

BEPC 直线加速器分支线改进和 e 、 π 试验束 —— 工程建设与调试测量总结

中国科学院高能物理研究所
实验物理中心试验束课题合作组

2003-07-25

- 1 前言
- 2 工程和设备
- 3 系统调试和性能测量
- 4 计划完成情况
- 5 分工与合作
- 6 应用
- 7 结束语

1 前言

基于高能粒子加速器束流的试验束流线，有直接从加速器引出的初级束流，或初级束流打靶后引出的不同粒子种类的次级束流。这样的束流线在各国大实验室都有几条。他的主要用途是新物理思想和方法的实验探索。加速器的部件性能和束流输运方法研究。新型实验探测器模型性能研究及标准粒子束流试验等。试验束流资源在世界上大型合作的实验研究框架下，提高了它的利用率。它的运行时安排落实，需要提前 2-3 年计划申请。所以说，试验束流线建成后就已纳入世界合作实验研究的框架下。其应用向各大实验室开放。而且根据应用需要，适时安排试验束流维护改造，或者合作建造。另外，试验束流线的建造和应用，是已有加速器束流资源的充分利用。同时也促进了加速器应用水平和运行效率的提高。

80 年代，高能所 BEPC-BES 工程建造，他的一些子探测器需要试验束流进行性能实验和刻度。当时国内没有合适的试验束流提供探测器的束流试验。BES 上一些子探测器的束流实验是在日本 KEK 完成。BEPC 88 年建成运行，到 90 年代，一些新型实验探测器模型性能研究还是要去日本 KEK 做。所以，为了应用方便，KEK 提出要帮助高能所建一条试验束。同时我们也希望有自己的试验束尽快投入应用。在这方面张闯副所长在日本做了前期的可行性研究。原物理一室的张良生同志也做了不同方案的试验束项目申请。由于种种原因该项工作搁浅。1998 年重提试验束建设，2000 年在所长们和一些同志的支持下，实验物理中心的试验束项目获准立项并启动。2001 年 3 月正式拨款建造。试验束装置在 BEPC 上的地理位置如图 1-1。

试验束课题包括 BEPC 直线加速器束流的分支线（10 号厅原电子束流线）改进和 e/π 单粒子试验束流线建造。在 BEPC 运行会统一协调下，以及加速器中心的全力支持，试验束经过 2 年的工程建设，完成预定任务。2002 年下半年开始，部分时间提供 E1 线的束流为核分析室的慢正电子装置打靶试验。一条单粒子试验束(E3 束流线)，已于 2003 年 3 月提供给 BESIII 飞行时间探测器(TOF)原型的初步束流试验。5 月开始 TOF 探测器第 2 轮的束流试验。2003 年夏季 BEPC 停机前圆满完成第 2 轮的束流试验目标。运行取数效率达到 93%。

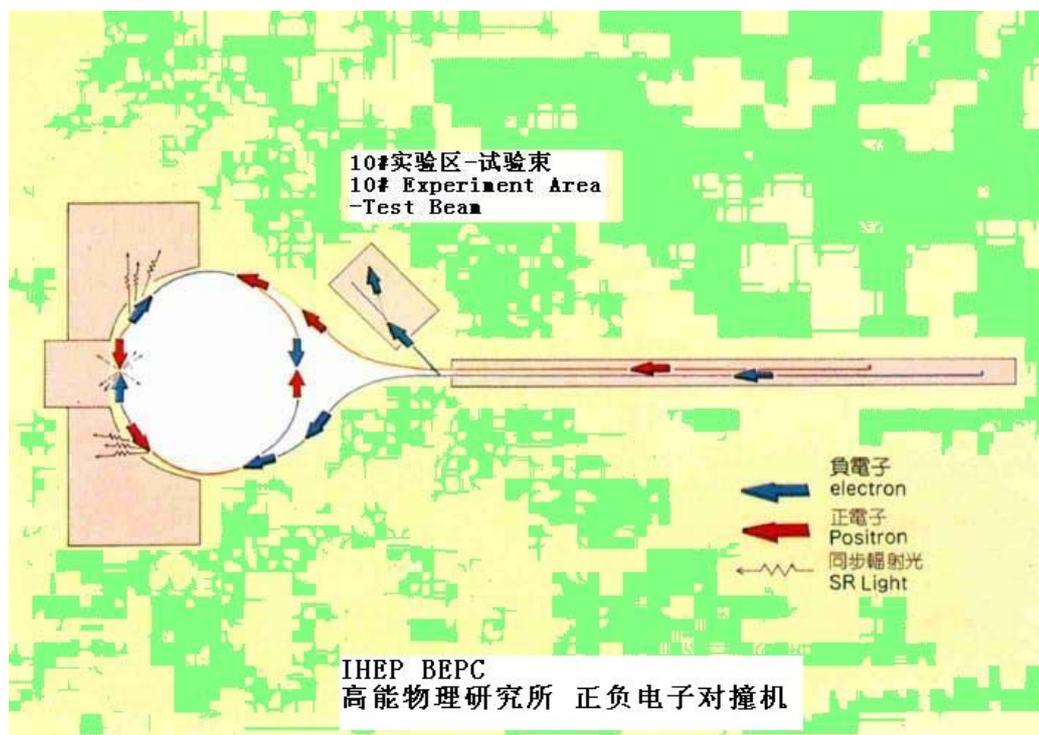


图 1-1 实验区地理位置

2 工程和设备

试验束项目建设包括原电子束线改造，新增加的 E2 束流线和 E3 次级束流线。原电子束流线进行了适当的改造后，专门提供给慢正电子引出的打靶应用，这条线称作 E1 线。新增加了平行于大厅引出的初级正负电子束线，称为 E2 线。利用 E2 线的电子束打靶，引出的次级束，称为 E3 试验束。具体的束流线布置如图 2-1。

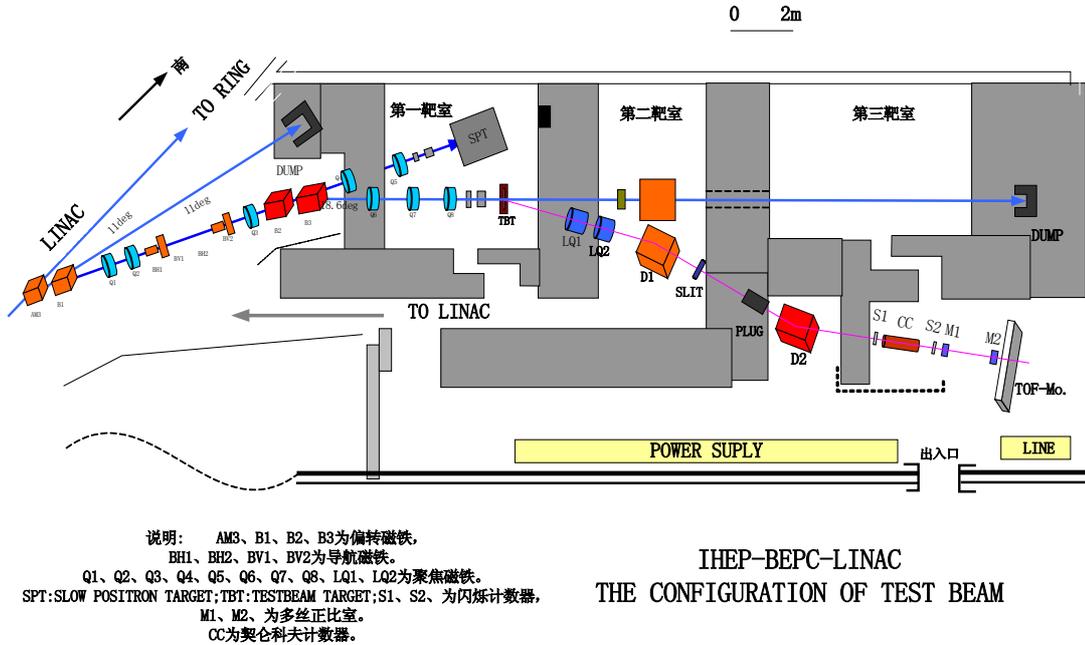


图 2-1 屏蔽结构和束流线布置示意图



2-1 磁铁和磁场测量

(1) 课题启动阶段对 7 块 DESY 磁铁进行了检修，主要工作包括水路，接线端子，线包耐压实验，极头定位等，其中 3 块二极铁，4 块四极铁。有 2 块 DESY 的聚焦磁铁线包与铁扼绝缘电阻是 10 千欧姆，高压表（1000 伏）测量电阻为零。由于电子束线增加，需要补充电子线上的聚焦磁铁 3 块。

其中借用 BEPC-I 工程备用的 50TQ 磁铁 2 块，新加工的磁铁 1 块。在检修过程中，还更换了 5 块大功率磁铁的过温测量探头，以及磁铁过温保护连锁。试验束上使用的磁铁总共 20 块，不同类型磁铁参数列表如表 2-1。

表 2-1

磁铁类型	功率(A·V)Max	Gap(mm)	Weight/BMax
B1(50TB)IHEP	1034 · 8.1	50	3T/1.2Tesla
B2(MC03),B3(MC01)DESY	500 · 43	50	8T/1.46Tesla
D1(BM03)IHEP	480 · 90	120	11T/1Tesla
LQ1(QD1-2)DESY LQ2(QD1-9) DESY	1500 · 159	Ø150	1.7T/1.75KG/cm
D2(MC0-2) DESY	1000 · 86	100	8T/1.2Tesla
Q1--Q8 (50TQ)IHEP	26.5 · 10.6	Ø 50	0.5T/1KG/cm
BH1,2BV1,2(50TB HV)IHEP	18.5 · 5	50	77Kg/600Gs



(2) 磁场测量的一些主要结果如表 2-2 

表 2-2

磁铁类型	最大磁场(Gs)	磁铁有效长度(cm)	备注
Q6 (50TQN)	963Gs/cm	50.4	
Q7 (50TQA)	882Gs/cm	50.3	
Q8 (50TQ43)	907Gs/cm	50.4	
B2 (MC03)	14660	100.97	
B3 (MC01)	14600	100.425	
D2 (MC02)	12000	106.42	
LQ1 (QD1-2)	1750Gs/cm	53.505	
LQ2 (QD1-9)	1750Gs/cm	53.855	
D1 (BM03)	11000	107.2	

2-2 屏蔽结构与辐射测量

01年6-8月进行屏蔽结构施工。结构面积近300平方米，分2个电子束打靶区和2个实验区，每个靶区与实验区由2-3米厚的水泥墙隔开，水泥构件总量920立方米。屏蔽结构平面图如图2-1。M.C.模拟计算表明，初级电子束（ $10E+9$ 电子/每脉冲）入射到11厘米厚的碳靶上，实验区本底计数0.11个/平方厘米*每脉冲，屏蔽结构满足要求。实时剂量测量表明，当电子束停留在第三靶室DUMP装置中，实验区剂量接近本底计数，剂量率为0.14-0.21 μ Sv/h。在靠近直线加速器隧道的10号厅，进入隧道的防护铁门附近，其剂量是实验区的40倍左右。实验区实时剂量测量使用便携式X- γ 剂量率报警仪，测量值如表2-3。详细测量结果见加速器中心防护组2002-2003年3次测量报告。

表2-3

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

2-3 安全连锁

试验束的实验大厅（10#厅）人身安全连锁系统由加速器中心辐射防护组完成，试验束运行负责人直接负责辐射安全。目前靶室1的木门已改造为安全连锁平开自动门。为了保证AM3磁铁加电时，安全连锁门有效锁闭，连锁信号起点来自直线加速器AM3铁电源柜，终点到试验束的实验大厅控制室。E2束流线上的B2B3磁铁电源与第3靶室的水泥门连锁。E3试验束上的分析磁铁D2电源与大厅自动门连锁。

2-4 电源

- 磁铁供电电源总共18套，最大运行功率为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线上的聚焦磁铁和束流轨道校正磁铁等较小功率的电源采用脉宽调制型开关电源。正负粒子运行切换是大功率磁铁的供电电源极性切换，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。具体电源参数如表4-2。

表 4-2

类型	数量 (台)	标称规格 (V/A)	DCCT	稳定度/8小时
B1	1	±1200/15	1500A/10V	≤ 2E-4
B2B3	1	1000/100	1000A/10V	≤ 2E-4
LQ1/LQ2	2	± 1028/112	1100A/10V	≤ 2E-4
D1	1	±500/230	500A/10V	≤ 2E-4
D2	1	± 900/77	1000A/10V	≤ 2E-4
Q1-Q8	8	25/10	--	≤ 1E-3
BHBV1-2	4	±20/8	--	≤ 1E-3

2-4 控制系统

基于现场总线 (RS-422/485) 方式的试验束电源控制系统, 主要设备包括:

- 大电流电源控制器 (14 位 DAC/ADC) 6 套;
- 小电流电源控制器 (双 12 位 DAC/ADC) 6 套;
- 控制 PC 机 1 台;
- 控制台 4 组。

摄像监视系统包括:

- 彩色摄像机(SRC-100AP) 1 台;
- 黑白摄像机 2 台;
- 4 路视频转换器(PIH-200-4) 1 台;
- 5 路控制器(PIH-308) 1 台;
- 监视器(PIH-09,PEONY-37C6-37) 3 台;
- 室内侧装云台(Y3030,JH-125A) 3 台。

2-5 束流测量与控制部件

- 束流荧光靶 3 套;
- 刮束器, 狭缝靶, 束流塞, 旋转靶共 4 套;
- 束流强度测量设备:
BCT, NIM 机箱, CAMAC 机箱, CCU99 控制器,
LINEARFAN-IN/OUT (MODEL 744 PHILLIPS),
DISCRIMINATOR (821), DELAY BOX,
ADC (2249A LeCroy)
PC 机 1 台

2-6 计数器和电子学

- 塑料闪烁计数器 6套;
- Čerenkov 计数器 1套;
- 多丝正比室及前端电子学 3套;

国外订购的机箱和插件:

Name	Model	Number
• CAMAC Crate	OPIMA-860(550W)	1;
• NIM Crate	DS7033(300W)	1
• ADC(32ch.)	C205	2
• H.V. (5000V.)	N470	1
• Fast DISC	N413A	1
• CF DISC	N415A	1
• Delay Line	N107(S)	1
• Delay Line	N108(D)	1
• LOGIC UNIT	81A	1

2-7 真空与支架系统

E1 和 E2 束流线真空度 $1.3E-5Pa$; E3 试验束线真空度 $1E-5Pa$ 。

真空系统设备表 4-3

表 4-3

序号	名称	规格	数量
1	真空管道	$\Phi 48mm$, 扁盒	20 米
	(OCr18Ni9Ti)	$\Phi 70mm$, 扁盒	10 米
2	真空计	ZDF-III	2 套
3	离子泵	L-50	5 套
4	分子泵机组	450L	1 台
5	气动平板阀		1 台
6	真空闸板阀		1 台
7	角阀		5 只
8	电阻规		2 只
9	电离规		2 只

支架系统包括新增和改装支架及系统配套如表 4-4

表 4-4

序号	名称	数量 (台)
1	二极磁铁支架 (油压, 改装)	3
2	四极磁铁支架	7
3	真空管道支架	18
4	计数器支架	5
5	正比多丝室支架	4
6	油压泵	1
7	探测器运动平台 (改装)	1

2-8 设备安装

• 从01年8月开始设备安装，首先Q3-BH2-BV2就位，B2-B3进隧道并准直，Q4-Q5-Q6-Q7-Q8就位准直，真空管道和设备安装。8月29日10号厅与隧道封闭，并开始第一靶室的屏蔽盖顶。9月初磁谱仪磁铁和E3线真空管道就位安装，同时进行的工作还包括电缆敷设，照明，抽风系统，摄像系统等安装，9月28日成功完成全部安装工作。



3 系统调试和性能测量

3-1 E1 电子束流线

10 号厅原有的电子束流线，由直线加速器末端经 2 块二极磁铁偏转 22 度和相应的束流输运系统引入 10 号厅。由于应用和发展需要，对这条束流线进行了改造。原电子束流线改造主要是 Q3 下游要插入 2 块偏转磁铁，束流线上 Q3 和 Q4 分别向上下游移动，空间增长到 557 厘米，满足了 B2 和 B3 安装要求，同时 Q5 向下游移动 1.5 米。这样原电子束线由原来的 20.82 米长增加到 22.32 米。E1 线束流 DUMP 装置 (0.5×0.5×0.2 立方米铁块) 安装在离束流出口 3 米远的水泥墙中。这条电子束流线 (E1 电子束流线) 专用于慢正电子装置 (核分析实验室)。另外，靶位置和 DUMP 安装考虑共用靶室其他设备安装空间要求。束流输运计算根据束流元件参数和元件排布结构，以及束流截面要求来进行输运参数调配和调试，计算结果如图 3-1。具体磁铁设定值计算结果如下：AM3:7028.1Gs; B1:7028.1Gs; Q1:550Gs/cm; Q2:-400Gs/cm; Q3:155.5Gs/cm; Q4:-240Gs/cm; Q5:354.3Gs/cm. 能量 E=1.1GeV, 能散 0.8%, 出口束流截面 10*10cm²。

3-2 E2 束流线

E1 线上的 Q3 下游插入 2 块偏转磁铁，将 E1 束流再偏转 18.6 度并延长至公用靶区。这条新的束流线距离东墙 3.5 米且走向平行，为正负电子束应用提供了方便。新增加 3 块聚焦磁铁，改善了束流的输运品质，满足了平行束的输出要求。束流输运计算结果如图 3-2，具体磁铁设定值计算结果如下：AM3:7028.1Gs; B1:7028.1Gs; Q1:540Gs/cm; Q2:-436.4Gs/cm; Q3:321.5Gs/cm; B2:5932.2Gs; B3:5902.6Gs; Q6:521.4Gs/cm; Q7:-429.6Gs/cm; Q8:143.9Gs/cm. 能量 E=1.1GeV, 能散 0.8%, 出口束流截面 10*10cm²。该束流线末端荧光靶(F03)上束流截面和靶区布置如图 3-3。这条束流线上偏转磁铁供电可以很方便改变极性，满足正电子输运时对磁铁极性的要求。E2 束流线 DUMP 装置 (0.8×0.8×0.9 立方米铁块) 安装在束流线末端 5 米厚的水泥构件中。

图 3-1(a) 初级束线模式 1(E1 Line)水平包络图

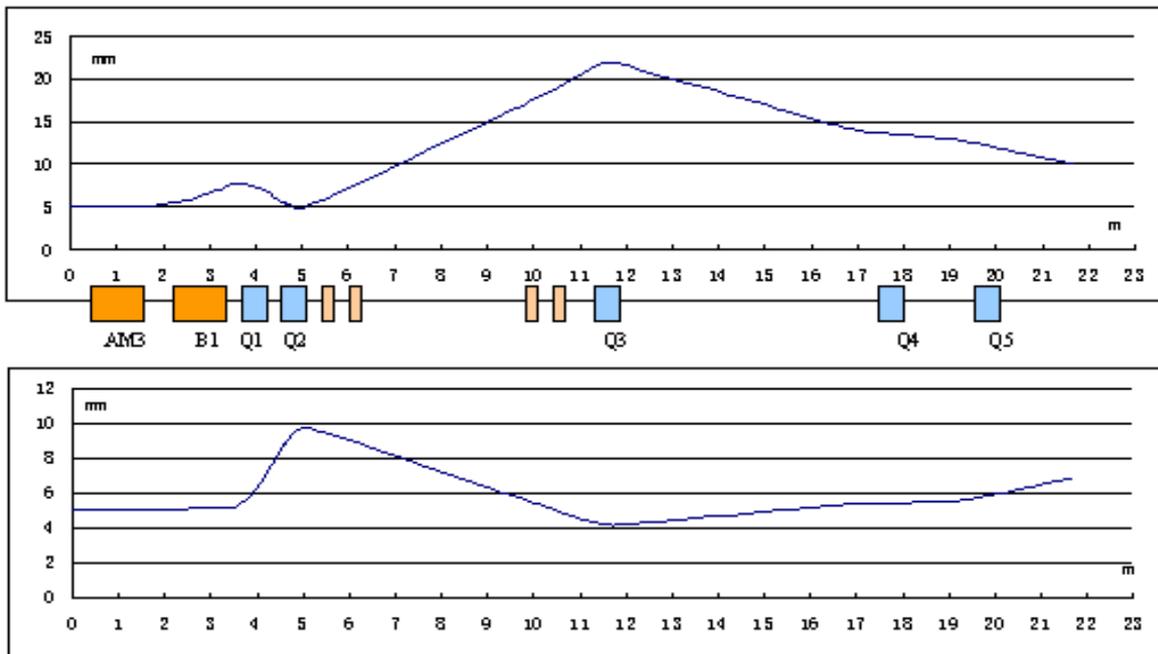


图 3-1(b) 初级束线模式 1(E1 Line)垂直包络

图 3-2(a) 初级束线模式 2 (E2 Line)水平包络图

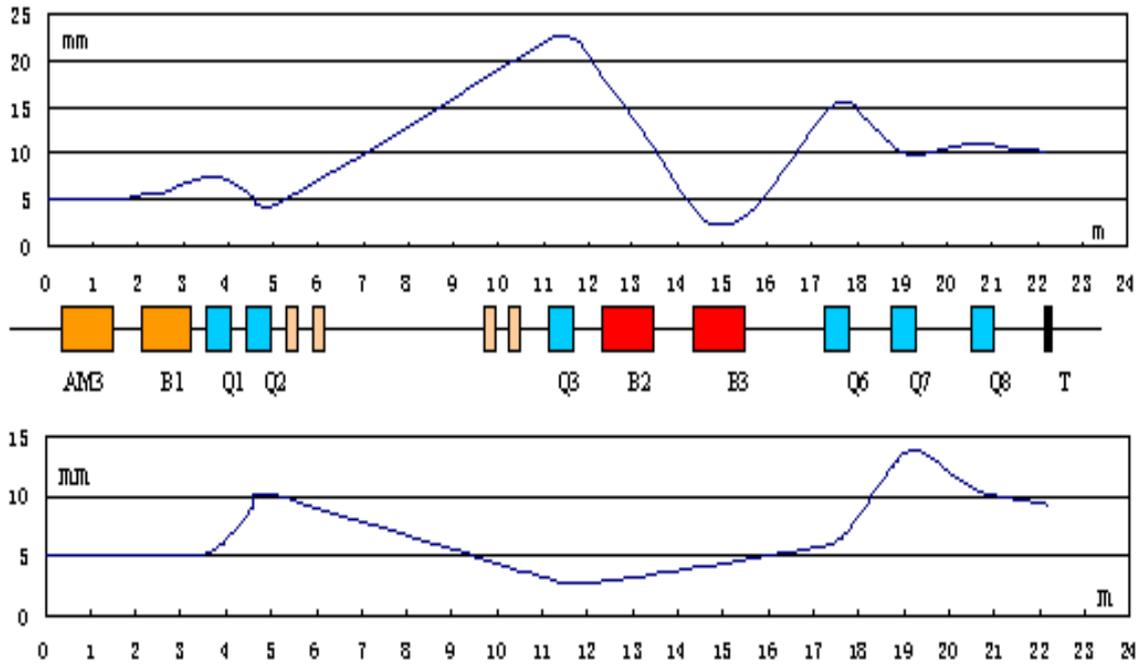


图 3-2(b) 初级束线模式 2(E2 Line)垂直包络图

图 3-3



3-3 E3 试验束流线

3-3-1 概况

从电子直线加速器 (LINAC) 引出的初级电子束 (束流参数如表 4-1), 经由 10 号厅 E2 束流线引入靶区打靶产生的次级束流, 主要的粒子类型由不同的靶来决定。如

电子: 钨碳复合靶, 铜靶;

强子: 碳靶, 铍靶。

次级束流尺寸和动量宽度将由准直狭缝决定, 目前的电子束流试验, 狭缝宽度是 3 厘米, 聚焦面上的束流宽度(FWHM)是 5-6 厘米。

这条未经分离的混合粒子试验束流线，称为 E3 试验束流线。他的原设计结构是 2Q-D-2Q 方式，由于 DESY 的 4 块聚焦磁铁只有 2 块磁铁满足应用要求，2Q-D-2Q 结构缺少 2 块聚焦元件。所以该设计改为 2Q-2D 结构。目前，该试验束流线长 22 米，其中前端真空盒长 10 米。主要有 2Q-2D 形式的磁谱仪，Čerenkov 计数器，闪烁计数器和 2 维读出的多丝正比室（2 套）组成。该束流线的结构安排如图 4-1。该磁谱仪与多数动量谱仪不同，通常希望在聚焦面上有尽可能高的动量色散，来获得较高的动量分辨。由于空间的限制，所以该磁谱仪中的 2 块 D 铁分别向不同的方向偏转，他对粒子输运有一定的消色散作用。束流输运计算程序应用到特定的 E3 试验束上的磁谱仪系统，对参数做了仔细的调试和匹配，计算表明，在 D2 入口处的狭缝上可获得较好的动量选择（参见《BEPC 电子直线加速器的分支线改进和 e/π 试验束的束流输运参数计算》）。通过 D2 前的狭缝控制，以及聚焦面上粒子位置测量和离线选择，获得了较好的粒子动量分辨。

试验束项目设计，建造和调试过程中必要的计算工作还包括一些近似计算和 M.C. 模拟计算。

近似计算利用已发表文章的实验数据以及经验公式估计了不同靶的 π 介子产额（参见《试验束技术设计报告》）。这个计算只是对光生 π 介子产额的估计，没有考虑电子束打靶的电生作用。

GEANT 模拟计算工作包括：

- 电子散射能谱，计算了散射出来的光子，正电子，电子等的动量分布，角分布，强度等，是试验束的实验依据之一；
- 屏蔽结构的初步设计，计算了不同屏蔽结构下束流与本底的动量分布，角分布，强度等，以比较屏蔽结构的效果，是屏蔽施工的依据；
- 屏蔽布局与环境本底的模拟，计算了不同屏蔽布局下信号与本底的不同情况，实测证明屏蔽效果是好的，在引 E1 束的情况下，大厅里的剂量率低于天然本底。屏蔽工作也在 2002 年首先通过了技术检定；
- 试验束次级束传输效率的蒙特卡罗模拟，把次级束上所有的探测器都安实际位置与尺寸放置好，得到的计数与没有这些探测器的计数相比，得到次级束的传输效率约 20%（写成“试验束次级束传输效率的蒙特卡罗模拟”）；
- D2 后屏蔽墙屏蔽效果的蒙特卡罗模拟：计算了 D2 后屏蔽墙在不同位置，不同尺寸时束流与本底的情况以及相应的信噪比等，为屏蔽施工提供了依据，实验证明 D2 后屏蔽墙对于改善 TOF 谱等效果是显著的，也为 TOF 组件的成功测试提供了必要条件（写成 <D2 屏蔽墙屏蔽效果的蒙特卡罗模拟>）；
- 电子通过 6 米空气与 0.1 毫米铁膜时散射情况与能量损失的比较。计算了 200, 400, 600, 800, 1000MeV/c 的电子分别通过 6 米空气与 0.1 米铁膜后的能量损失以及散射情况，为延长真空管道的考虑提供依据（写成 <电子通过 6 米空气与 0.1 毫米铁膜时散射情况与能量损失的比较>）。

目前试验束上的探测器包括有 2 个塑料闪烁计数器，S1 和 S2（3 厘米*3 厘米*0.3 厘米）；阈式电子切韧可夫计数器；2 个多丝室（有效截面 5*5 平方厘米）。这些探测器参与粒子定位，动量选择和符合测量。由于电子加速器束流打靶产生的次级试验束流，有非常高的电子和 X 射线本底，尤其是单电子引出。除必不可少的屏蔽措施外，多重探测器符合测量，对排除本底也是必需的。

表 4-1 电子直线加速器束流参数（现阶段）

能量	1.1—1.5GeV
重复频率	12.5Hz
脉冲宽度	2.5ns
最大流强	600mA

E3 试验束主要性能参数:

混合粒子束 e , π , p

动量范围 电子 200MeV/c---1.2GeV/c (目前 1.1GeV/c)

π 400MeV/c---800MeV/c

p 500MeV/c---800MeV/c

动量误差 $\frac{\Delta P}{P} \leq 1\%$

粒子定位误差 200-400 微米

计数率 0.5-2 赫兹 (改造后的 BEPCII-LINAC 将获得较高的计数率)

Beam spectrometer

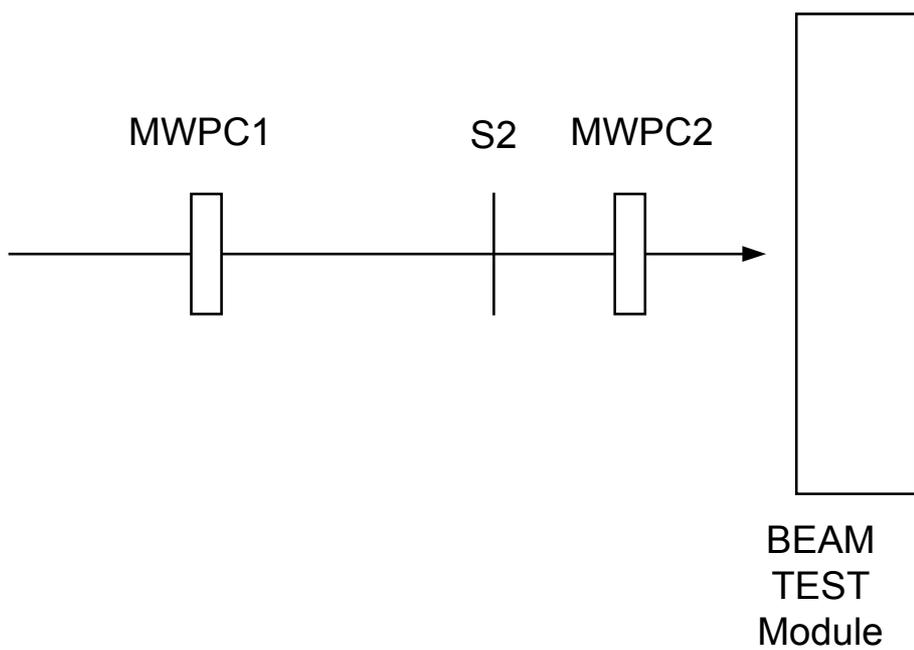
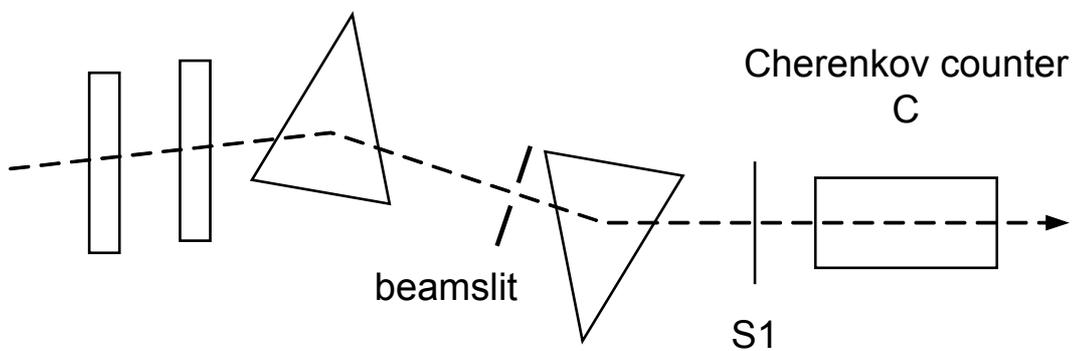


图 4-1 E3 试验束流线结构

3-3-2 动量测量和动量误差

1, 中心动量 P_0 测量

$$P = P_0 + \Delta P, \quad 4-1$$

由磁铁计算动量 P_0 , 带电粒子经过二极均匀磁场磁铁, 满足关系式:

$$P_0 = 0.29979B \cdot \rho. \quad \rho = L_{eff} \frac{1}{2 \sin(\phi/2)}. \quad 4-2$$

上式动量单位(GeV/c), 磁场单位(Tesla), 偏转半径单位(M)。

(1) 磁铁有效长度

磁铁有效长度测量, 是试验束流的动量刻度和动量误差计算的关键参数之一。在 2002 年 10 月 8 日进行了复测。结果显示如图 4-2。

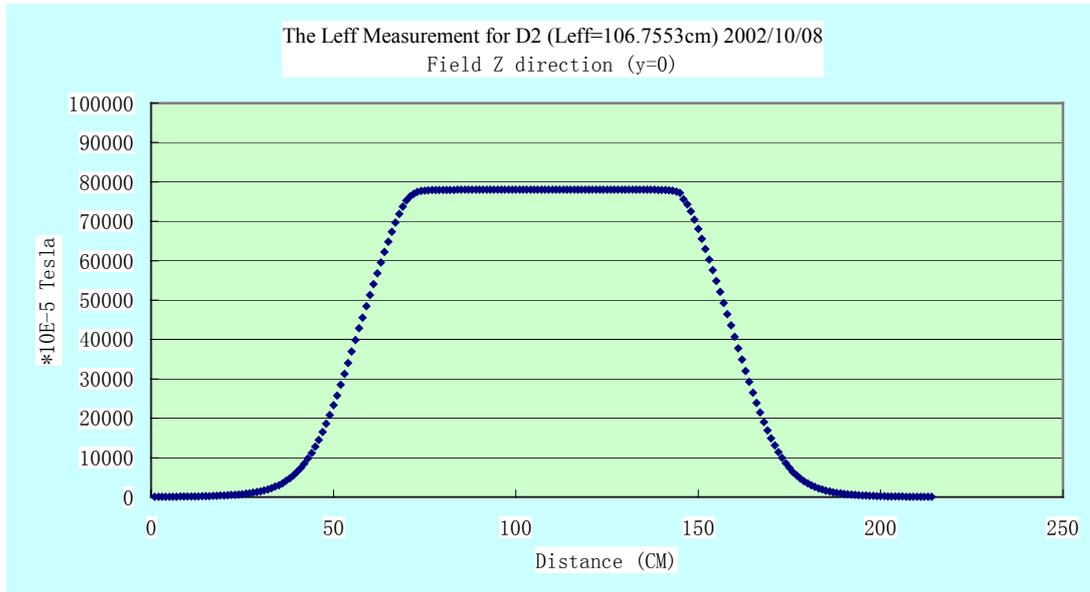


图 4-2 D2 磁铁磁场强度纵向分布

有效长度和误差计算:

$$L_{eff} = \frac{\sum_i B_{zi} Z_i}{B_0}$$

L_{eff} (cm)=106.33_{at+3cm}; 106.42_{at centre}; 106.36_{at -3cm}

(倪淦林提供 2001-04-22, Group3 DTM-141);

$$\Delta L_{eff \rightarrow X} = |106.33 - 106.42| = 0.09$$

2002-10-08 利用新的特斯拉计 Group DTM-151 重新测量。

(DTM-151 与 DTM-141 的测量精度相同,0.01%)

$$L_{eff \text{ at } Y=3.5cm} = 106.7553cm, \quad (2002-10-08),$$

$$\Delta L_{eff \rightarrow Y} = |106.7553 - 106.42| = 0.3353,$$

有效长度和最大误差为，

$$L_{eff,at Y=0} = 106.42$$

$$\Delta L_{eff} = \sqrt{0.09^2 + 0.3353^2} = 0.347$$

(2) D2 磁铁的偏转角测量

参考早期机械上的准直测量，调整束流元件参数，使 D2 下游的束流中心与准直中心线重合，对准地面上的机械准直线，测量 D2 的入射束流中心 ($B_{D2}=0$) 位置，如图 4-3 中 A,B 星点位置的束流截面测量。利用经纬仪在 C 点测量角度 ϕ (角度测量分辨 $2''$)，按 $\phi/2$ 角度核对磁铁的转角，使满足 D2 磁铁偏转束流时的入射角等于出射角。

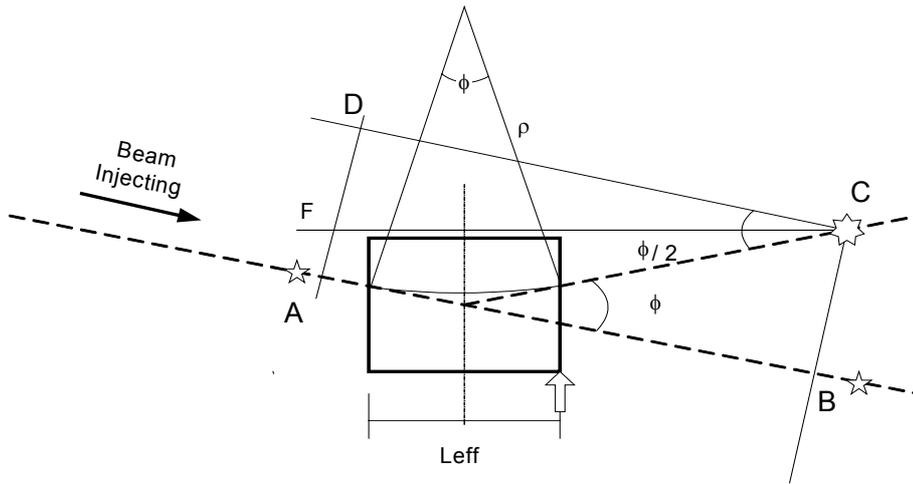


图 4-3 D2 磁铁束流偏转角测量图

束流中心测量方法：在束流调试中，利用 2 重符合的闪烁计数器在 D2 磁铁下游的束流聚焦面上测量束流截面，同样方法在 A 和 B 2 点测量。利用截面参数，通过高斯拟合获得束流中心。经纬仪(精确度 $2''$)测量得到束流偏转角和测量误差计算如下：

2003 年夏天发现 D2 磁铁的偏转角中心偏离磁铁中心，重新做了磁铁中心的调整。D2 磁铁中心调整后，重新测量偏转角 (2003-11-24)。

$$\phi_1 = 143^{\circ}57'40'' - 126^{\circ}23'10'' = 17^{\circ}34'30'' \text{ (第一次测量);}$$

$$\phi_2 = 143^{\circ}57'51'' - 126^{\circ}23'05'' = 17^{\circ}34'46'' \text{ (第二次测量).}$$

$$\phi_3 = 143^{\circ}57'42'' - 126^{\circ}23'07'' = 17^{\circ}34'35'' \text{ (第二次测量).}$$

求 3 次测量平均：

$$\phi = \phi_0 + \Delta\phi = 17.5769^{\circ} + 0.00254^{\circ} \Big|_{Max}$$

2003 年秋季运行期间使用了一组新的 E3 束流线参数，LQ1 与 LQ2 比值为 1.27

将 $\phi_0 = 17.5769^{\circ}$ ， $L_{eff} = 106.42cm$ 代入式 4-2 计算动量。如表 4-2。

表 4-2

P ₀ (GeV/c)	LQ1 (Gs/cm)	LQ2 (Gs/cm)	D1 (Tesla)	D2 (Tesla)
0.3	-146.12	115.15	0.22657	0.28734
0.5	-243.53	191.91	0.37762	0.4789
0.6	-292.23	230.3	0.45314	0.57468
0.8	-389.64	307.06	0.60419	0.76624
1.1	-535.76	422.21	0.83076	1.05358

(3) 动量线性

根据表 4-1，动量与 D2 磁场，如图 4-4

动量线性是由磁铁磁化曲线的线性工作区来保证。线性拟合表明，相对误差都在万分之一附近。

2, 动量误差

磁谱仪中主磁铁 (D2) 的磁场测量误差，磁铁有效长度测量误差，偏转角的准直测量误差等，决定了粒子的动量误差。具体测量方法和动量误差计算如下。

(1), 磁场强度 (B) 测量误差

使用特斯拉计 (DTM-151) 测量 (精度: 10E-4)。

场分布误差如图 4-5:

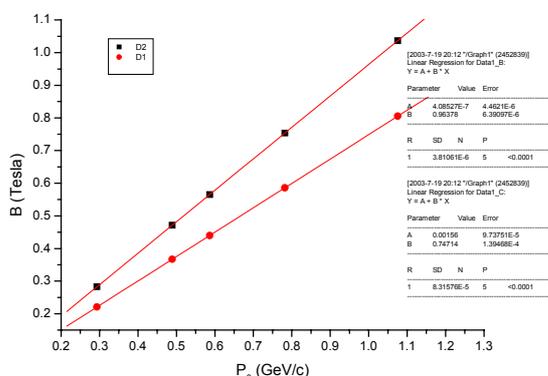


图 4-4

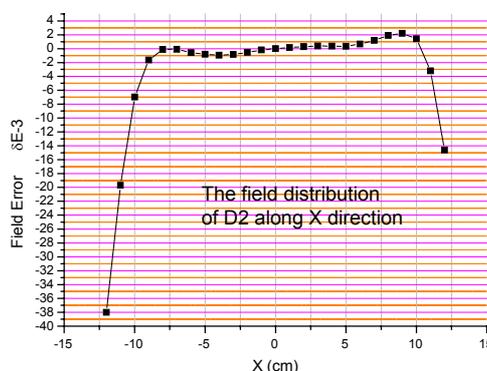


图 4-5 场分布误差

在好场区内 (-8 厘米—7 厘米) 场误差为: $\Delta B/B=0.1\%$,

(2) 动量误差计算

根据以上各种测量误差，计算最大动量误差。根据误差传递得到

$$\Delta P = \left| \frac{\partial P}{\partial B} \right| \Delta B + \left| \frac{\partial P}{\partial L_{eff}} \right| \Delta L_{eff} + \left| \frac{\partial P}{\partial \phi} \right| \Delta(\phi/2), \quad 4-3$$

及

$$\Delta P = 0.29979 \left(\frac{L_{eff}}{2 \sin(\phi_0/2)} \Delta B + B \frac{\Delta L_{eff}}{2 \sin(\phi_0/2)} + B \frac{L_{eff}}{2} \frac{\cos(\phi_0/2)}{\sin^2(\phi_0/2)} \Delta(\phi/2) \right). \quad 4-4$$

最大相对误差

$$\frac{\Delta P}{P_0} = \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta L_{eff}}{L_{eff}} + \frac{\cos(\phi_0/2)}{\sin(\phi_0/2)} \frac{1}{2} \Delta\phi \quad 4-5$$

参数 $\Delta L_{eff} = 0.347$; $\Delta\phi = \left| \pm 0.00254 \right|_{Max} = 4.4 \times 10^{-5} \text{ Rad}$; $\Delta B/B = 0.1\%$, 代入式 (4-5) 计算得到最大相对动量误差为

$$\frac{\Delta P}{P_0} = 0.44\% \quad 4-6$$

(3) 动量为 $P = P_0 + \delta P$ 粒子和粒子散射的动量误差估计:

利用 TRANSPORT 程序, 按所给结构计算了在真空中磁谱仪的束流运输参数。谱仪结构, 束流包络和聚焦面束流色散参数如图 4-5。这种束流运输数值计算表明, 在聚焦面上的 X 方向半宽度小于 10 毫米的截面上, 动量误差小于 1%。在实际调试中, 根据聚焦面上的束流截面和强度测量, 对束流运输参数做了相应调整, 如表 4-2。

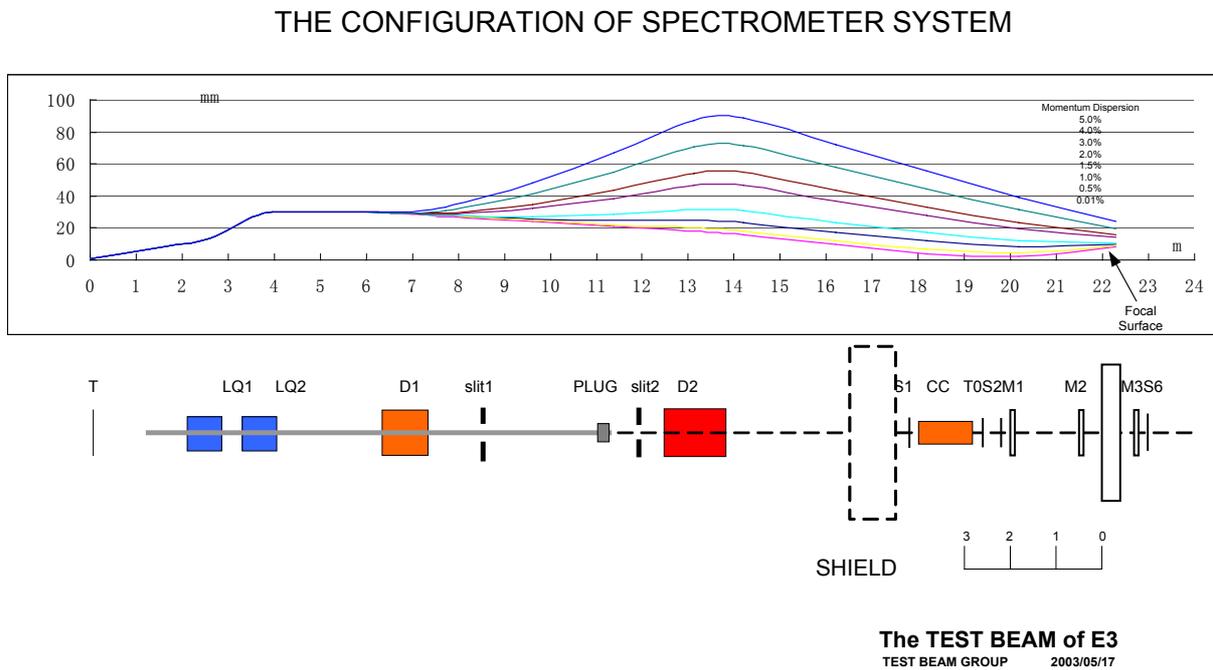


图 4-5 E3 试验束结构和束流包络图

E3 试验束的束流输运程序的动量分析计算给出, 当狭缝宽度为 4 厘米时, 可获得动量色散为 0.5% (在真空条件下) 的束流。实际的束流线从束流塞后直到试验测量点, 非真空段长 11 米。所以, 空气和其他介质上的粒子散射所带来的动量测量误差, 不能忽视。

动量为 $P = P_0 + \delta P$ 的粒子, 在 D2 磁铁中及其上游的空气和真空窗上, 以及狭缝上的散射, 进入磁铁后, 其动量测量误差可由曲率半径的改变来度量, 如 4-4 式。偏转角为: $\phi = \phi_0 + \delta\theta$, 磁铁中有效作用长度为: $L = L_{eff} + \delta L_{eff}$ 。假设, 被末端探测器接收到的散射粒子仍然经过均匀场区。根据 4-3 式, 最大动量误差为

$$\delta P = 0.29979 \cdot B \left(\frac{\delta L_{eff}}{2 \sin(\phi_0/2)} + \frac{L_{eff}}{2} \frac{\cos(\phi_0/2)}{\sin^2(\phi_0/2)} \delta(\theta/2) \right) \quad 4-7$$

这里 $\delta\theta = \Delta\phi$, 最大相对误差为

$$\frac{\delta P}{P_0} = \left(\frac{\delta L_{eff}}{L_{eff}} + \frac{\delta \theta}{2 \tan(\phi_0 / 2)} \right) \quad 4-8$$

为了简化计算，不考虑中心粒子 (P_0) 偏转。利用几何光学方法 (仅考虑 X 平面)，计算包含非平行入射束和散射粒子经过磁铁时的磁铁有效长度和偏转角的改变量。

粒子在狭缝上的散射示意图如图 4-6。被散射的粒子经过磁铁到达下游的 2 个探测器，远端探测器 BD 接收面上的最大接收角示意图如图 4-7 阴影部分。

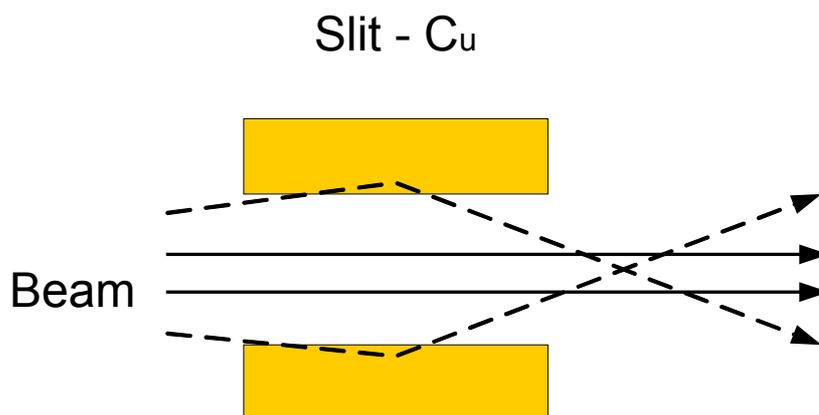
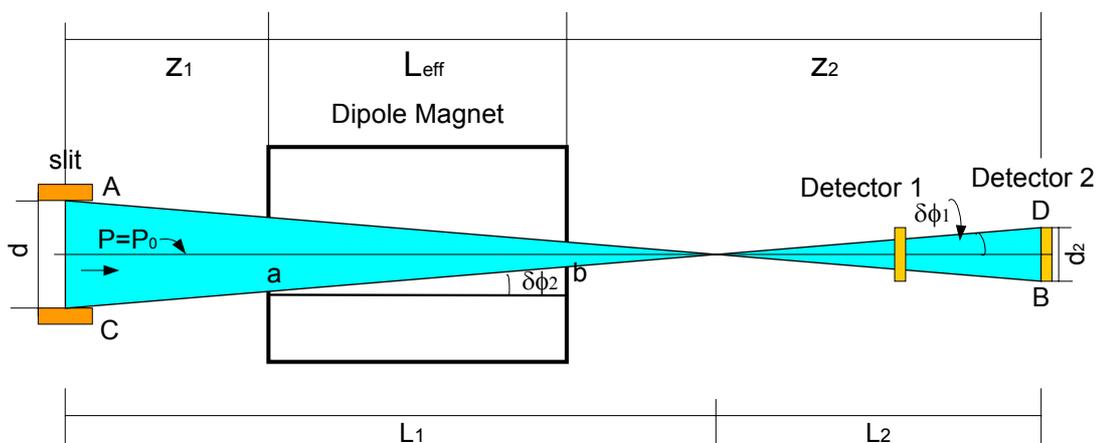


图 4-6



d:Width of The Slit, d2:10mm or 30mm; Z1:45cm, Leff:106.42cm, Z2:799cm.

图 4-7

考虑粒子在狭缝上的散射，狭缝有效宽度的增宽系数¹为： $\xi = \frac{A}{\rho Z^{1/2}}$ (A 为原子量；Z 为原子序数； ρ 为物质密度)。对于铜材料狭缝， $\xi_{Cu} = 1.317$ 。所以，使用的铜材料狭缝有效宽度是 $d_1 = d\xi = 40$ 毫米 (当狭缝宽度 $d = 30$ 毫米时)。根据图示几何关系计算有效长度和偏转角的改变量，得到

$$\delta L_{eff} = L_{eff} \left(\frac{1}{\cos \delta \theta} - 1 \right), \quad 4-9$$

$$\tan(\delta\theta) = \frac{d_1 + d_2}{2(z_1 + L_{eff} + z_2)}, \quad \delta\theta = \tan^{-1}\left(\frac{d_1 + d_2}{2(z_1 + L_{eff} + z_2)}\right), \quad 4-10$$

这里 $\delta\theta = \delta\phi_1 = \delta\phi_2$ (弧度)。式 4-10 说明, 狭缝宽度和探测器的宽度正比于接收角。把 d_1 值和图中标出的距离值代入式 4-10, 得到探测器 X 方向的宽度 d_2 为 10 毫米 (30 毫米, 50 毫米) 的最大接收角是

$$\delta\theta = 0.151^\circ = 2.63 \times 10^{-3} \text{ rad} \quad (3.68 \times 10^{-3} \text{ rad}, 4.73 \times 10^{-3} \text{ rad}) \quad 4-11$$

δL_{eff} 带来的误差非常小, 计算中忽略。4-11 式代入 4-8 式, 得到

$$\frac{\delta P}{P_0} \leq 0.85\% \quad (1.2\%, 1.5\%), \quad 4-12$$

以上结果说明, 减小狭缝宽度或减小探测器的宽度, 可获得较小的动量误差。概括以上计算, 由 D2 磁铁的在线磁场测量值, 给出粒子动量。动量的均方误差为

$$\frac{\Delta P}{P} \leq (0.44^2 + 0.85^2)^{1/2} \% < 1\% \quad (1.3\%, 1.6\%) \quad 4-13$$

1%, 1.3%, 1.6% 分别对应聚焦面探测器 X 方向宽度为 10 毫米, 30 毫米, 50 毫米的动量误差。综合以上误差计算的考虑, 由磁铁给出的动量误差分别是

$$\begin{aligned} \frac{\Delta P}{P} < 1\% & \quad \text{束流中心位置上 1 厘米宽的束流动量误差;} \\ \frac{\Delta P}{P} < 1.3\% & \quad \text{束流中心位置上 3 厘米宽的束流动量误差;} \\ \frac{\Delta P}{P} < 1.6\% & \quad \text{束流中心位置上 5 厘米宽的束流动量误差。} \end{aligned}$$

3, 中心动量粒子的飞行时间 (TOF) 测量

利用质子飞行时间计算中心粒子动量, 是试验束动量刻度的参考方法。在试验束的飞行时间谱 (TOF) 测量中, 利用正电子与质子的飞行时间差计算质子的动量, 从而避免了绝对时间测量中的系统误差。在动量为 511.6 MeV/c (2003-11-03, 14:04 动量谱仪运行数据) 的混合粒子 TOF 谱中, 获得质子与电子飞行时间差 $\Delta T_{pe} (ns) = xc3 - xc1$, 如图 4-8。并且根据这个时间差计算质子动量:

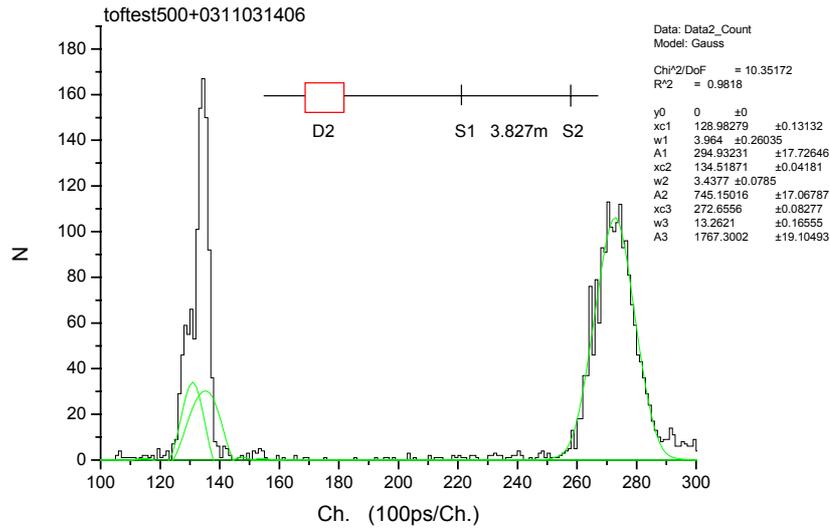


图 4-8

根据相对论关系

$$W^2 = W_0^2 + p^2 c^2 \quad \text{或} \quad m^2 = m_0^2 + p^2$$

$$\text{和关系式} \quad m_p = m_{p0} (1 - \beta_p^2)^{-1/2},$$

因为

$$\Delta T_{pe} = \left(\frac{1}{\beta_p c} - \frac{1}{\beta_e c} \right) \cdot S,$$

即有

$$\beta_p = \frac{S/c}{\Delta T_{pe} + \frac{S/c}{\beta_e}}$$

这里 S 为飞行距离, c 为光速, $\beta_e=1$, $S=3.827$ 米,

根据图 4-3 平均飞行时间谱得到: ΔT_{p-e} (电子和质子飞行时间差) = 14.367(ns), TDC 时间刻度精度 0.5%, $\beta_p=0.47049$, 由下式

$$p_p (MeV/c) = m_{0p} \left((1 - \beta_p^2)^{-1} - 1 \right)^{1/2}$$

得到

$$P_{p \Delta T} = 500.28 MeV/c,$$

由于质子在空气和探测器中的能量损失, D2 磁铁下游的质子飞行时间变慢。飞行时间测量表明, 质子的动量降低了 $\Delta P_{loss} = 511.6 - 500.28 = 11.32 MeV/c$ 。M.C.模拟计算初始动量为 511.6 MeV/c 的质子, 在空气和探测器中其平均动量和平均能量损失, 为

$$\overline{P}_{p \text{ M.C.}} = 500.9 MeV/c. \quad \overline{\Delta P}_{\text{M.C. loss}} = 10.9 MeV/c$$

以上结果表明, 粒子的飞行时间测量和 M.C.模拟计算相互吻合。这种不同方法的测量验证, 仅是参考。在实验室现有条件下, 粒子中心动量值在线刻度由分析磁铁给出。

4, 聚焦面动量谱测量

动量分辨是磁谱仪的主要的性能指标之一。2003 年 6 月 7 日 E3 试验束新一轮调试完成后, 在

聚焦面上分别测量了 3 个动量下的动量谱，如图。

测量条件包括：

- (1) 闪烁计数器 (S1,S2 3x3cm²) 符合计数与打靶流强归一化；
- (2) 没有狭缝限制；
- (3) D2 磁铁下游包含 8.5 米空气，契仑可夫计数器和 2 块多丝正比室。

测量结果如表 4-3

表 4-3 (聚焦条件 LQ1/LQ2=1.29)

中心动量 P ₀ (MeV/c)	FWHM (MeV/c)	动量分辨 (σ/P_0) %
800	22.4	1.19
600	17.6	1.25
400	15.6	1.66

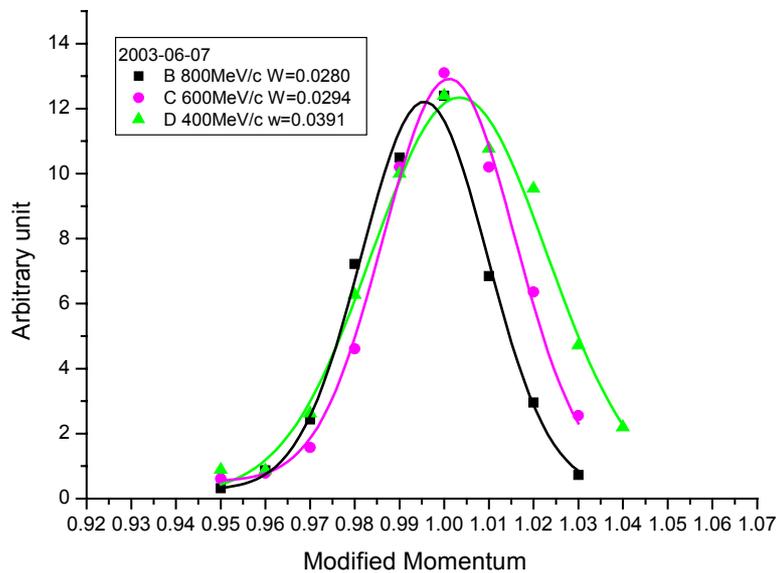


图 4-9

3-3-3 聚焦面束流截面测量

束流截面测量安排，如图 4-11。运动平台上的 2 个闪烁计数器作 2 重符合 (3*3 截面，3 毫米厚，重叠面积 2*3 厘米)，分别在水平和垂直方向做位置扫描，移动步长 1 厘米，测量 500MeV/c 动量的电子在不同位置上的归一化粒子强度 (用 E2 线末端上束流变压器 BCT 信号积分，作归一化处理)，测量结果如图 4-12。运行时的束流截面在线测量是多丝正比室 (MWPC)。试验束的在线数据获取系统纪录 MWPC 的全部原始数据，其中，击中点位置的 X,Y 方向上的束流分布如图 4-13。它代表了每一个取数周期的束流位置分布。

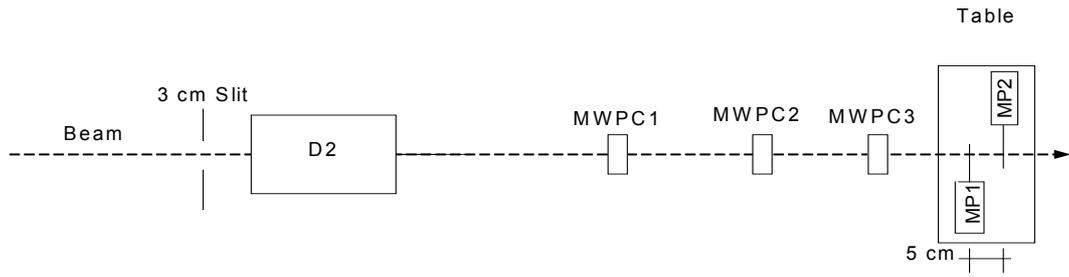
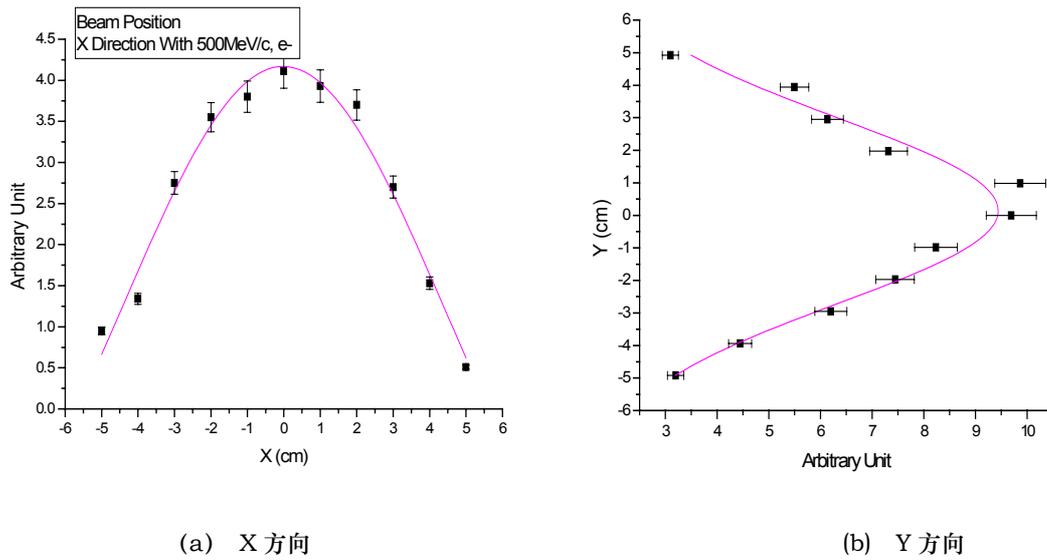


图 4-11 束流截面测量示意图



(a) X 方向

(b) Y 方向

图 4-12 聚焦面上的 500MeV/c 束流截面

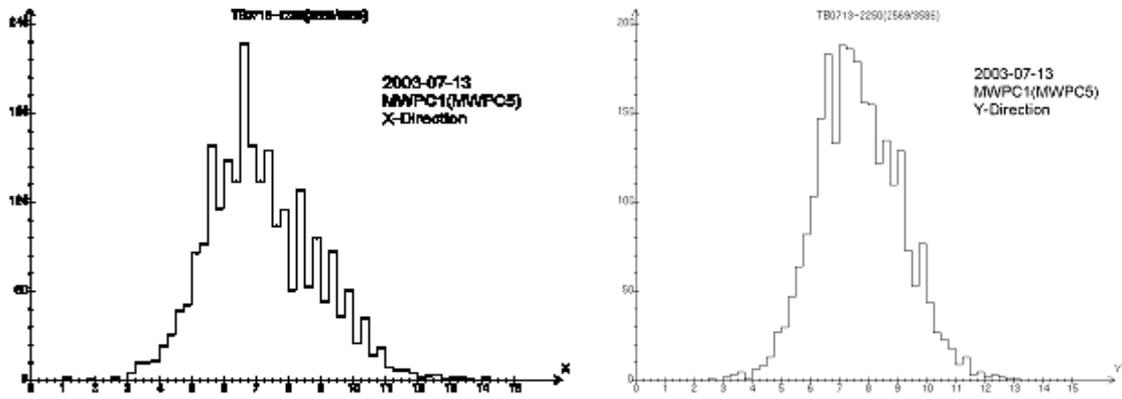


图 4-13 (a) MWPC1 X,Y 方向束流位置分布

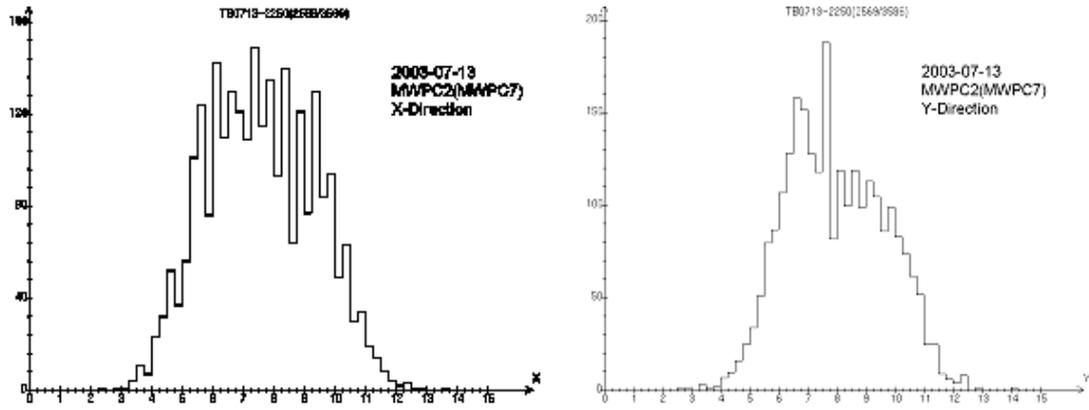


图 4-13 (b) MWPC2 X,Y 方向束流位置分布

3, 中心动量附近的事例选择

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。假设, 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, 因散射使粒子方向角增大, 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 4-14 (纵坐标为计数, 横坐标为 Tangent 值), 以及使用要求, 在离线分析中选取束流截面上一定宽度的束流, 这样也就选定了动量宽度。选取一定方向角分布的粒子, 从而降低 D2 下游因散射引起的粒子位置和动量的不确定。如磁谱仪结构图 4-1 所示, MWPC1 和 MWPC2 安装在准备试验的探测器之前, 相距 1.6 米。这 2 个多丝室联合给出围绕中心动量粒子的位置信息。

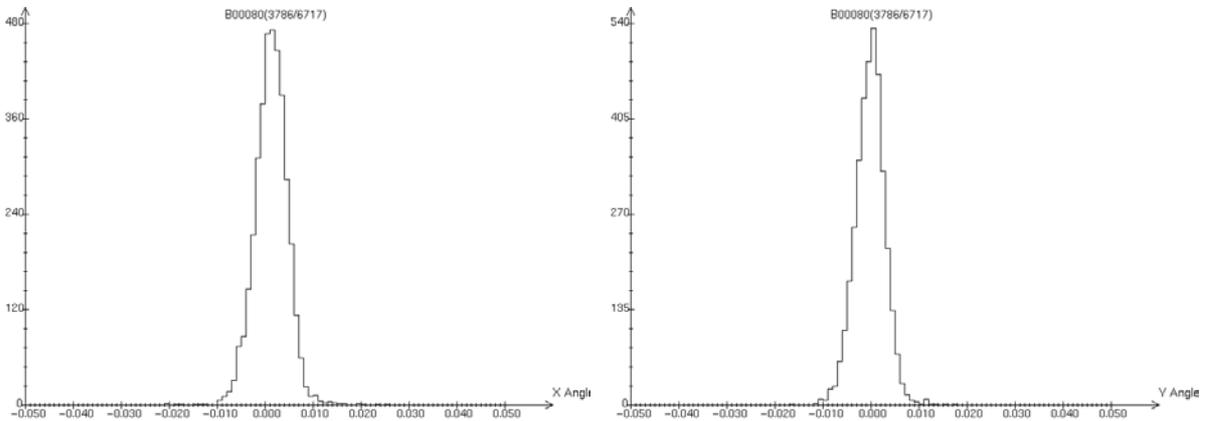


图 4-14 粒子方向角分布 (3*3 平方厘米的束流截面, RUN 号 B00080 数据重建)

3-3-4 单粒子判选与位置分辨

1, 次级粒子多重数

直线加速器引出的 1.3GeV/c 电子束流, 12.5 赫兹 (每脉冲 10^{10} 个电子) 作用到厚靶上 ($> 0.1X_0$), 主要产生有:

直接电生和光生 $e + p \rightarrow \pi^+ + n + e; e + n = \pi^- + p + e; e + p = \pi^0 + p + e;$;
 $\gamma + n \rightarrow \pi^- + p; \gamma + p \rightarrow \pi^0 + p; \gamma + p \rightarrow \pi^+ + n.$

共振态产生与衰变 $\gamma N \rightarrow \begin{pmatrix} \Delta(1232) \\ N(1440) \\ N(1520) \end{pmatrix} \rightarrow N\pi;$

介子衰变 $\pi^{+,-,0} \rightarrow \mu \nu_\mu; \gamma \rightarrow e^+e^-;$
 电子光子簇射等。

因此，由电子束打靶引出的次级束，对获得单电子或介子来说，粒子多重数带来的本底非常大。

2. 单粒子判选

这个试验束的引出是混合束，包含了多种粒子成分，如 $e^\pm, p, \pi^\pm, \mu^\pm,$ 等。混合粒子飞行时间谱如图 4-15。不同粒子比例如表 2-3（最远的探测器离开靶 20 米远）。要实现单粒子判选，首先是在线硬件选择，应用束流线上的阈式 Čerenkov 计数器和 S1S2 符合选择电子或反符合选择质子和介子如图 4-16。而排除质子，还要加上粒子飞行时间的判选条件。应用多丝正比室 (MWPC)，根据粒子击中位置的电荷分布和电荷量 (dE/dX) 等预设的判选条件，选择单粒子。MWPC 作为能量损失探测器 (dE/dX 幅度的 FWHM 分辨 50%)，其单电子和多电子的幅度谱如图 4-17(a)(b)(c)，阴极感应条上的单粒子和多粒子分布如图 4-17(d)(e)。单粒子选择效率 50-70%。

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 符合靶 $e^- : \pi^-$
400	1 : 0.3 : --	
500	1 : 0.6 : 1.4	1 : 0.1
600	1 : 1.5 : 6.9	

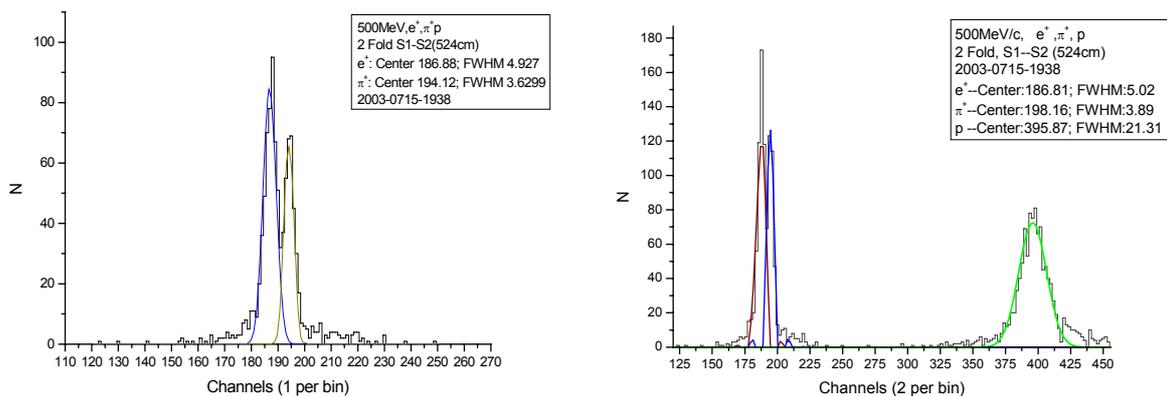


图 4-15 (a) 500MeV/c 混合粒子 TOF 谱 (离线分析时间谱)

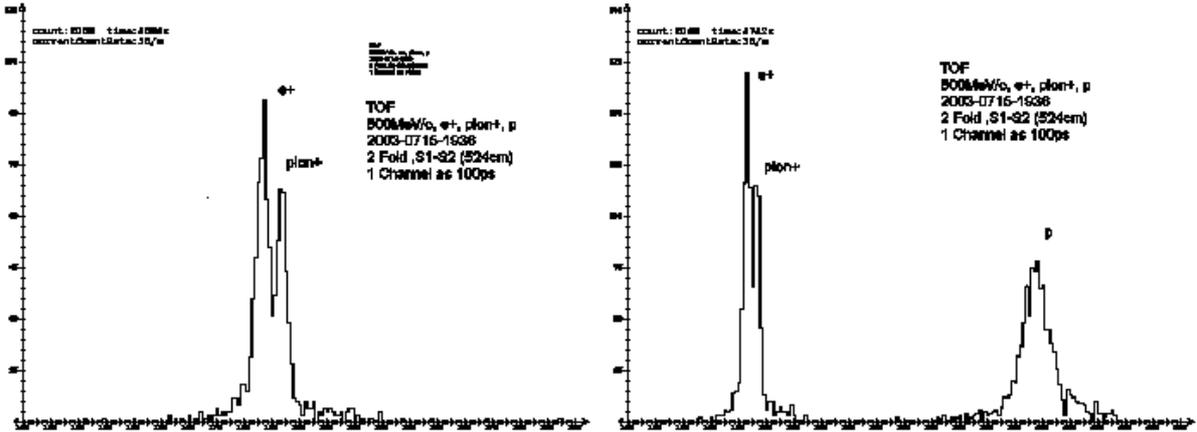


图 4-15 (b) 500MeV/c 混合粒子 TOF 谱 (在线直方图)

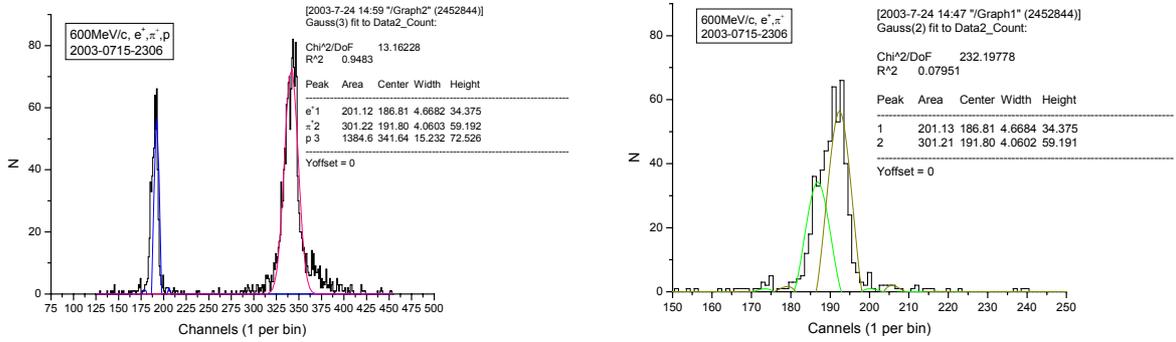


图 4-15 (c) 600MeV/c 混合粒子 TOF 谱 (离线分析时间谱)

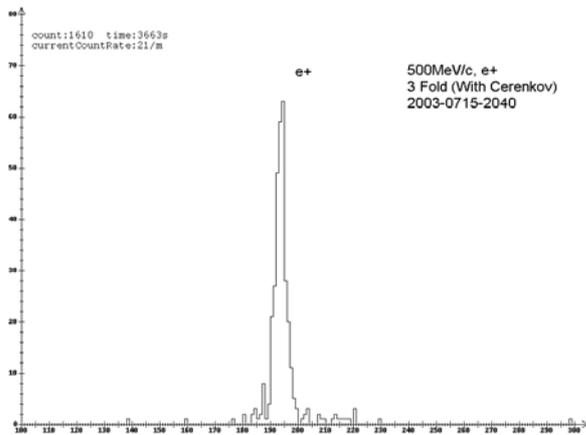


图 4-16 (a) 500MeV/c 在线电子 TOF 谱

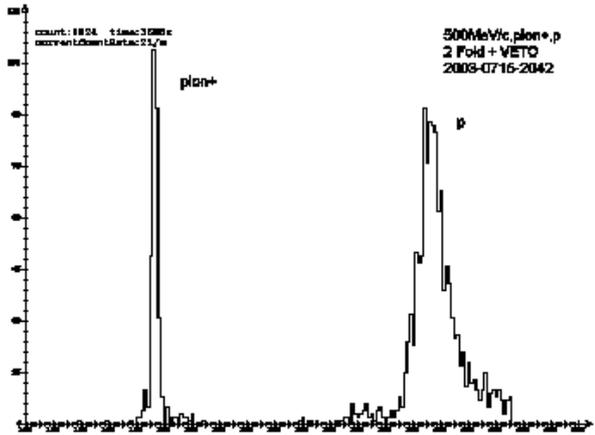


图 4-16 (b) 500MeV/c 在线强子 TOF 谱

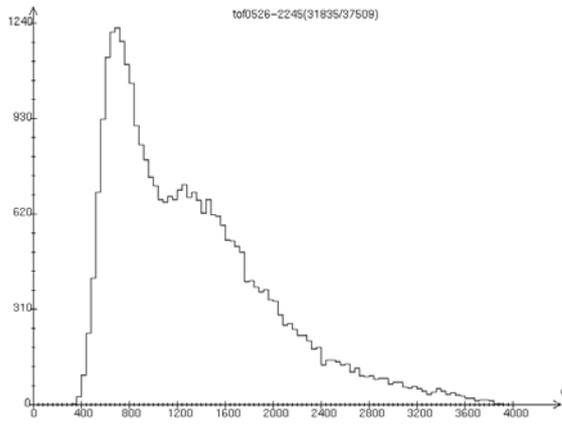


图 4-17(a) 多电子幅度谱(第 1 个峰对应单电子)

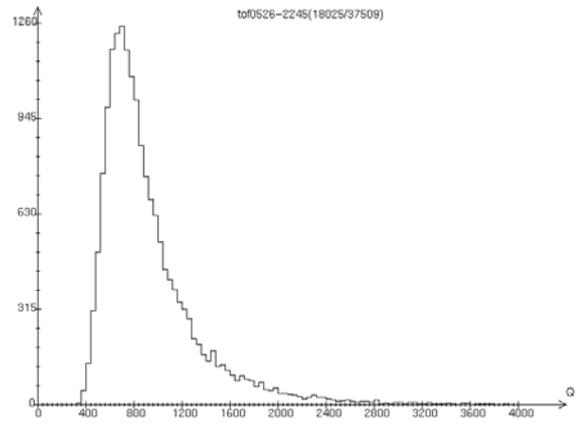


图 4-17(b) 单电子幅度谱

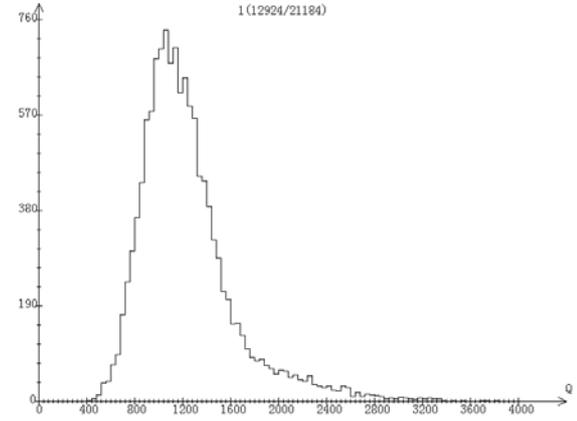
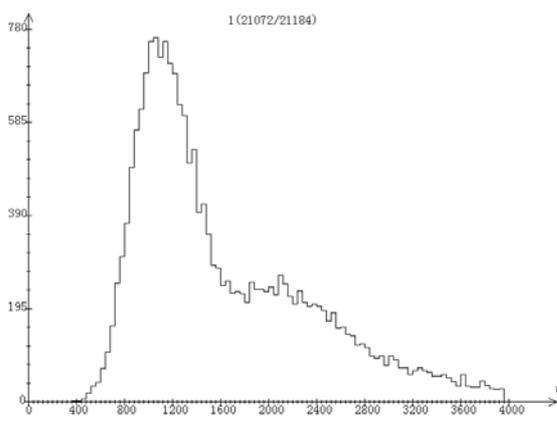


图 4-17(c) MWPC1(MWPC5) 绕 Y 轴旋转 10 度的多粒子 dE/dX 分辨

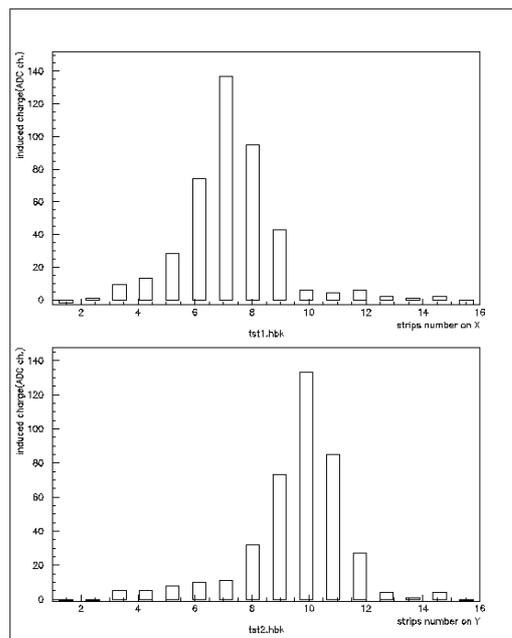
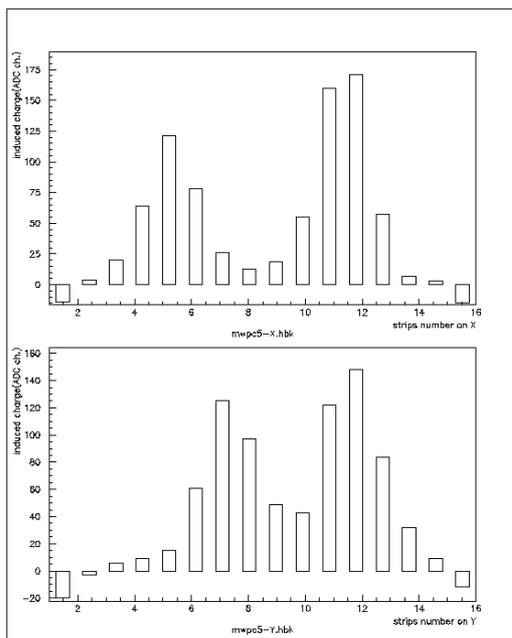


图 4-17(d) mwpc5 阴极感应条上的单粒子和多粒子分布

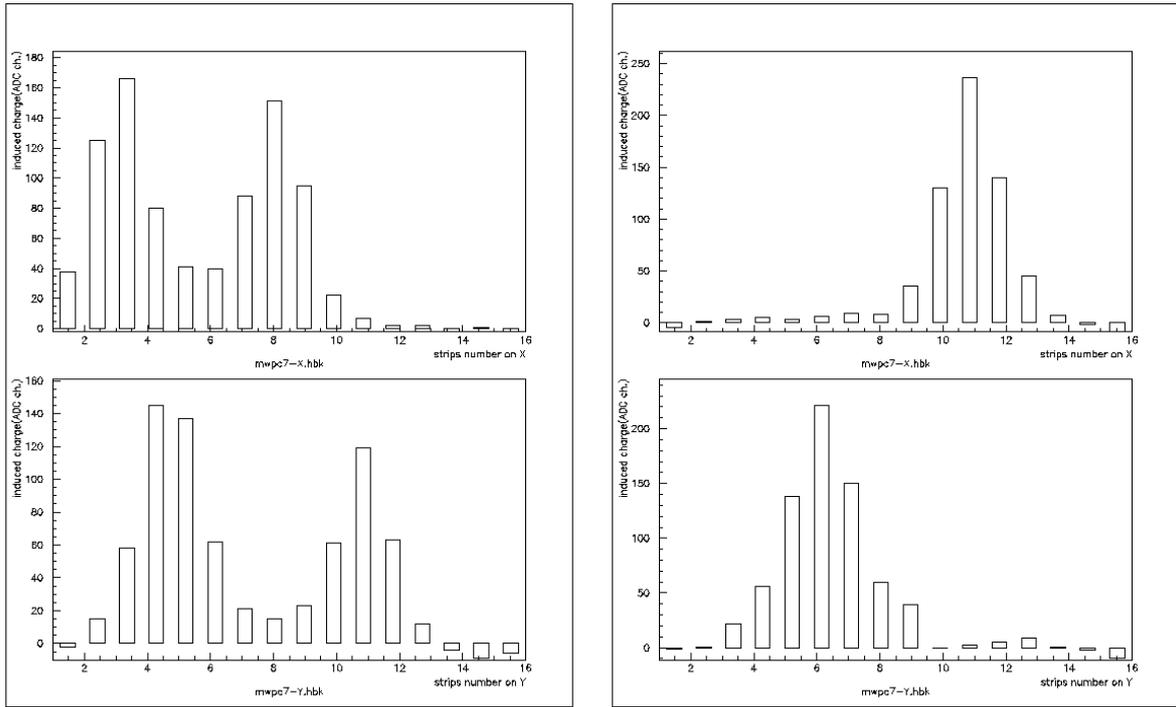


图 4-17(e) mwpc7 阴极感应条上的单粒子和多粒子分布

3, 单粒子计数率

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) 希望有 1 个粒子或仅仅希望 1 个粒子在磁谱仪末端得到。因为每脉冲可能的粒子数服从 Poisson 分布, 即 Poisson 分布几率:

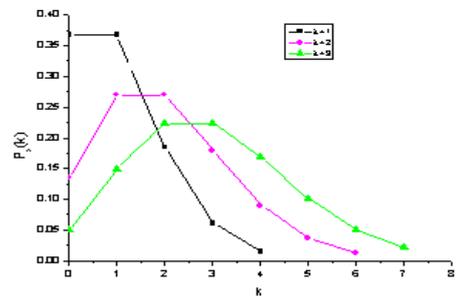
$$P(x = k) = \lambda^k e^{-\lambda} / k!$$

λ : 为每脉冲粒子个数期待值; κ : 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: $\lambda=1, 2, 3$; $\kappa = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$ 。

右图是期望值为 1, 2, 3 的 Poisson 几率分布。对单粒子期望来说, 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, 考虑多重符合效率以及束流输运效 50%, 计算包括直线加速器的束流频率, 到达次级束末端, 最大可获得单粒子计数率为 1.5 赫兹。

目前实验上, 最大计数率 2 赫兹(0.8GeV/c 电子)。在线判选的单粒子选择效率 (65-70%) 接近物理估计值。



4, 位置分辨

在线测量多丝室位置分辨, 其做法是在 2 丝室之间插入第 3 个丝室, 3 个击中点位置做线性拟合, 分别求出 3 点的残差统计。运行在 1.1GeV/c 单电子束引出模式下, 这个在线定位 σ 好于 200 微米。由于较宽的底线分布, 取 2 倍的 σ 偏差, 束流定位好于 400 微米。X-Y 方向残差分布如图 4-18。

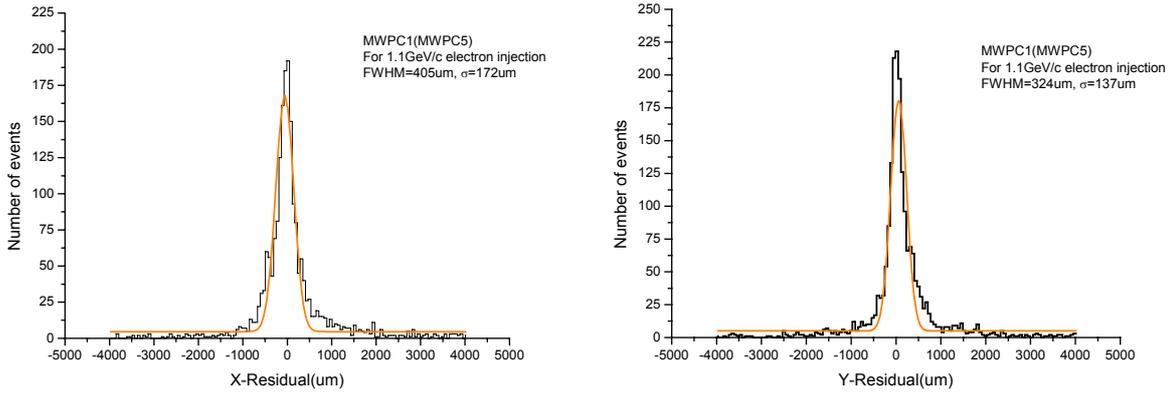


图 4-18(a) MWPC1 X-Y 方向残差分布

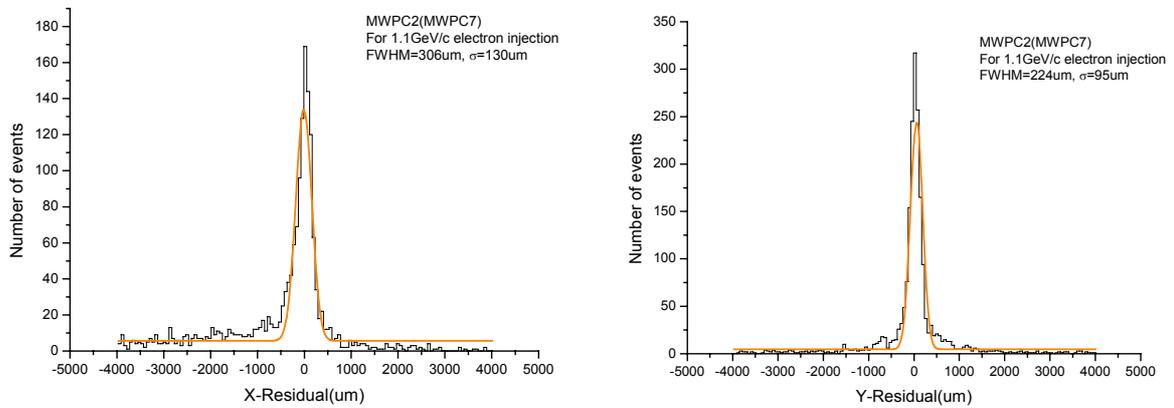


图 4-18(b) MWPC2 X-Y 方向残差分布

测量中插入的第 3 个室的电子学是临时拼凑的，电子学噪声非常大，影响了室的位置分辨如图 4-19。

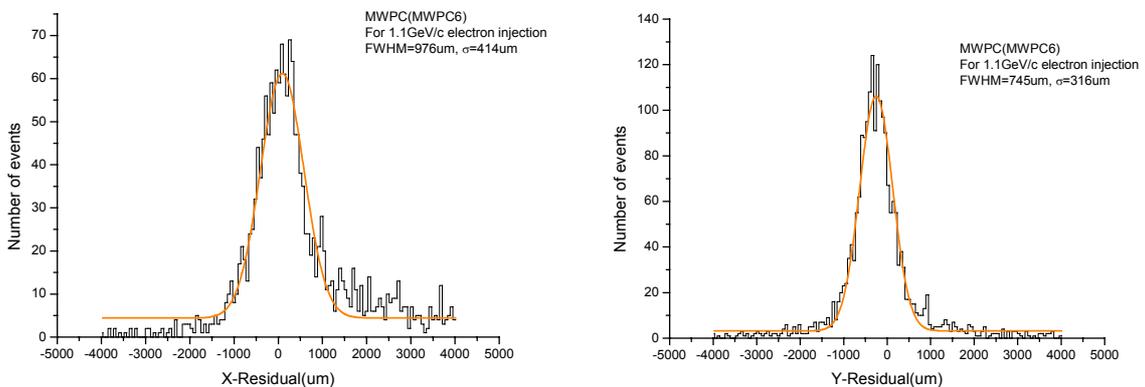


图 4-19 电子学噪声大的多丝室 X-Y 方向残差分布

在数据分析时，频率统计的 bin 宽取室体的本征分辨（多丝室的机械公差 50-60 微米）。当 bin 宽取 50-80 微米，最大和最小值的取舍等变化时，作高斯拟合的 FWHM 将有一些微小的改变，如图

4-20。

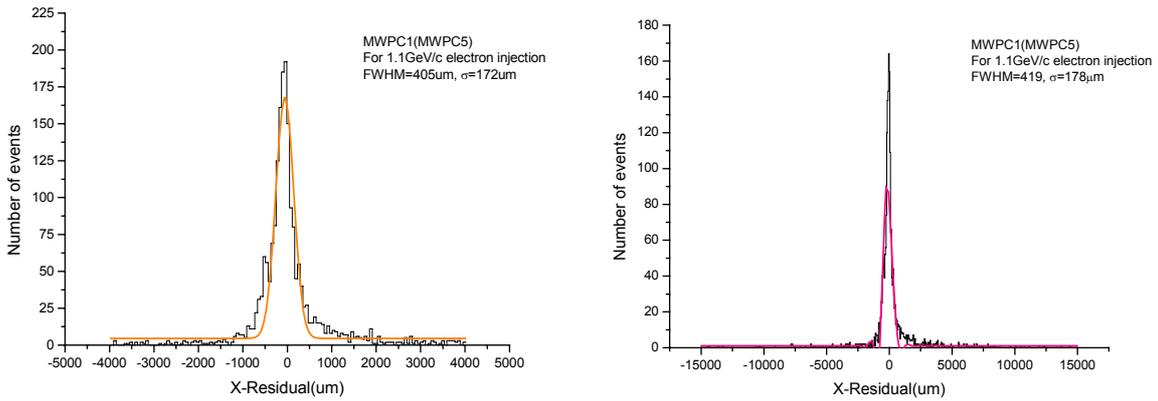


图 4-20 不同拟合参数的 FWHM 变化

另外，当这个室体运行在混合引出束 (e^+, π^+, p) 的情况下，定位分辨率明显变差。如图 4-21，在线位置分辨测量结果是 300 微米，同样是因为较宽的底线分布，取 2 倍的 σ 偏差，束流定位误差 600 微米。参考 ^{55}Fe 放射源定位误差测量（均方误差：X 方向 395 微米，Y 方向 217 微米），多丝室位置分辨 300-400 微米。

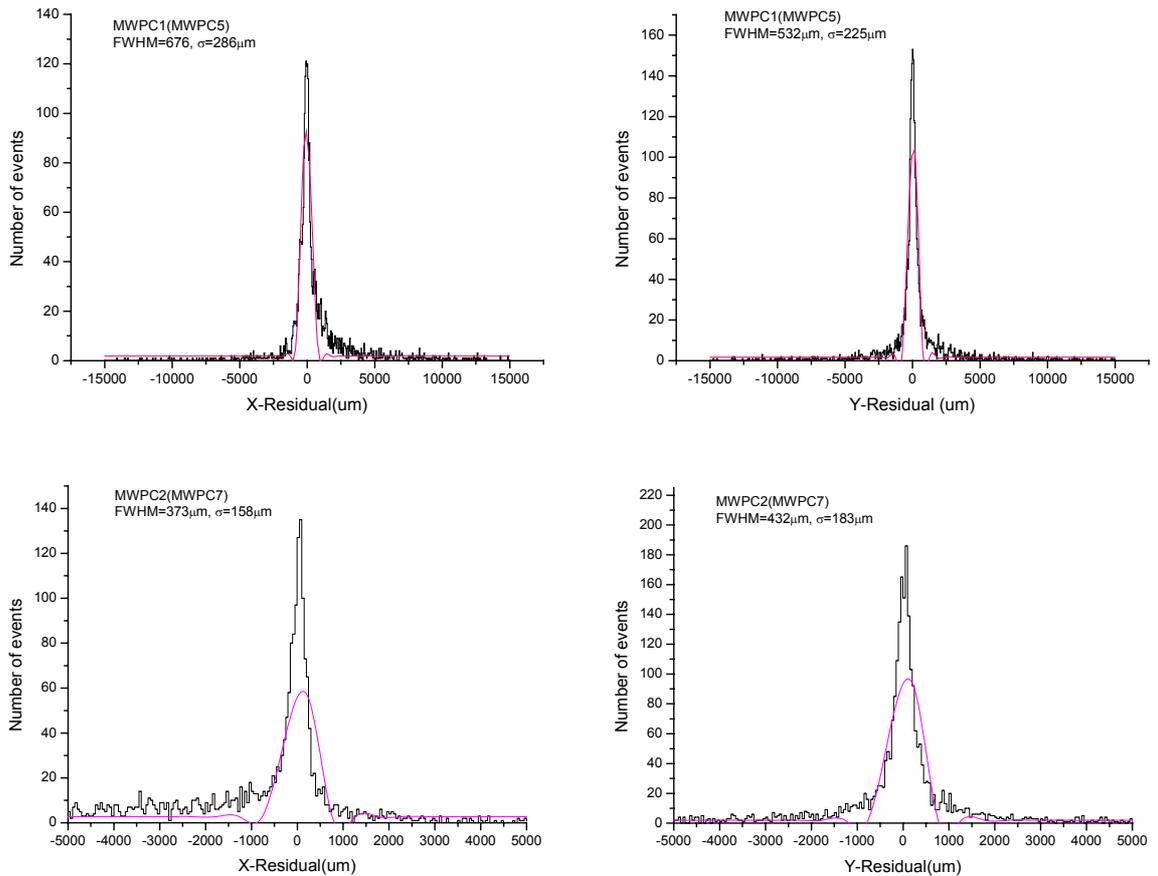


图 4-21 混合束 (e^+, π^+, p) 入射的定位分辨

当在线测量要求较高的位置分辨时，一些可能的改善位置分辨是让多丝室工作在半正比区（适当降低丝室高压），并且将多丝室旋转一定角度，使入射粒子成一定角度入射。为了获得较高的 dE/dX

分辨，粒子倾斜丝面入射，如图 4-30 显示了倾斜后 dE/dX 增大，X 面上粒子击重位置的条状分布也有部分改善。图 4-22 显示了不同状态下粒子的散点分布。

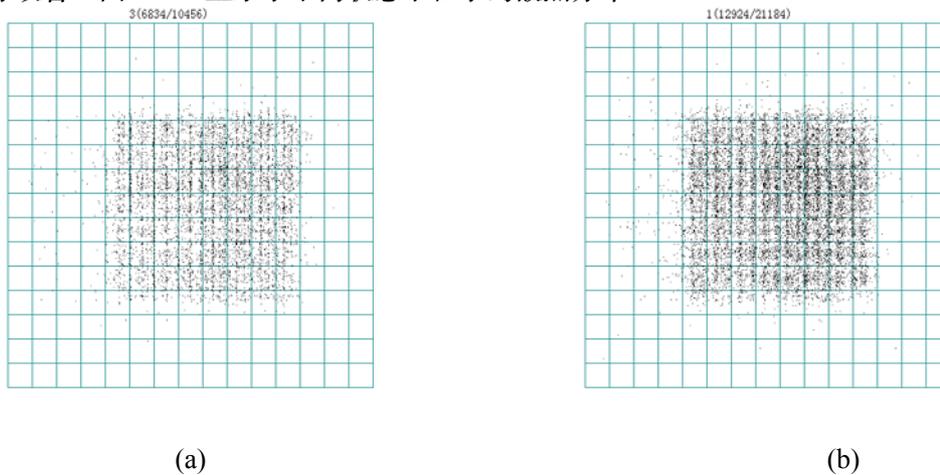


图 4-22 MWPC2 垂直入射的粒子散点图(a)，绕 Y 轴转 10 度后散点图(b)

3-3-4 本底与噪声

1, 本底测量

试验束运行时，利用 5*6 平方厘米闪烁计数器 (SB) 在束流线末端不同水平位置上测量本底计数，测量布置如图 4-23 (图中单位厘米)。测量步长 2 厘米，每点 5 分钟，共 10 个点，第 10 个点已接近闪烁计数器本底计数。本底水平分布如图 4-24。测量说明离开中心束流线 7-22 厘米范围内每秒有 0.02-0.05 个本底计数 (与符合无关)。这些本底包括：正负电子对， $X, \gamma, \mu \dots$ 等。

屏蔽结构的屏蔽效果满足设计要求，实验区只有本底计数，剂量率为 $0.11-0.20 \mu\text{Sv/h}$ 。(加速器中心防护组提供)

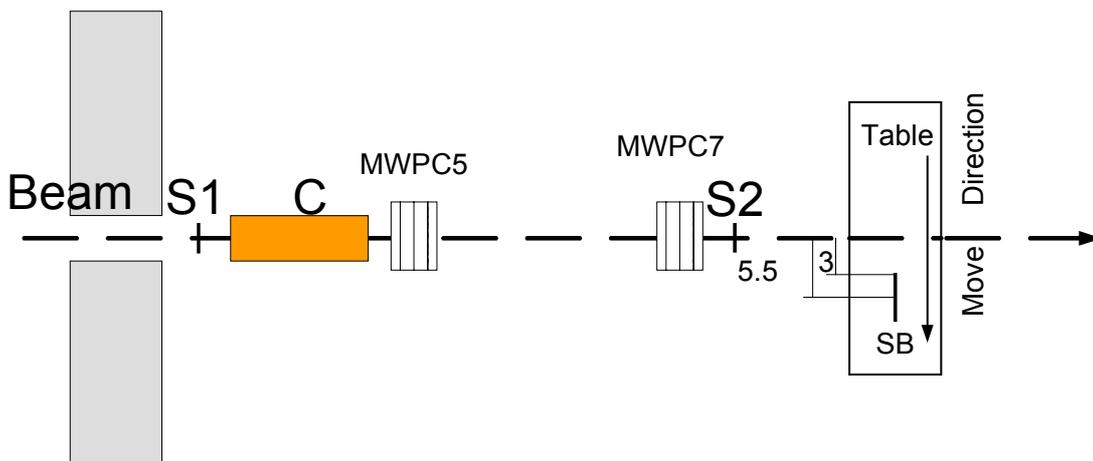


图 4-23 本底计数测量布置图

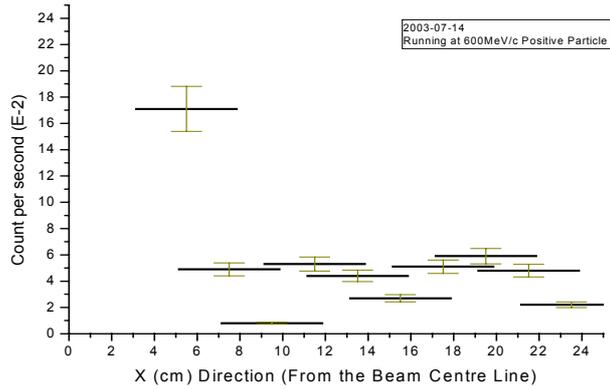


图 4-24 试验区本底水平方向分布

2, 本底排除

试验区环境本底主要是通过屏蔽结构来降低。束流线附近的本底，主要来自于束流方向。目前切韧可夫计数器前，屏蔽墙上的束流出口 (20*20 平方厘米) 可进一步减小，这样将改善试验探测器附近的本底环境。引出 π^+ 束流时，束流中本底主要是质子和 μ 介子（使用切韧可夫计数器反符合，正电子已被禁止）。目前的混合束引出，质子可通过在线飞行时间符合电路排除，而 μ 介子为固有本底，它占的比例只有百分之几。

3, 电子学噪声

电子学噪声主要反映在多丝正比室（阴极感应读出）的测量中。该丝室电子学框图如图 4-25。调试初期，这个室的前端电子学受地线和电磁干扰的影响很大。ADC(C-205)的台基测量分布很宽，如图 4-26。

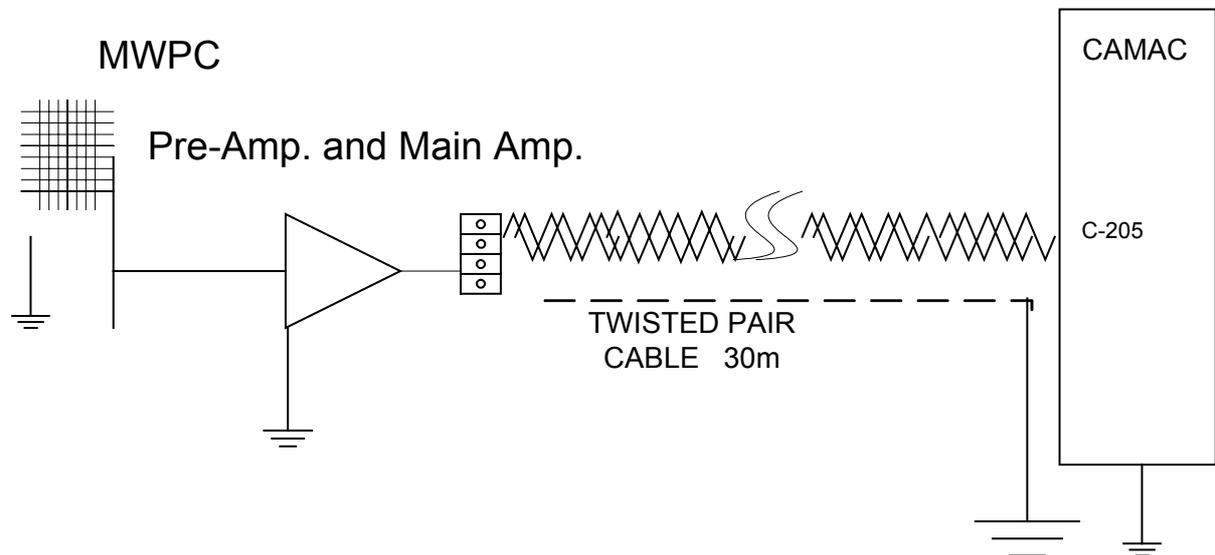


图 4-25 丝室电子学框图

重新改善电子学地线系统连接，并通过隔离变压器将电子学的供电与加速器供电隔离等措施。使 ADC 的台基分布明显变窄，如图 2-27。台基测量误差 $\sigma \leq 7$ (道数)，在数据处理时，这样的台基分布，对阴极感应条(5 条)读出的最大和最小感应信号影响分别为 $\sim 4\%$ 和 $\sim 28\%$ 。空间电磁干扰的影响主要来自于大功率可控硅整流电源，如增加适当的屏蔽，进一步减小台基晃动还有可能。

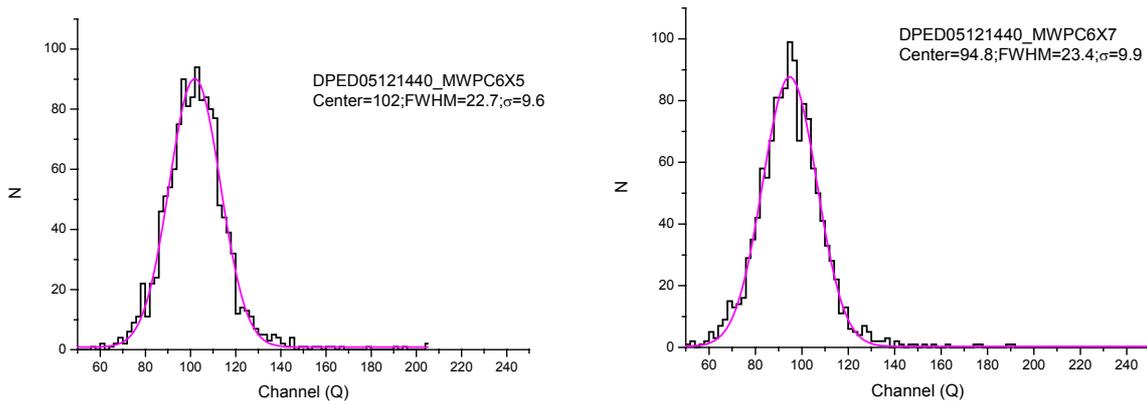


图 4-26 ADC 的台基分布(处理前)

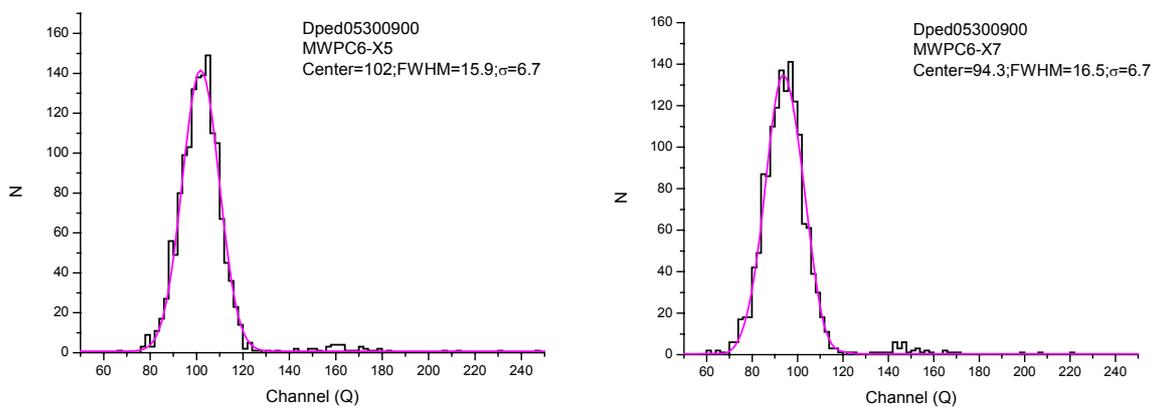


图 4-27(a) MWPC6 ADC 的台基分布(处理后)

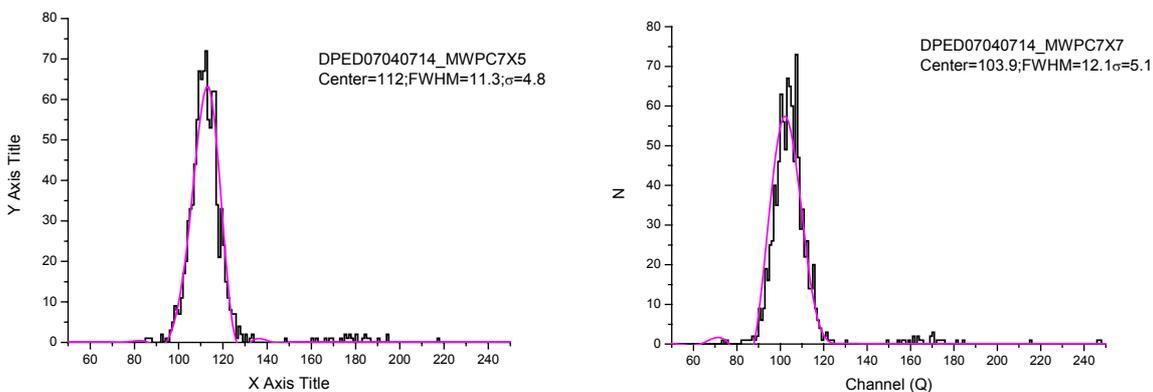


图 4-27(b) MWPC7 ADC 的台基分布(处理后)

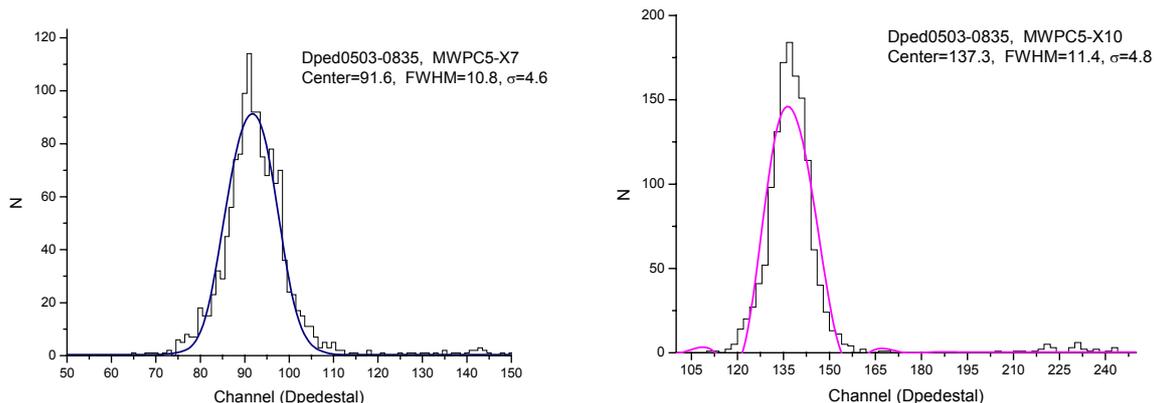


图 4-27(c) MWPC5 ADC 的台基分布(处理后)

4 计划完成情况

4-1 试验束课题计划与完成进度分阶段介绍如下。

启动阶段:

计划时间 2000/09---2000/12

实际执行时间 2000/09---2000/12

备注 多丝室启动延后(6个月)

工作内容----DESY 磁铁检修并测磁;

测磁电源订货并验收;

多丝室加工调研; 试验束相关模拟计算和束流输运计算;

完成试验束项目初步设计;

部件生产加工单位调研和设备估价。

工程部件加工与招投标:

计划时间 2001/01---06

实际开始时间 2001/03/17----

备注 延后 10 周

工作内容----生产加工协议和招投标(磁铁, 电源, 真空, 支架, 束流控制部件);

电子学机箱插件国外订货; 多丝室加工落实; 切彻可夫计数器加工调研;

计数器准备。

部件安装和分系统调试阶段:

计划时间 2001/07---2001/12

实际执行时间 2001/07---2001/12

备注 按计划进行

工作内容----屏蔽结构施工(8月底基本完成);

支架到货调整;

真空系统安装;

磁铁安装准直; 电源安装调试; 电缆铺设; 控制系统安装调试;

电子学配套; 闪烁计数器性能测试; 数据获取程序调试;

切彻可夫计数器桶部加工, 硅酸盐玻璃镜托加工;

E3 试验束线磁铁和真空管道安装并准直。

束流线联调和试验束初步调试阶段:

计划时间 2002/01----2002/08

实际执行时间 2002/01----2002/08

备注 1 月份得到 E1 线束流光斑, 6 月份在 E3 试验束上获得 e/π TOF 谱。

工作内容----E1, E2 束流线调试; 计数器安装调试; E3 试验束初步调试;

混合粒子飞行时间测量;

切韧可夫计数器镜托材料改为有机玻璃, 并发送到长春光机所抛光镀膜。

单电子束调试阶段

计划时间 2002/09/15----2002/12

实际执行时间 2002/10/30----2003/04/18

备注 02 年秋季加速器开机延后, 03/02/27--03//03/10 TOF 组初步试验。

工作内容----E1 束流线初步提供应用;

试验束调试; 切韧可夫计数器镜托加工不合格返回, 重新抛光镀膜;

(3 月 10 日多丝室到高能所, 3 月 17 日收到合格镜子)

电子学系统和多丝室供电接地;

探测器准直并测量 E3 束流截面;

E3 试验束初步提供应用。

4-2 预算和决算

预算 381 万元。

每年拨款数额列表:

年份	月-日	金额 (万元)	扣管理费 (万元)	实际可支出 (万元)
2000	08-31	15	2.55	12.45
	09-14	15	2.55	12.45
	09-18	15	2.55	12.45
2001	04-29	85	14.45	70.55
	11-29	150	25.5	124.5
2002	10-21	85	14.45	70.55
2003	10-29	14	2.38	11.62
合计		379[#]	64.43	314.57

([#]) 按预算下拨经费缺 2 万元。

分项设备实际支出金额列表

项目	实际支出 (万元)	备注
磁铁	12.7	
磁铁电源	85.749-3.8	3.8 万元未结
电源控制系统	14.7895	
真空系统	47.509494	
支架系统	13.34	
束流测量和控制	24.353	
探测器及电子学	47.8	
安装	3.55798	
屏蔽结构	57.296099	
材料	1.520414	
科研业务费	8.82886	包括返聘和临时工资
合计	313.644347	3.8 未结

决算后基本持平, 详细预算决算见附《预算和决算》。

5 分工与合作

5-1 分工

在工程建设和系统调试中试验束组内部分工，见下表 5-1

表 5-1

工作内容	负责	参加
工程总体	李家才	郑林生
M.C.计算	张良生	
探测器和数据获取系统	崔象宗	刘正全 李家才 张少平
电源和控制系统	吴元明	李家才 张少平
真空和机械	周宝庆	
系统调试和性能测量	李家才	崔象宗 张良生 刘正全 吴元明 刘士兴 张少平 孙长春
DESY 磁铁检修和磁场测量	吴元明	李家才 张少平 张良生
磁铁过温保护和安全连锁	吴元明	张少平
屏蔽结构施工和环境剂量估计	李家才	吴元明 张良生 张少平
束流控制部件和 BCT 测量系统	李家才	刘正全 崔象宗 周宝庆 张少平
设备安装和机械准直	李家才	吴元明 周宝庆 张良生 张少平

5-2 试验束课题所内合作

主要单位和工作内容包括：

加速器中心物理组	束流输运计算
磁铁组	TQ 磁铁设计，联系加工，磁场测量
控制组	电源控制系统和软件维护
电源组	TQ & BH/BV 电源维修
机械组	机械准直
真空组	闸板阀安装控制
防护组	剂量测量，安全连锁系统
通用运行室	设备安装
所工厂	DESY 磁铁检修

5-3 所外合作和参加单位 (合同金额 10 万元以上)

中国科学技术大学
 中科院北京科学仪器研制中心
 北京纳诺帕技术中心
 北京市三纯科技发展有限公司
 欧洲系统测量公司北京代表处
 西安宏宇电气
 北京世龙广域科技发展有限公司
 中国新兴建设开发总公司

6 应用

从 03 年开始, E1 束流线稳定提供核分析实验室应用。束流的出口位置和截面可根据应用要求调节。本年度慢正电子课题组完成了脉冲慢正电子性能的检测工作、束流系统验收指标的测定工作。系统各项性能的实际测试结果达到了预计的设计指标。

在 E3 试验束上, 利用 800MeV/c 的电子, 2003 年 7 月完成了 BESIII 上 TOF 探测器第 2 轮束流试验。初步时间分辨测量结果如图 6-1 (引自 TOF 组工作小结, 2003-07)。这期间束流使用效率达到 93%。试验束本季度运行状态图如图 6-2。2003 年秋季再次对不同型号规格的 TOF 探测器材料 (闪烁体) 的衰减长度做了专门的测量, 测量结果表 7-1 (数据引自 TOF 组总结, 2003-11)。

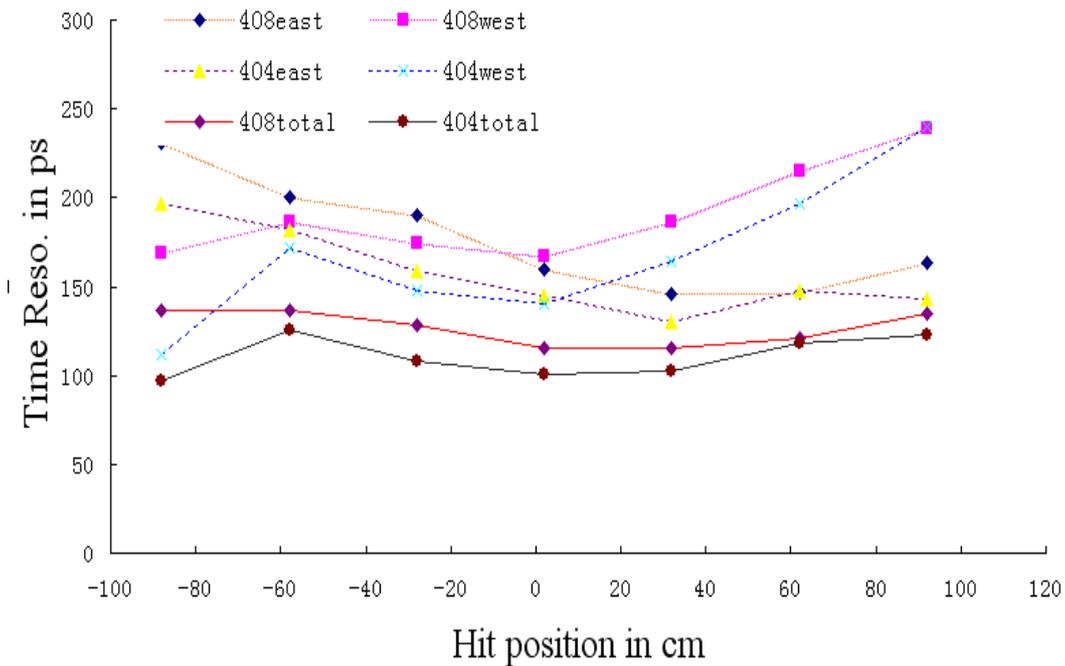


图 6-1 初步时间分辨测量结果

表 6-1

闪烁体	衰减长度 (厘米)
BC408*4:	171.8 ± 37.1
BC408*5:	217.5 ± 66.56
BC408*6:	240.6 ± 16.9
BC404*5:	288.7 ± 55.2

在 E2 束流线上, 进行高能正电子在晶体沟道中的辐射实验研究, 是与北大合作的国家基金资助项目。目前实验准备工作正在继续。

利用 E2 束流打靶产生的混合粒子辐射场, 进行农作物品种性状突变研究。该项工作是与农科院合作的国家基金项目, 今年是该项目研究的第一年。目前已完成第一轮小麦品种的辐照实验。

另外, 沟道辐射实验线上的清扫磁铁, 作了临时改装, 提供最大磁场 1.1Tesla。2003 年夏季利用这块磁铁完成光电倍增管抗磁试验。

(Running Map of The TestBeam, From 2002-10-30 to 2003-07-16, The total beam time is 1594 hrs for 10# experimental area and about 9 per cent of them are temporary adjustment time of LINAC and beam injection time for the BEPC.)

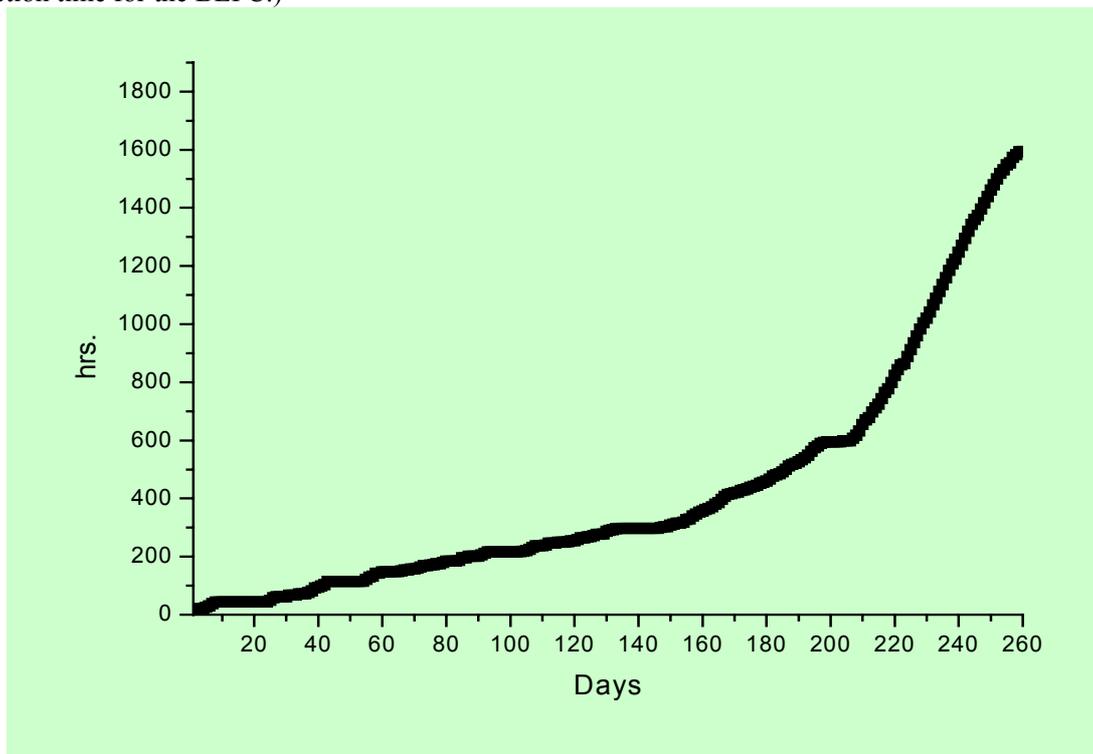


图 6-2 2002—2003 年度试验束运行图 (2002-10-30—2003-07-16)

7 结束语

7-1 试验束主要性能指标和意义

在 E3 试验束上, 提供动量为 200-1200MeV/c 的混合粒子束 (由于运行室开关柜功率的限制, 目前上限是 1.1GeV/c), 粒子种类包括 e^{\pm} , π^{\pm} , p, 通过在线判选得到单粒子。粒子动量分辨 1%, 在直线加速器束流稳定状态下, 单电子计数率 0.6-2 赫兹。在 BEPCII 上 (已动工的改造方案), 直线加速器提供 50 赫兹的稳定束流, 平均单电子计数率将大大提高。

E3 试验束作为探测器的试验束流, 这套装置将长期在高能所提供使用。他是我国第一个高能标准粒子束流试验站。该试验束成功建造的意义不仅是为 BESIII 探测器提供试验束流, 而且为提高国内探测器的研究能力, 增强与国际高能物理实验室合作的实力, 奠定了基础。

试验束上的 E1 电子束流线由原来的束流线改造而成, 已提供给核分析实验室的慢正电子装置打靶试验, 束流运输性能满足使用要求。目前已成为慢正电子装置固定用途的束流线。

E2 束流线是另一条提供 1.1-1.5GeV 正负电子应用的束流线。该线具有 15 米长宽 3 米的自由实验空间, 可安排不同类型的束流元件和打靶探测设备。根据实验需要, 实验空间扩展也留有一定的余地。目前, 在这条束流线上安排了高能正电子面沟道辐射实验研究。利用这条束流线, 进行高能电子的 X 射线辐射实验研究, 将是一个符合高能所研究方向的长期的研究课题。

7-2 运行维护和改进

在 BEPC 运行会和科研业务处的安排下,以及在直线加速器工作人员的努力下,直线加速器运行稳定,试验束机时充分。使得 TOF 探测器在 2003 年 7 月 BEPC 停机前顺利完成第二轮束流试验目标。所以,试验束的运行机时安排应明确在 高能所大型装置运行会协调下统筹分配。要提高试验束的运行效率,直线加速器稳定运行是首要的先决条件。

试验束建成后,运行维护是试验束组的主要工作之一,今年是试验束运行的第一个年度,学生们也在运行维护工作中获得了锻炼。为了试验束正常稳定运行,明年需要补充年轻人。希望主任尽早考虑安排。

另外,试验束的改进工作,请所长和中心主任一并研究考虑。

(1), D2 磁铁前后配备 6 米真空盒。用于减小粒子能量损失和散射 (MC 计算结果附后); (2), 试验束课题为了压缩预算, CAEN 公司的 32 路 ADC 插件 (C205) 只订购了 2 块。为满足不同的实验要求和备用, 希望尽快订购了 1 块 CAEN 公司的 32 路 ADC 插件。

(3), 试验束上的探测器性能在线检测和电子学在线刻度;

(4), 束流荧光靶改造。

7-3 感谢

感谢在试验束工程建设和系统调试工作中李金研究员、李卫国副所长、吕军光研究员、给予的指导和帮助,感谢王贻芳研究员在正比多丝室制造和试验束应用方面给予的大力促进,感谢周莉、赖元芬、夏小米和电子学组的同志们在闪烁计数器和电子学方面的鼎力帮助。感谢气体组在配气系统等方面的帮助。

在试验束建设过程中,大量的加速器工程方面的工作,主要是与加速器中心合作完成。没有他们的合作,在有限的人力和时间内,要完成这样的工程量将不可能。尤其是加速器中心大组的组长徐刚、孔祥成、程健、石才士、宋洪等在试验束建设和运行中给予的无私协助。

运行室承担了设备安装和低压配电柜选型订货等全部工作

感谢几年来给予试验束组工作的关注和帮助的同志们。