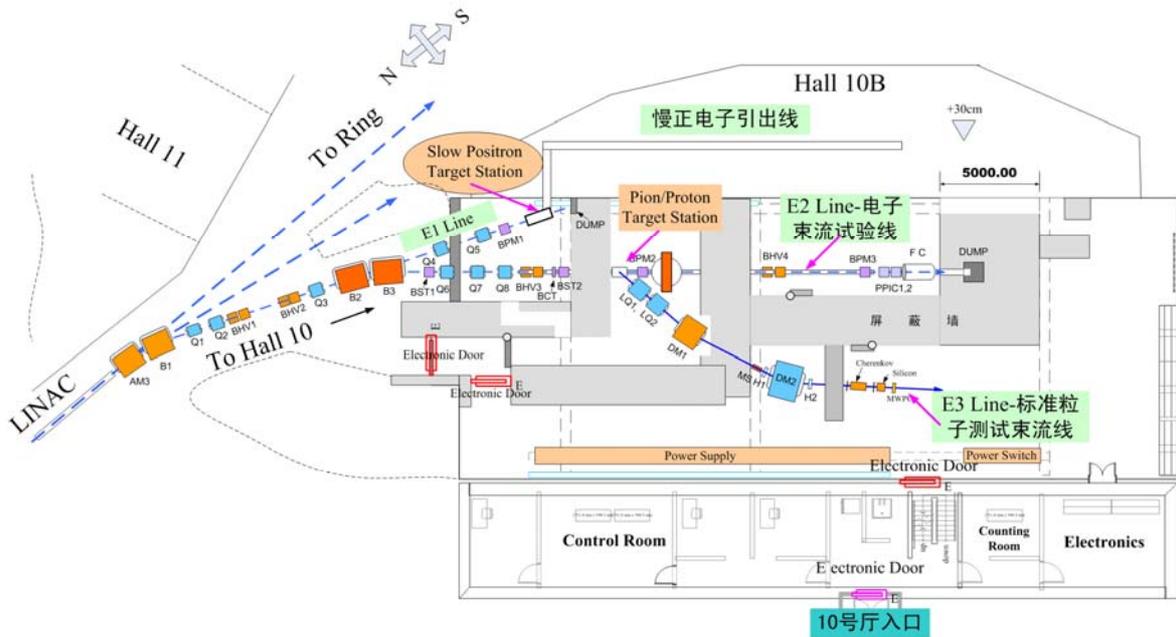
该试验束装置在学生培养方面，也提供了在其它实验上得不到的优越条件。当今一些大型的探测器制造和物理实验，周期都很长，一个学生不可能参加工作的全部，而只是部分的训练。而在灵活的试验束流上学生可以自己设计实验，从探

测器设计制造，到实验调试，取数，数据分析等全过程的实际训练。

目前高能所-BTBF 用户除所内探测器束流试验用户和国外合作项目用户外，还有农科院作物所，中科院遗传所，中国科技大学和清华大学。随着高能所试验束性能不断提高，国内探测器的研究实力也得到进一步加强，在国际加速器技术和探测器技术的合作上更具备说服力。

二、BTBF 束流线介绍

加速器上的试验束有通过‘慢切削引出’来实现（这样本底很小，但花钱太多），或者在储存环内设置内靶，利用边缘束打靶，这样可以很好解决次级粒子多重数问题，也可获得较高的计数率。基于加速器现有的条件，我们从电子直线加速器末端引出电子束流打靶的办法来建立探测器试验束。为了充分利用大厅空间，开辟多条应用束流线。具体的试验束流线布置如图 1。



The Configuration of Beijing-BTBF Upgrade at Hall 10

图 1 实验厅的屏蔽结构和束流线布置示意图

1, E1 电子束流线

原有的电子束流线，是由 BEPC 直线加速器末端经 2 块二极磁铁偏转 22 度，沿相应的束流输运系统进入实验大厅。对这条束流输运线进行的改造，主要是 Q3 下游插入 2 块偏转磁铁 B2 和 B3。所以原有 Q3 和 Q4 分别向上下游移动，间距增加到 557 厘米，以便插入 B2 和 B3。同时 Q5 向下游移动 1.5 米，便于延长打靶距离。这样电子束线由原来的 20.82 米长增加到 22.32 米。这样的结构安排保留了束流线末端透镜组的基本聚焦性能。该线的束流垃圾桶 (DUMP, $0.5 \times 0.5 \times 0.2$

立方米铁块)安装在离 E1 束流出口 3 米远的水泥墙中。目前这条 E1 电子束线已专用于核分析实验室的慢正电子装置。

根据束流线改造对束流输运线结构空间的要求,在保证束流的基本输运和聚焦性能情况下,确定了 E1 线的改造方案和磁铁的空间位置。按已限定的元件排布结构做了束流输运元件参数和束流输运性能的计算,计算结果表明,在 Q5 出口处的束流截面近似为 $2.5 \times 0.6 \text{ cm}^2$ 的椭圆,作用靶(慢正电子产生靶)上入口束流截面近似 $1 \times 1 \text{ cm}^2$,以及束流能散为 0.8%,满足了使用要求。束流线结构和束流包络如图 2。具体参数是: AM3:7028.1Gs; B1:7028.1Gs; Q1:550; Q2:-400; Q3:155.5; Q4:-240; Q5:354.3 (参数对应能量 $E=1.1 \text{ GeV}$, Q 铁场强单位 Gs/cm)。

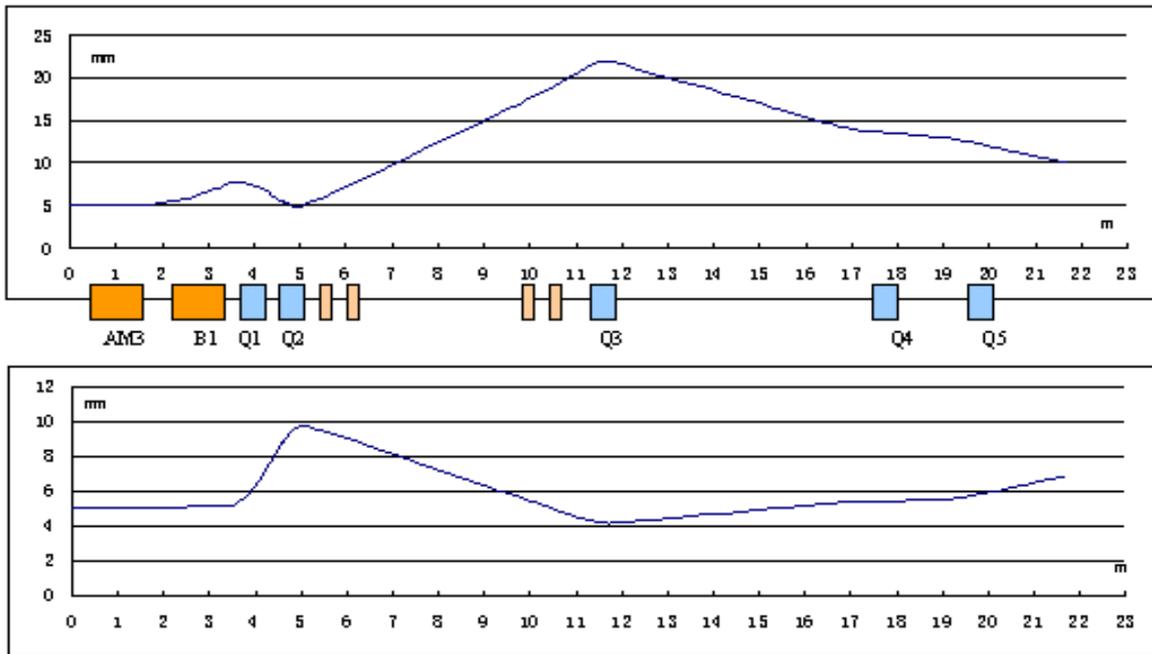


图 2 E1 初级束线结构和束流包络

2, E2 束流线

E1 线上的 Q3 下游插入 2 块偏转磁铁 B2 和 B3,在束流已偏转 22 度的基础上再偏转 18.6 度,使之与实验大厅的东墙平行,成为 E2 束,它距离实验厅东墙 3.5 米,可以方便地引出初级电子束或初级正电子束。考虑应用对束流的要求,在 B2 偏转磁铁下游增加了一个紧凑的 3 元透镜聚焦组^[4]。新增加 3 块聚焦磁铁,改善了束流的输运品质,束流出口近似平行束。束流线结构和束流包络如图 3。具体磁铁设定值如下: AM3:7028.1Gs; B1:7028.1Gs; Q1:550; Q2:-400; Q3:155.5; B2:5932.2Gs; B3:5902.6Gs; Q6:521.4; Q7:-429.6; Q8:143.9 (参数对应能量 $E=1.1 \text{ GeV}$, Q 铁场强单位 Gs/cm)。能散 0.8%。在线束流输运参数调试,出口束流截面达到 $10 \times 10 \text{ mm}^2$ 。另外,这条束流线上的偏转磁铁可以很方便地改变供电极性,以满足电子或正电子选择的要求。E2 束流垃圾桶 ($0.8 \times 0.8 \times 0.9 \text{ m}^3$ 铁块)安装在 E2 束线末端 5 米厚的水泥构件中。

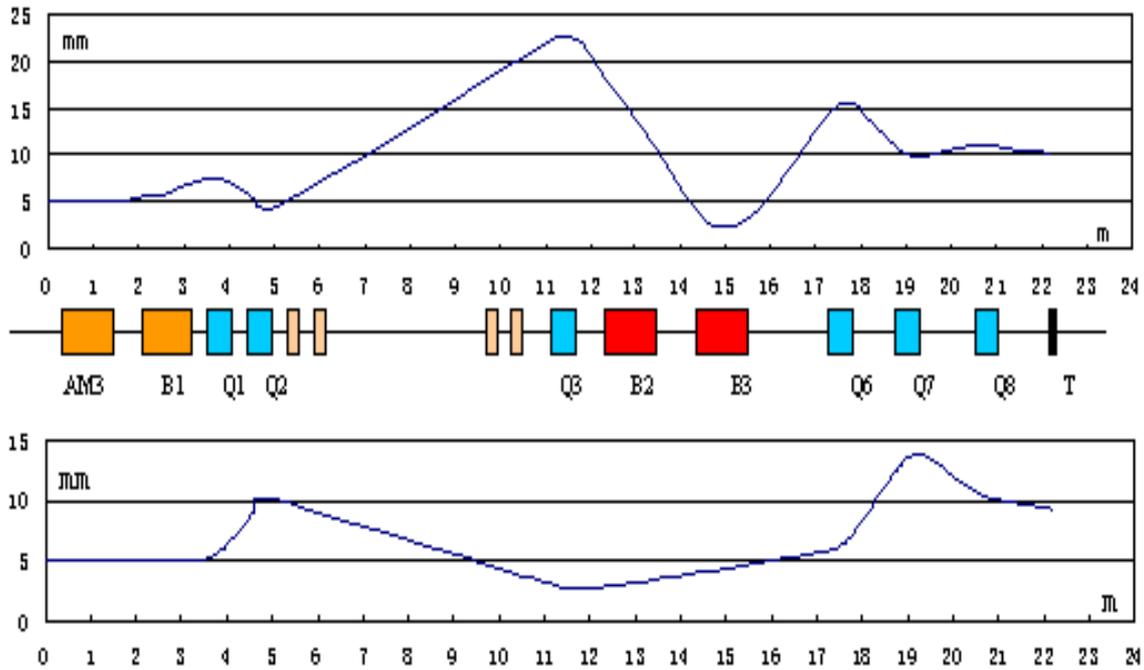


图 3 E2 束流线结构和束流包络

3, E3 试验束流线

从 BEPC 电子直线加速器 (LINAC) 引出的初级电子束, 能量为 1.1—1.89GeV, 脉冲重复频率 12.5Hz 到 50Hz, 脉冲宽度 20pS, 最大峰值流强 500mA。它经分叉后的 E2 束, 引入靶区打靶产生次级粒子 (γ , e^\pm , π^\pm , P , 以及 π^\pm 衰变产生的 μ^\pm 等), 因此, E3 是混合型粒子试验束。电子引出采用钨碳复合靶、铍靶或铜靶, 强子引出 (π^\pm 和质子 P) 采用碳靶或铍靶。这些未经分离的混合粒子, 经过磁铁, 狭缝, 多种探测器组成的望远镜系统的选择, 获得了较低的本底水平; 利用 ‘在线数据获取’ 判选出被测到的粒子的种类, 再配合 ‘离线数据分析’ 分别得到 e^\pm , π^\pm 及 P 等单粒子束。

E3 试验束流线为 2Q2D 结构的磁谱仪系统^[5]。该试验束流道长 16 米, 其中前 10 米为真空盒。主要由磁谱仪, 契伦科夫计数器, 闪烁计数器 SC1 和 SC2, 两个 2 维读出的多丝正比室组成。次级束流截面尺寸由闪烁体大小和狭缝决定, 目前的电子束流试验, 狭缝宽度是 5 厘米时, 聚焦面上的束流宽度为 (FWHM) 5-6 厘米。

三、试验束流线上的主要设备和性能

1, 磁铁

带电粒子通过磁场, 受劳伦兹力而偏转, 所以可根据安装空间, 设计束流运输线的偏转角. 依据场强与偏转角等可知动量大小。所以磁铁既是束流线上必不可少

的设备,也是测量带电粒子动量的有效工具。试验束上使用的磁铁总共 19 块。其中新加工的四极磁铁 1 块,借用 BEPC 工程备用的 50TQ 磁铁 2 块。另外,对 DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron) 早年借用的 5 块大功率磁铁进行了检修,内容包括水路,接线端子,线包耐压实验,极头定位等。在检修过程中,还更换了磁铁的过温测量探头,以及磁铁过温保护连锁。试验束上增加的不同类型磁铁参数列表如下:

表 1 磁铁的参数

磁铁类型	最大磁场 (Gs)	磁铁有效长度 (cm)	备注
Q6 (50TQN)	963Gs/cm	50.4	BEPC
Q7 (50TQA)	882Gs/cm	50.3	BEPC
Q8 (50TQ43)	907Gs/cm	50.4	北重厂
B2 (MC03)	14660	100.97	DESY
B3 (MC01)	14600	100.425	DESY
LQ1 (QD1-2)	1750Gs/cm	53.505	DESY
LQ2 (QD1-9)	1750Gs/cm	53.855	DESY
D1 (BM03)	11000	107.2	检修
D2 (MC02)	14000	124	DESY

2, 屏蔽结构

E1 初级电子束流线末端(靶室内)安装慢正电子产生靶(金属钨: ϕ 30 毫米 \times 15 毫米)。束流出口到靶心 110 毫米,打靶后的剩余束流在 2.5 米远的 DUMP(束流吸收装置)中吸收。根据次级慢正电子引出的结构要求,靶室 1.5 米厚的顶棚预留 ϕ 300 毫米的垂直引出孔。为了有效屏蔽打靶后的辐射,利用蒙特卡洛模拟计算方法进行了辐射本底估计。

为压低 E3 单粒子束本底,我们建立了多道水泥屏蔽墙,并事先通过蒙特卡罗模拟,对各种屏蔽结构的效果进行比较,以选择较好的屏蔽结构,屏蔽结构平面图如图 1。产生靶与实验区之间由 2-3 米厚的水泥墙隔开,蒙特卡罗模拟表明,初级电子束(10^9 电子/脉冲)入射到 11 厘米厚的碳靶上,实验区本底计数为每脉冲 0.11/平方厘米,屏蔽结构满足要求。实时剂量测量表明,当电子束停留在束流垃圾桶(DUMP)中,实验区剂量率接近于天然本底,为 0.14-0.21 μ Sv/h。从实验大厅(BEPC 10 号厅)进入直线加速器隧道的防护铁门附近,其剂量率是实验区的 40 倍左右。剂量率的测量值如表 2(加速器中心防护组提供)。

表 2 实验区实时剂量测量值

测量区域	最大瞬时剂量率 (μ Sv/h)
试验区域	0.21
第 3 靶室南墙外区域	0.15
D2 铁区域	0.14

D2 铁前束线引出口	0.15
第 1 靶室外长走廊中部	0.20
第 1 靶室外入口墙角	3.20
第 1 靶室外距铁防护门 4 米	0.90
第 1 靶室外距铁防护门 1 米	6.30
第 1 靶室外贴近铁防护门（进入直线加速器隧道入口）	13.30

出自试验束运行的辐射安全考虑，进入靶室的门已改造成为安全连锁平开自动门，当 AM3 磁铁加电时（这意味着束流已有可能进入 10 号厅）安全连锁门有效锁闭。连锁信号起点来自直线加速器 AM3 磁铁电源柜，终点到试验束的实验大厅控制室。E2 束流线上的 B2、B3 磁铁电源与大厅门连锁。

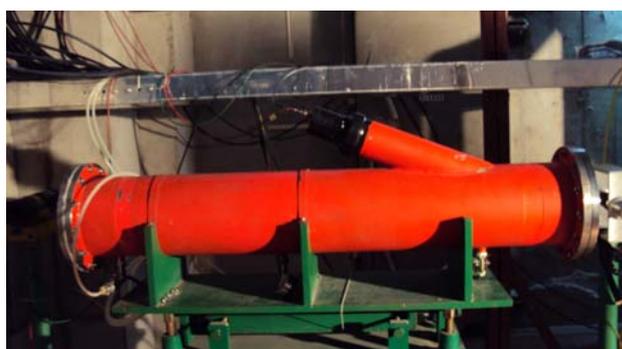
3, 磁铁供电电源及控制

总共 18 套大小功率电源，最大运行总功率为 293kW。大功率电源采用 12 相可控硅整流，数字触发电路和双环控制方案。E1 和 E2 线上的聚焦磁铁和校正磁铁用了较小功率的电源，采用脉宽调制型开关电源。通过大功率磁铁的供电极性切换来实现正负粒子运行方式的切换，这种切换采用了我们早年研究设计的无触点大功率电子换向开关。这种开关简化了功率主回路的设计，降低了造价。实际运行证明开关切换安全可靠。电源的长期稳定性都达到或好于 2×10^{-4} 。束流线运行时，上述控制操作都在控制室的控制台上进行。控制结构是基于现场总线（RS-422/485）方式的电源控制系统。该系统控制磁铁电源开关和调节电流大小，改变束斑大小及位置。产生靶的自动更换，束流强度监测，真空系统的监测，摄像监视，及相应的配套设备等均集中在控制台上。

4, 真空系统与支架

包括离子泵，分子泵机组，气动平板阀，真空闸板阀，真空计，电阻规，电离规等。E1 和 E2 束流线真空度保持在 1.3×10^{-5} Pa，E3 试验束线真空度 1×10^{-5} Pa。总真空管道长 43 米。磁铁和真空管道支架共 40 余台件，其中油压支架 3 台。

5, 主要探测器和电子学



气体阈式契伦科夫计数器（1）

在试验粒子束上，气体阈式契伦科夫计数用于判选电子。其钢桶长为 130cm，内径 21cm。采用 CO_2 作为辐射体，折射率（refractive index） $n = 1.000491$ ，用 XP2020Q 光电倍增管记录契伦科夫光信号，测量给出对电子

的选择效率约为 $(99.0\pm 0.5)\%$ 。实体照片如图

切伦科夫探测器（2）

切伦科夫探测器是高能物理实验中常用的鉴别粒子的有力工具，气凝硅胶作为一种折射率介于固体和气体之间的性能很好的切伦科夫辐射体已经被广泛的应用于众多高能物理实验。为了满足试验束需求，我们研制的阈式切伦科探测器采用了俄罗斯 BINP 生产的折射率为 $n=1.01$ 的气凝硅胶，当带电粒子动量低于 $900\text{MeV}/c$ 时，只有电子才会在气凝硅胶中产生切伦科夫光，由此可以进行电子和其他粒子的鉴别。探测器结构如图 1 所示，辐射体外面包装反射率为 96% 的 Teflon 反射层，两只型号为 XP2020Q 的光电倍增管安放于辐射体侧面做为光探测器件。整个探测器置于密封的铝盒中达到避光、防潮的目的。束流试验结果如图 2 所示，经过分析得出此探测器对电子的探测效率达到 96%。

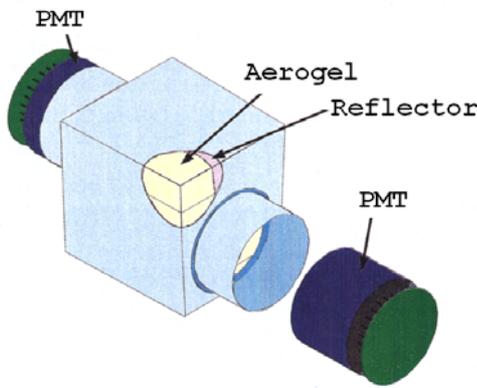


图 1，探测器结构

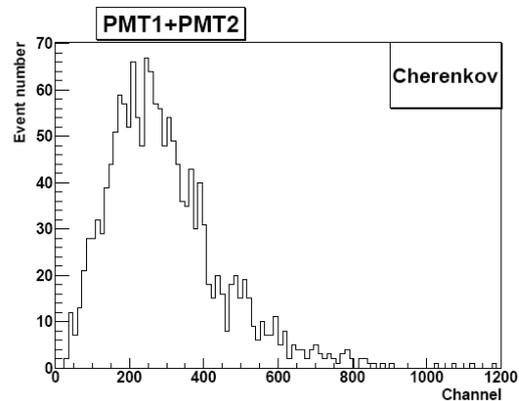


图 2，束流实验结果

硅微条探测器

硅微条探测器用来测量束流的径迹，并提供一定的双粒子分辨能力。它的基本探测单元是硅微条，每个感应区上有 639 个 60 微米宽的硅微条。3 个感应区拼接在一起，构成 $12\text{cm}\times 10\text{cm}$ 的探测层。整个探测器由两个站构成。第一个站由 3 个探测层组成，这样此处的双粒子能完全分辨开来；第二个站由 2 个夹角为 11.4° 的探测层组成，两站结合确定双粒子位置以及束流的向前发散角，使得第二站的双粒子分辨能力大大加强。每个探测层配备一套 CAPTAN 读出系统，共计 9600 路读出。5 套 CAPTAN 通过千兆网络交换机与控制计算机进行通讯。整套系统独立运行，只需要试验束提供一个公共触发信号。

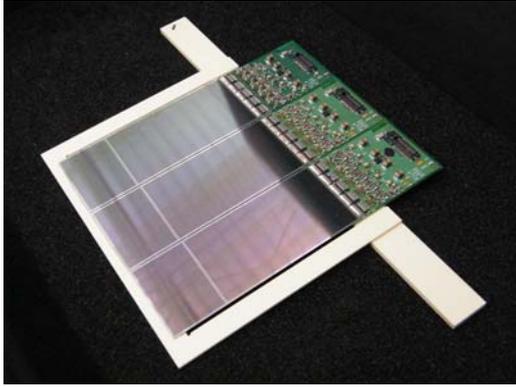
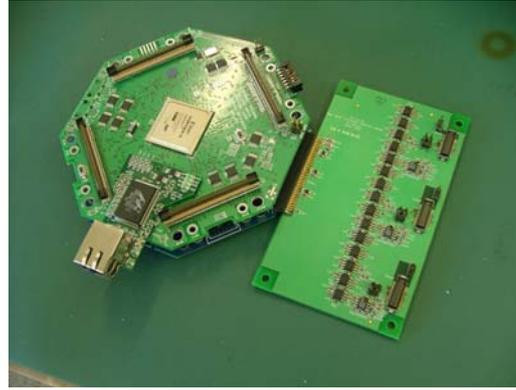


图 Finished Plane



CAPTAN

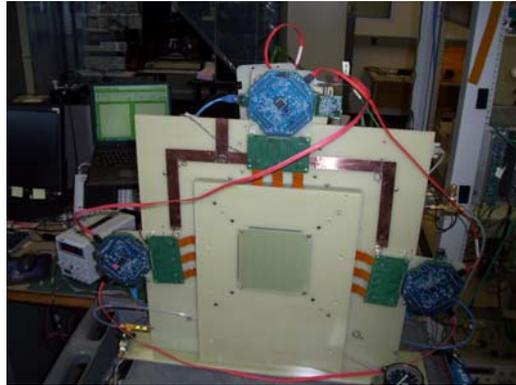
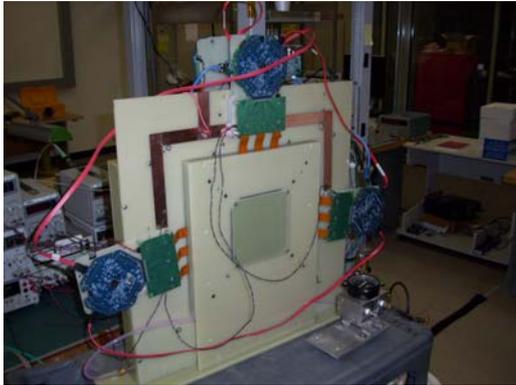
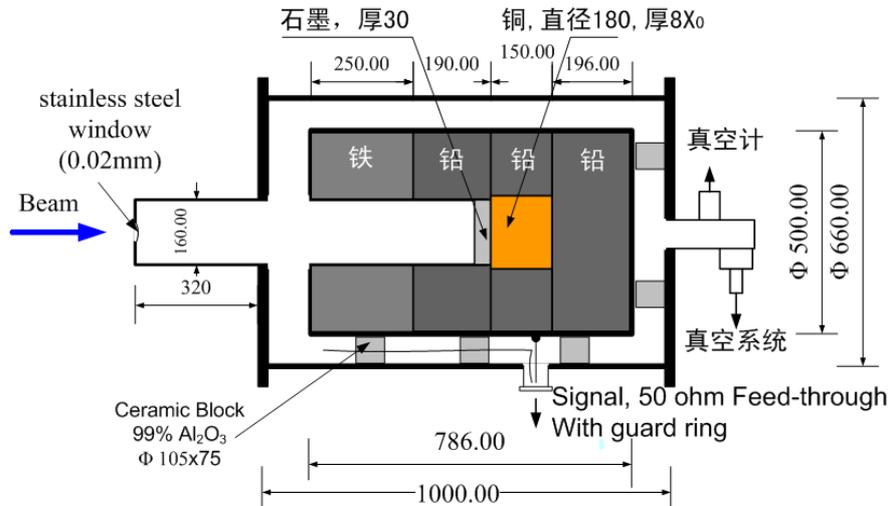


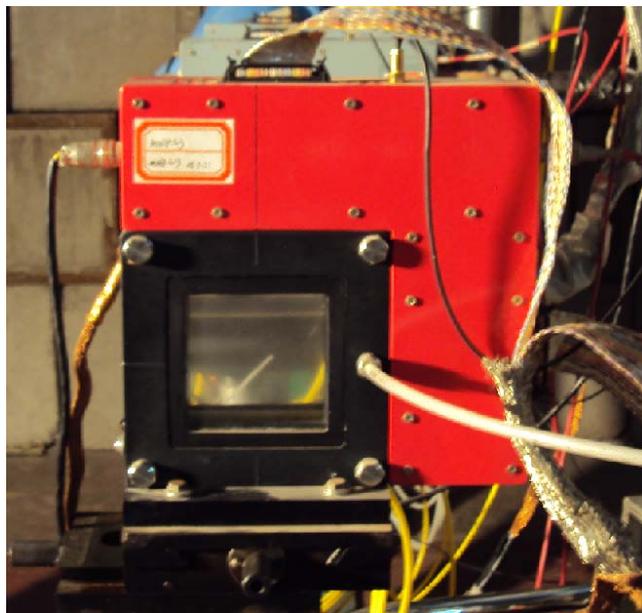
图 Detector at Fermilab

法拉第杯

2008 年高能所试验束装置上配备了用于绝对电荷测量的法拉第杯,它的平均功率对应加速器短脉冲 340W,长脉冲 3.25KW。腔内真空度 10^{-3} 帕,法拉第杯的纵向辐射长度 $43X_0$, 横向 $41X_0$, 总重 2 吨。加速器电子能量 1.89GeV 时内桶电荷逃逸小于 1% (FLUKA 计算值), 暗电流 1-3 皮安培。结构设计如图



多丝正比室 (MWPCs)



多丝正比室用于粒子在 XY 平面上的坐标测量和单粒子事例选择。每个室由 1 个阳极丝平面和 2 个阴极丝平面组成。阳极丝平面有 35 根镀金钨丝 (丝径 $20\ \mu\text{m}$) 并联读出, 每根丝距 2mm。阴极丝 (丝径 $50\ \mu\text{m}$) 6 根并联为 1 个读出条, 条宽 4.2mm, 共 16 个读出条。阴极丝面位于阳极丝面两边, 丝平面间距 6mm。工作气体是 Ar(90%)+CO₂(10%) 混合气, 有效测量面积 5.5cm^2 , 探测效率 $\sim 97\%$ 。固有位置误差 $50\ \mu\text{m}$, 空间分辨率好于 0.4mm。3 个多丝正比室作为描述仪安装在二级磁铁 D2 的下游。

E3 试验束的性能

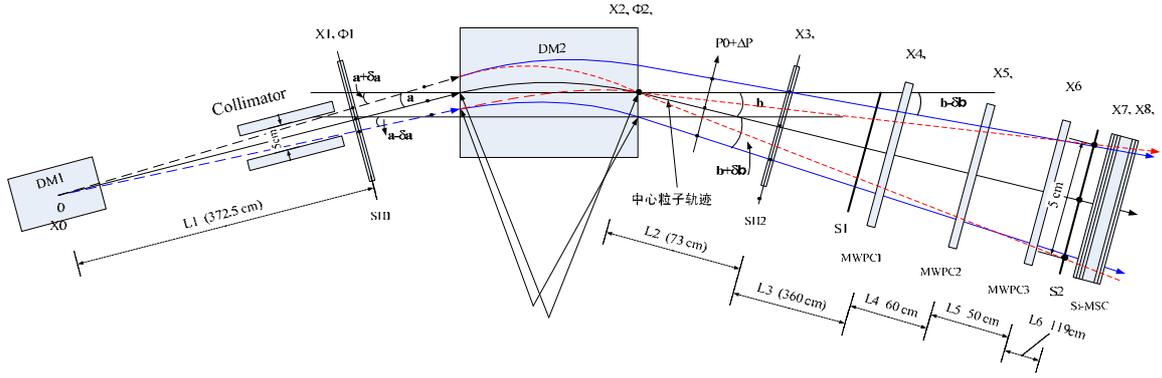
(1) 在线系统简介

E3 试验束的在线系统^[5], 由 PC 机管理控制, 在 LINUX 系统平台上采集数据。数据包括粒子飞行时间和 2 个正比多丝室的 X, Y 平面上的电荷。粒子的选择是通过闪烁计数器 SC1 和 SC2 与契仑科夫计数器, 以及两个多丝正比室 MWPC1 和 MWPC2 构成的五重符合实现的。

闪烁计数器 SC1 和 SC2 用于粒子飞行时间测量和在线束流粗定位。它的时间分辨为 200ps 左右, 每个计数器的效率 ≥ 0.91 ; 气体阈式电子契仑科夫计数器^[7]用于选择电子或强子, 其对电子探测效率为 $(99.0 \pm 0.5)\%$, 配合飞行时间谱将 π 、P 分开; 多丝正比室^{[8][9]}MWPC1 和 MWPC2, 阴极感应读出, 用于单粒子选择和粒子运动方位的确定, 整个在线控制系统对粒子的探测效率为 62%。

数据离线分析主要是多丝室的数据。根据感应条电荷分布以及粒子击中位置等来确定单粒子事件, 根据感应电荷重心法计算得到的空间位置, 重建粒子的飞行径迹。分析程序包括: calccoe (感应条效率计算); calcped (台基计算); analy (分析); fit (径迹拟合)。常规的分析结果包括: 粒子分布 (X, Y), 方向角, 单电荷积分, 散点图等。

(2) 磁谱仪动量及其分辨



聚焦型磁谱仪（2 级色散系统）如图，在动量准直器的下游束流，围绕中心粒子近似平行束。由于磁铁和准直位置误差，以及聚焦磁铁的磁中心与机械中心的偏差，造成束流的单色性变差，如图，在 DM1 磁铁中心出现部分粒子径迹与中心粒子（动量为 P_0 ）径迹交叉现象。下面我们通过几何的方法计算这类粒子在 DM2 磁铁入口和出口的角度（ a, b ），来计算粒子的动量及动量误差。对通过 DM2 二级匀场磁铁的粒子利用下面的粒子动量计算公式：

$$\sin(a) + \sin(b) = \frac{\int B dl}{3.3356 \cdot P}, \quad (1)$$

$$\text{或 } f(B, L_{\text{eff}}, a, b) = p = \frac{B \cdot L_{\text{eff}}}{3.3356(\sin(a) + \sin(b))}, \quad (2)$$

$$\text{角度: } a = a_0 + \Delta a, \quad b = b_0 + \Delta b, \quad \Delta a = \tan^{-1}(x_1 / L_1), \quad \Delta b = \tan^{-1}(x_i / L_i), \quad (3)$$

a_0 和 b_0 为中心动量粒子的入射角和出射角（ $a_0 = b_0 = 12^\circ$ ）， x_i ($i=3-8$) 代表 DM2 下游 6 个 X 平面（垂直于束流的水平方向位置探测平面）位置测量分辨。针对（2）式，由误差传递给出的最大相对误差为

$$\frac{\Delta P}{P} = \left(\frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta L_{\text{eff}}}{L_{\text{eff}}} \right) + \left(\frac{\Delta a \cdot \cos(a) + \Delta b \cdot \cos(b)}{\sin(a) + \sin(b)} \right), \quad (4)$$

其中 $(\Delta B/B) = 1E-4$ ，由 DTM-151 实时测量， $(\Delta L_{\text{eff}}/L_{\text{eff}}) = 4E-4$ 由张力线磁场测量给出。（3）式中的末项由探测器位置计算给出。

根据不同探测器的位置分辨计算 DM2 下游粒子的最大动量误差：

a) 由 SH1 和 MWPC1, 2, 3 参与粒子击中位置测量；

x_4, x_5, x_6 测量值的残差 ≤ 0.4 毫米，位置标准误差 $x_\sigma = \sqrt{\frac{3 \times 0.4^2}{3}} = 0.4$ 毫米，相

关参数代入（4）计算得到

$$\Delta P/P = 0.38 \%$$

b) 只有 SH1 和 SH2 参与粒子击中位置测量；

x1 和 x3 位置分辨均为 1.12 毫米，相关参数代入 (4) 计算得到

$$\Delta P/P = 0.47 \%$$

c) 只有 5×5 平方厘米的塑料闪烁体对束流定位，即 S1 和 S2 信号符合组成束流望远镜系统，并且有 DM2 上游动量准直器宽度值参与计算，相关参数代入 (4) 计算得到

$$\Delta P/P = 2.5 \%$$

(3) 分析磁铁动量宽度

$P_0 = 599 \text{ MeV/c}$ ，(当 $B=0.67189$ 特斯拉， $L=1.2366$ 米，a, b 入射角何出射角均为 12° 时)，

a) 由 SH1 和 MWPC1, 2, 3 参与粒子击中位置测量；

$$\text{动量宽度 } P = \pm 0.38\% P_0 \quad 601.2 - 596.8 \text{ MeV/c}$$

b) 只有 SH1 和 SH2 参与粒子击中位置测量；

$$\text{动量宽度 } P = \pm 0.47\% P_0 \quad 601.8 - 596.2 \text{ MeV/c}$$

c) 由闪烁体定位的粒子

$$\text{动量宽度 } P = \pm 2.5\% P_0 \quad 614 \text{ MeV/c} - 584 \text{ MeV/c}$$

(4) E3 试验束主要性能参数：

粒子种类： e^\pm, π^\pm, p

动量范围：

电子 $100 \text{ MeV/c} - 300 \text{ MeV/c}$

介子 $400 \text{ MeV/c} - 900 \text{ MeV/c}$

质子 $500 \text{ MeV/c} - 1.2 \text{ GeV/c}$

动量误差： $\Delta p/p \leq 0.5\%$

粒子定位误差： 0.4 毫米

计数率： $3-4$ 赫兹

(5) 单粒子判选和位置分辨

a) 次级粒子多重数

从电子直线加速器引出的 1.3 GeV/c 电子束，重复频率 12.5 赫兹（每脉冲 10^9 个电子），这样的电子束流作用到厚靶上 ($> 0.1 X_0$)，其中韧致辐射的最大光子能量接近入射电子的能量^[10]。主要相互作用：

电生和光生强子： $e + p \rightarrow \pi^+ + n + e; e + n \rightarrow \pi^- + p + e; e + p \rightarrow \pi^0 + p + e;$
 $\gamma + n \rightarrow \pi^- + p; \gamma + p \rightarrow \pi^0 + p; \gamma + p \rightarrow \pi^+ + n.$;

其中共振态衰变： $\gamma N \rightarrow \begin{pmatrix} \Delta(1232) \\ N(1440) \\ N(1520) \end{pmatrix} \rightarrow N\pi, N\pi\pi;$

π 介子衰变: $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$, $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$, $\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$; 以及电磁簇射等。

所以 E3 束原本是多粒子混合束, 这里包含的粒子成分如 γ , e^\pm , p , π^\pm , μ^\pm 等。混合粒子飞行时间谱直方图如图 4。不同粒子的计数比如表 3 (最远的探测器离开靶 20 米远)。

表 2-3 (在离开靶 20 米远处测量得到)

动量(MeV/c) (未刻度)	C 靶 $e^+ : \pi^+ :$ p	W+C 复合 靶 $e^- : \pi^-$
400	1 : 0.3 : --	
500	1 : 0.6 : 1.4	1 : 0.1
600	1 : 1.5 : 6.9	

当利用试验束测量探测器对粒子的响应特性时(通常是单个粒子), 如果一个脉冲中有两个或两个以上的粒子, 探测器在时间上无法区分, 形成脉冲重叠, 而误认为是一个粒子。这样就出现了窄脉冲引出的多粒子问题。这也是前面所说的次级粒子产生上的多重数带来的多粒子问题。另一方面, 实验总是希望有较高的计数率。要使实验的计数率不致过低, 又要获得 e , π 等单粒子束, 在窄脉冲多粒子的现实情况下, 除希望尽可能多的单粒子脉冲外, 还由于粒子散射和空间本底的影响, 应用多重符合技术和离线分析的单事例重建是必不可少的方法之一。

b) 单粒子的判选

首先从理论上进行粗略的估计。如果每个脉冲中可能有的粒子数服从泊松(Poisson)分布: 对于 LINAC 的电子束打靶引出 12.5 赫兹的束流脉冲, 在每脉冲时间内(2.5ns 宽度)希望仅有 1 个粒子在测量点得到。因为每脉冲可能有的粒子数服从 Poisson 分布:

$$P(x=k) = \lambda^k e^{-\lambda} / k! \quad (4)$$

λ : 为每脉冲粒子个数期待值; k : 为每脉冲可能的粒子个数

考虑粒子在飞行过程中的散射和介子衰变损失, 取: $\lambda=1, 2, 3$; $k=0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$ 。根据式(4), 当 $\lambda=1$ 时: 每脉冲 1 个粒子的产生几率是 0.368, 至少有 2 个粒子产生的概率为 0.264, 空脉冲的几率为 0.368。考虑多重符合效率(70%), 以及束流输运效率(估计值 75%, 主要是粒子散射), 到达次级束末端, 最大可获得单粒子计数率为 2.25 赫兹, 2 个粒子以上脉冲将有 1.7 赫兹。所以, 有粒子计数的总和是 4 赫兹(计算包括直线加速器的束流频率), 其中单粒子占 56%。这是物理上估计所能达到的最高单粒子计数率。

实验上要实现单粒子的选择, 必须经过在线判选和离线分析。首先是用磁场

选择正粒子或是负粒子（选 e^+ , π^+ , P , 或选 e^- , π^- ），第二步用探测器‘在线’判选。由于阈式契伦科夫计数器只对电子灵敏，与闪烁计数器符合，记录的就只是电子，而反符合，就记录了 π 与 P 两种粒子。第三步，因为质子很重，它比同样动量的 π 慢得多，可依据飞行时间的差别把质子与 π 区分出来，这样原则上就区分开了所有粒子。第四步，进一步利用多丝正比室（MWPC）的空间分辨与电荷幅度分辨本领。因为两个或两个以上的粒子虽然在同一个脉冲中，它们的位置一般是不同的，可以依据在多丝室中不同的击中点来判断。另一方面，两个或两个以上的粒子同时进入多丝正比室，其能量损失（ dE/dX ）比一个粒子大，所以可通过能量损失来分辨单粒子或多粒子。

在测量中应用 $3 \times 3 \text{cm}^2$ 截面的闪烁计数器定位，3 重符合（契伦科夫参与符合选择电子）最大计数率 2 赫兹（ $0.8 \text{GeV}/c$ ）。在线判选的单粒子选择效率（60–70%）接近物理估计值。 5×5 截面的闪烁计数器定位，最大计数率 4–5 赫兹（ $0.8 \text{GeV}/c$ ）

c) 束流中粒子位置的定位精度

通过束流在线测量，得到多丝室的位置分辨能力，从而得到粒子定位的精度。测量方法是在 2 个丝室之间插入第 3 个丝室（左边距离 80 厘米，右边距离 80 厘米），由电荷重心法求出每个室每次击中点位置坐标。取每一次事例在每个丝室上击中点位置数据做线性拟合，再分别求出击中位置坐标相对该直线的残差。MWPC1 和 MWPC2 的击中点的位置残差分布如图 5。运行在 $1.1 \text{GeV}/c$ 电子束引出模式下，这个在线定位 σ 好于 0.2 毫米。取 2 倍的 σ 偏差，束流中粒子的定位好于 0.4 毫米。

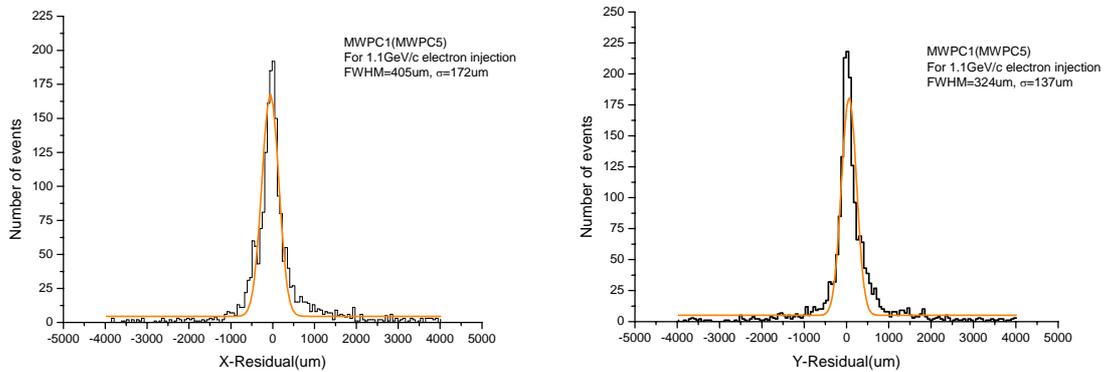


图 5 MWPC1 X 和 Y 方向残差分布

d) 中心动量附近的事例选择

在探测器的束流测试中，一般要知道粒子的入射角，在离线数据分析中根据要求选取满足入射角要求的事例。另一方面，由于粒子在空气和计数器上的散射，造成某一确定动量的粒子位置不确定，或确定位置上的粒子动量分散。例如，D2 磁铁出口粒子沿切线方向飞出，而没有被空气和计数器物质散射，在有限区间内，将是平行束。或者因为散射粒子方向改变，方向角增大并且角分布变宽。根据多丝室 MWPC1 和 MWPC2 位置信息重建得出的粒子方向角分布如图 6（纵坐标为计数，

横坐标为 Tangent 值)。在离线分析中选取束流截面上一定宽度的束流，这样也就确定了动量误差。选取一定方向角以内的粒子，从而降低 D2 下游因散射引起的粒子位置和动量的不确定。

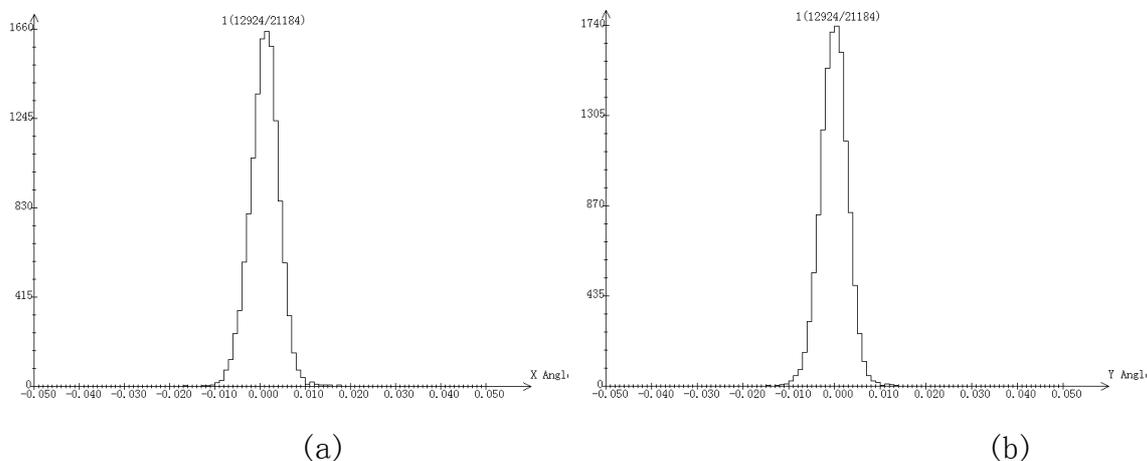


图 6 粒子方向角分布 (030610 数据) (a)水平方向角分布, (b)垂直方向角分布

e) 本底

试验束运行时，利用 5*6 平方厘米闪烁计数器，在束流线末端的束流中心平面上，测量不同水平位置上的本底计数（独立计数），闪烁计数器的阈值为 100 毫伏，本底计数 $N_{pB}=N_{all}-N_B$ (N_{all} : 总计数; N_B : 无束流本底计数)。测量说明离开中心束流线，在 7-22 厘米范围内的本底计数率 0.02-0.05 个每秒，是 3 重符合计数的百分之一到百分之二。这些本底包括光子和各种低能带电粒子。

四 应用研究和用户报告

(1) 2007 前应用研究包括

E1 束流线已稳定提供给核分析实验室应用。束流的出口位置和截面可根据应用要求调节。初级电子束作用到钽靶上，产生慢正电子强束流并从靶站垂直引出。核分析实验室目前已完成了脉冲慢正电子性质的检测工作，束流系统验收指标的测定工作。当加速器电子束流较强时，脉冲慢正电子束流强度实际最高可以达到 $8 \times 10^5/s$ ，直流化后的正电子数量达到 $8.5 \times 10^4/s$ 。在目前的束流状态下，核分析实验室与合作单位完成了 7 组样品的测量工作，系统持续正常运行。

在 E3 试验束上，利用 800MeV/c 的电子，已完成了 BESIII 上桶部 TOF 探测器和端盖 TOF 探测器主要性能测量。如闪烁体的衰减长度测量，不同包装材料的比较，不同规格的闪烁体的时间分辨差异等。目前已获得时间分辨测量的初步结果（闪烁体为 BC408， $5\text{cm} \times 5\text{cm} \times 240\text{cm}$ ，包装材料为纯铝箔），时间分辨率最差点已经可以达到 80ps，可满足 BESIII 设计要求。BESIII-量能器束流试验，MDC 全长模型束流试验等。

利用 E2 束流打靶产生的混合粒子辐射场，进行农作物性状突变研究。该项工作是与中国农科院合作的国家自然科学基金项目。E2 电子束在材料和空气中产生的辐射环境（低能 γ ，低能电子）用于不同材料和探测器的辐照损伤试验。

(2) 2009-2010 年应用研究包括

在试验束改造期间，试验束一边改造一边运行，2009-2010 年用户包括清华大学、中国科学技术大学、农科院作物所、中科院遗传所以及本所内用户。用户报告见附录。

五 运行开放和受理

运行开放和受理，按国际合作惯例，试验束装置向各实验室开放，以提高试验束的利用率。面向全国开放，受理可能的创新试验和应用课题，培植创新研究生长点。为了统一调配运行机时，机时申请受理机构是高能所 BEPC(北京正负电子对撞机)运行协调委员会。