

高能所试验束 课题总结

2003-07-25

前言

E3 试验束流线

计算

工程和设备

合作与应用

完成计划情况

结束语

1 前言

试验束课题，由 BEPC 改进等项目经费支持。在加速器中心，通用运行室，和物理中心兄弟组的支持下，已完成课题任务。

试验束经过 2 年的工程建设，2002 年下半年开始，部分时间提供 E1 线束流为核分析室的慢正电子装置打靶实验。2003 年 3 月份开始利用 E3 试验束流线，配合 TOF 探测器组进行了初步试验测量。3-4 月份完成多丝正比室和切韧可夫计数器在 E3 线上安装调试，以及系统调试。5 月份开始，E3 试验束提供给 BESIII 的 TOF 探测器的第 2 轮试验。在业务处的支持下，以及相关使用束流单位的理解和支持，在 2003 年夏季 BEPC 停机前，TOF 模型试验，圆满完成本阶段任务，试验束本身也完成束流指标测量。试验束本季度运行状态图如图 1-1。在第 2 轮 TOF 实验中，运行取数效率 93%。

(From 2002-10-30 to 2003-07-16; The total 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 BEPC.)

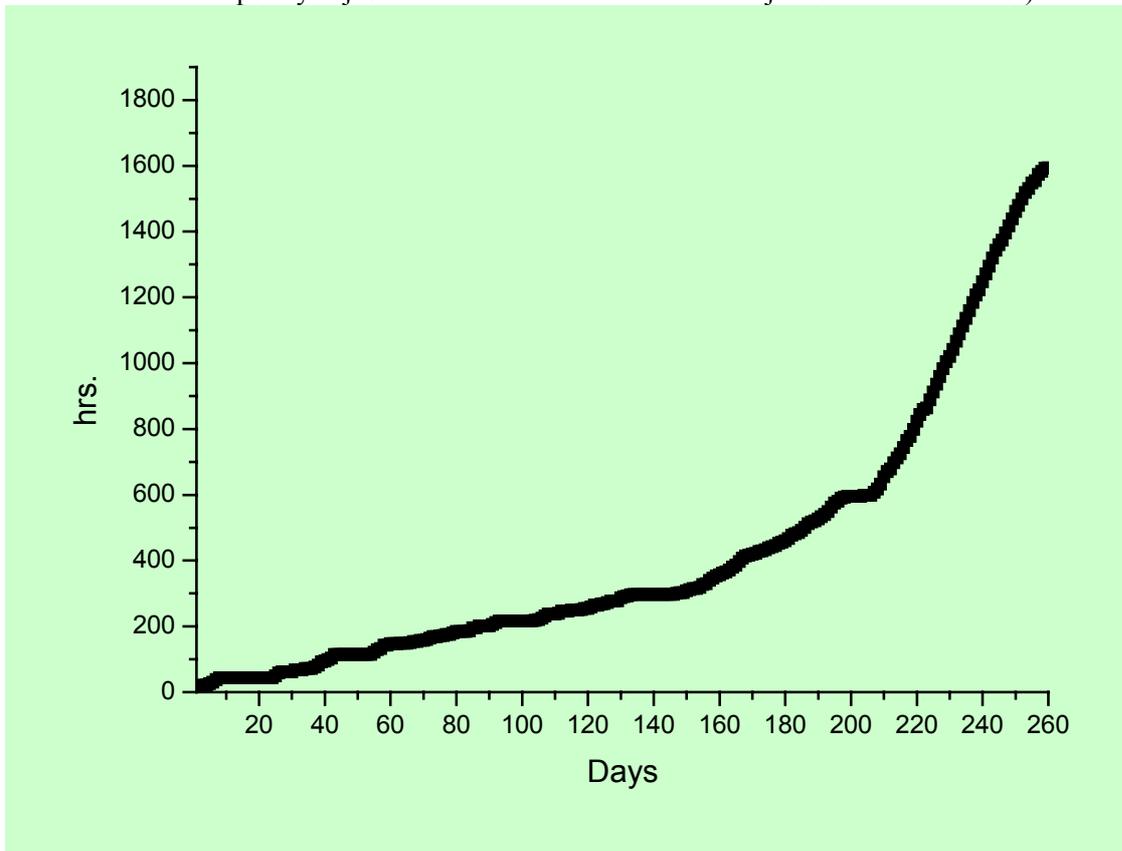


图 1-1 2002—2003 年度试验束运行图

2 E3 试验束线

这条束流线，是由电子直线加速器束流（束流参数如表 1-1）打靶产生的次级束流，未经分离的试验束。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。

束流尺寸将由准直狭缝决定，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。

这条混合粒子试验束流线，长 22 米，其中前端真空盒长 10 米。主要有磁谱仪 (2Q2D), Čerenkov 计数器，闪烁计数器和 2 维读出的多丝正比室 (2 套) 组成。这条试验束流线的布置如图 2-1。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，以及缺少聚焦元件。所以该磁谱仪中的粒子输运具有一定的消色散作用。束流输运计算表明，在 D2 入口处的狭缝上可获得较好的动量选择。从试验束调试和运行中了解到，通过聚焦面上的位置探测器，可获得较好的粒子动量分辨。

束流线上 2 个塑料闪烁计数器，S1 和 S2，截面 3 厘米*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。5 重符合用于排除本底，以及粒子定位和动量选择。

表 1-1 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---700MeV/c
 动量分辨 1%
 粒子定位误差 电子 400 微米
 混合粒子 600 微米
 计数率 2 赫兹 (目前最高计数率)

Beam spectrometer

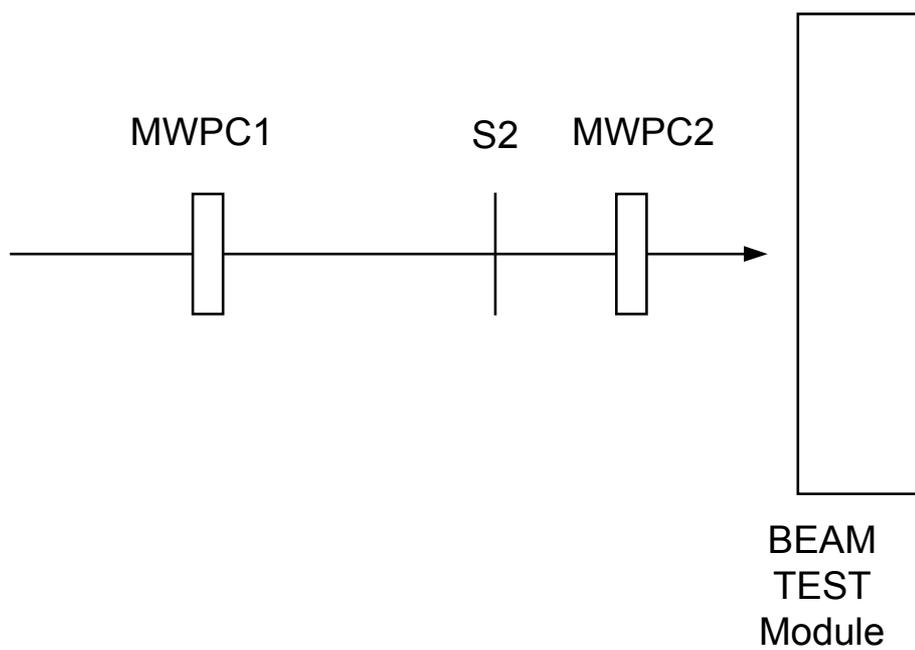
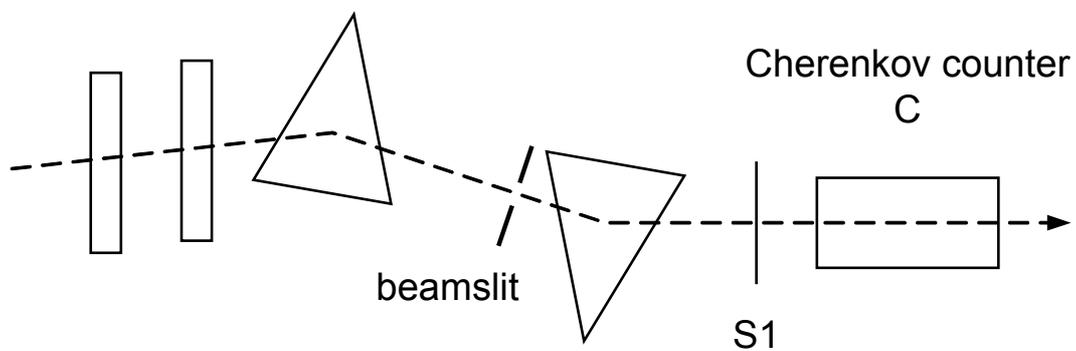


图 2-1 E3 试验束流线结构

2-1 动量及动量误差

1, 磁铁有效长度 (Leff) 测量

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 2-2。

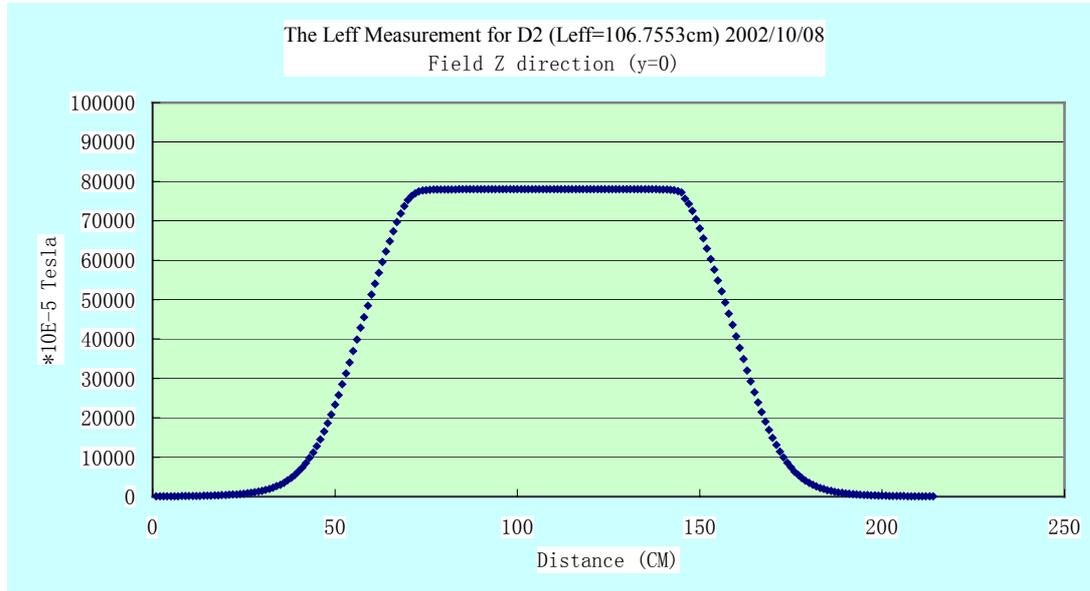


图 2-2 D2 磁铁磁场强度纵向分布

有效长度和误差计算:

$$L_{eff} = \sum B_z / \overline{B_0}$$

$$L_{eff} \text{ (cm)} = 106.33_{\text{at}+3\text{cm}}; 106.42_{\text{at centre}}; 106.36_{\text{at} -3\text{cm}} \text{ (倪淦林提供 2001/04/22);}$$

$$= 106.75_{\text{at centre}} \text{ (2002/10/08);}$$

$$L_{eff} \pm \Delta L_{eff} = 106.56 \pm 0.19/0.23$$

2, D2 (磁谱仪主磁铁) 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 (2003 年 5 月之前束流向右沿束流方向偏离原中心准直线, 按磁铁上的箭头方向转动磁铁, 并相应增大磁场, 在保证动量不变的情况下, 使束流进入中心轨道) 对准地面上的机械准直线, 再测量 D2 的入射束流中心 ($B_{D2}=0$), 如图 2-3 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。

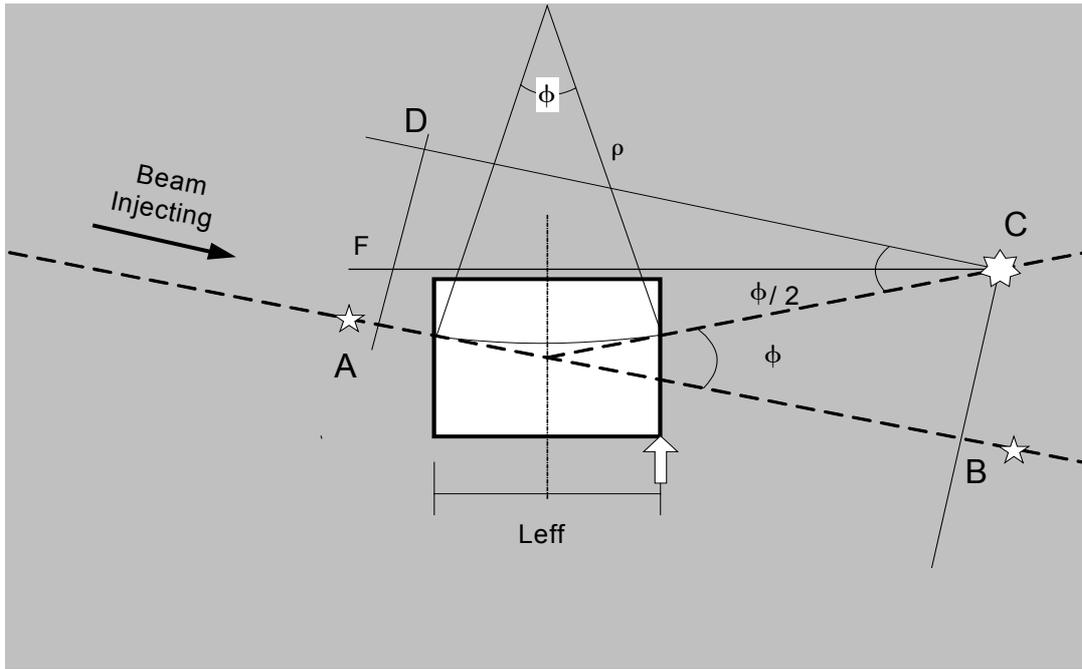


图 2-3 D2 磁铁束流偏转角测量图

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。经纬仪测量得到束流偏转角和测量误差计算如下：

$$\phi_1 = 295^{\circ}38'30'' - 277^{\circ}53'45'' = 17^{\circ}44'45'' \text{ (第一次测量);}$$

$$\phi_2 = 266^{\circ}56'2'' - 266^{\circ}15'30'' = 17^{\circ}40'32'' \text{ (第二次测量).}$$

求 2 次测量平均： $\phi_0 \pm \Delta\phi = 17^{\circ}42'39'' \pm 2' (17.711^{\circ} \pm 0.033^{\circ})$

3, 动量

$$P = P_0 + \Delta P$$

首先计算动量 P_0 ，根据关系式：

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

由运行参数和实际测量值，计算 P_0 ，

聚焦强度：往日运行 $-551 \text{Gs/cm} (1.1 \text{GeV/c})$; $LQ1/LQ2=1.28$;

校正动量计算： $P_0=0.29979B_0 \cdot (L_{eff}/2 \sin(\phi/2))$; ($L_{eff}=1.0656 \text{m}$; $\phi=17.711^{\circ}$);

校正后聚焦强度 = -563.6Gs/cm (at 1.1GeV/c);

动量 P_0 与其他元件参数，如表 2-1

表 2-1

预设 P(GeV/c)	LQ1 (Gs/cm)/(A)	LQ2 (Gs/cm)/(A)	D1 (A)/(Tesla)	D2(Tesla)	校正动量 P_0 (GeV/c)
0.3	-150.27/99.9	117.4/85.7	87.2/0.22069	0.28271	0.29333
0.5	-250.45/165.6	195.7/141.4	145.6/0.3669	0.47114	0.48885
0.6	-300.55/198.4	234.8/169.3	174.7/0.43975	0.56536	0.58661
0.8	-400.73/264.1	313.1/225.1	233.1/0.58596	0.7538	0.78213
1.1	-551/362.6	430.5/308.7	320.6/0.80502	1.03645	1.0754

4, 动量线性

根据表 1-1, 动量与 D2 磁场, D1 磁场/电流, LQ1,LQ2 电流的关系, 如图 2-4

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。

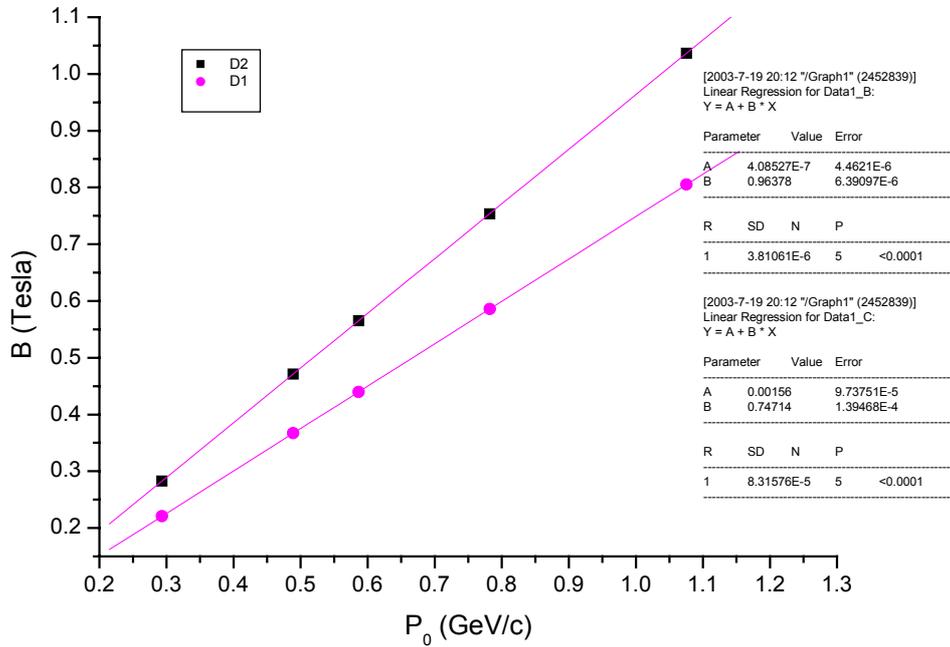


图 2-4 (a)

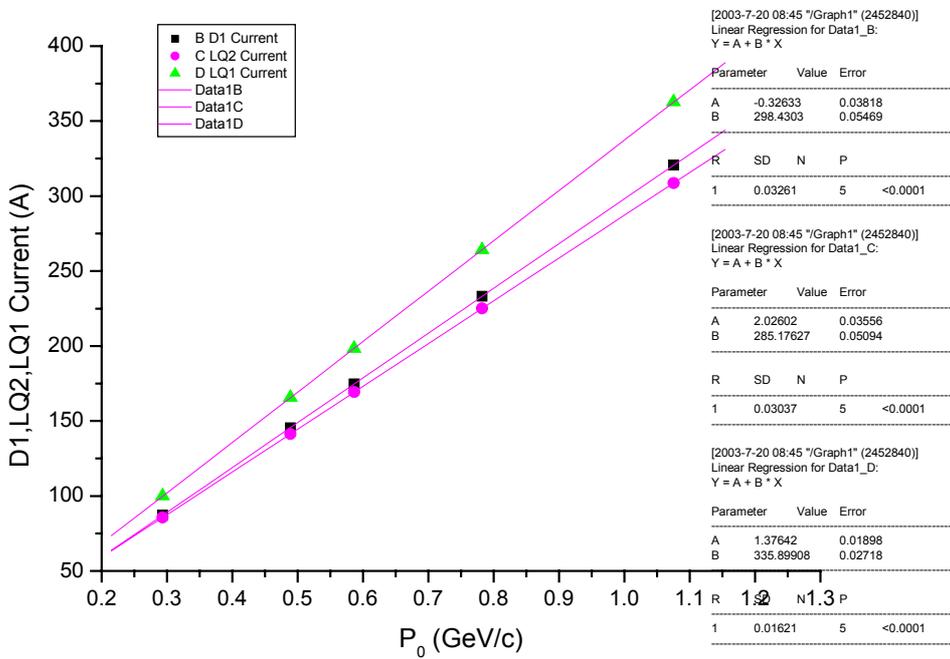


图 2-4(b)

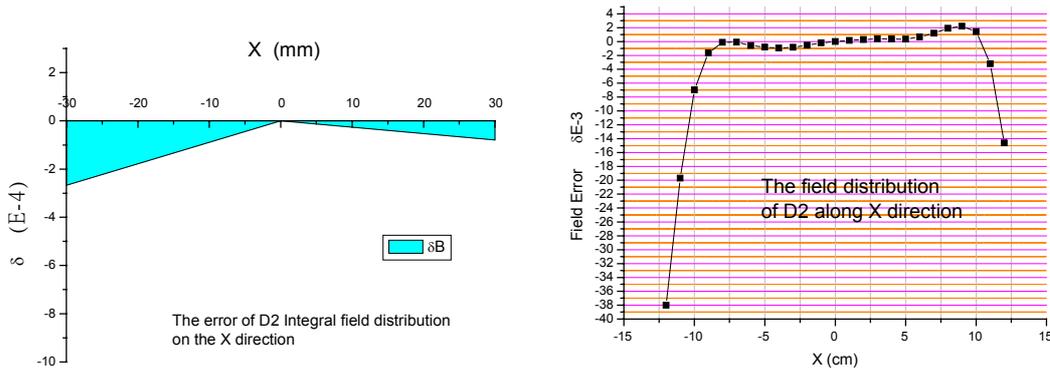
5, 动量误差

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:



在好场区内 (-8 厘米—7 厘米) 场误差为: $\Delta B = B \cdot 0.1\%$. (实时 B 的测量)

(2) 动量误差计算

根据以上各种测量误差, 计算动量误差:

$$\Delta P = \left| \frac{\partial P}{\partial B} \right| \Delta B + \left| \frac{\partial P}{\partial L_{eff}} \right| \Delta L_{eff} + \left| \frac{\partial P}{\partial \phi} \right| \Delta \phi$$

及

$$\Delta P = 0.29979 \left(\frac{L_{eff}}{2 \sin \phi / 2} \Delta B + B \frac{\Delta L_{eff}}{2 \sin \phi / 2} + B \frac{L_{eff} \cos \phi / 2}{2 \sin^2 \phi / 2} \Delta \phi / 2 \right). \quad 2--1$$

式 (2-1) 代入: $L_{eff} \pm \Delta L_{eff} = 106.56 \pm 0.19/0.23$;

$$\phi_0 \pm \Delta \phi = 17^{\circ}42'39'' \pm 2' (17.711^{\circ} \pm 0.033^{\circ});$$

$$\Delta B = B \cdot 0.1\%.$$

$$\Delta P_{at 0.8 GeV/c} = 0.29979(0.0026685 + 0.0050085 + 0.0049823) = 0.003795 GeV/c$$

$$\frac{\Delta P}{P_0} = \pm 0.474\%_{at 0.8 GeV/c} \quad 2-2$$

2-2 聚焦面动量分辨

1, 聚焦面束流截面测量及动量宽度

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 2-5。在实际调试中，根据聚焦面上束流截面和强度，对束流运输参数做了相应调整，如表 2-1。

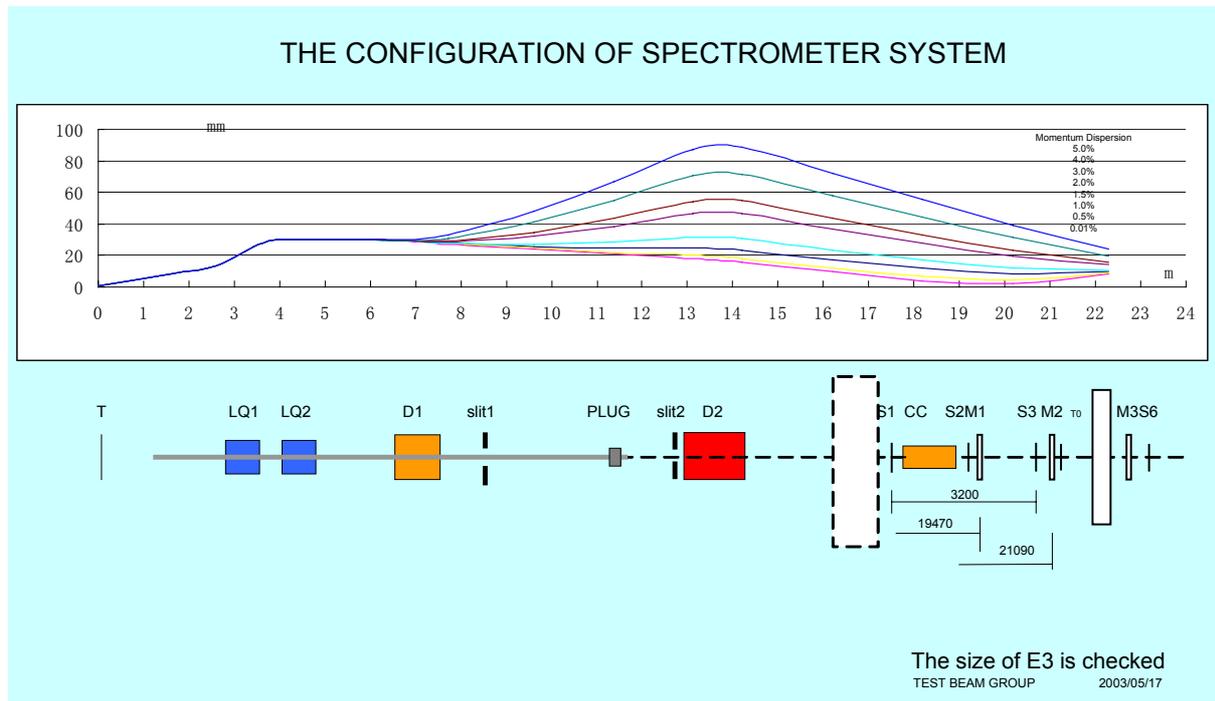


图 2-5 E3 试验束结构和束流包络图

束流截面测量安排，如图 2-6。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 (用束流变压器 BCT 信号积分，作归一化处理)，测量结果如图 2-7 (不同动量的粒子在 X 方向上的分布后面将给出)。这个结果说明，在聚焦面上，粒子有较好的聚焦性能。

为了了解 D2 入射束流的动量宽度，还是在聚焦面上，测量穿过狭缝(3.2cm)出射的粒子在聚焦面上的动量宽度 (围绕中心动量 P_0 的动量展宽)。测量示意图如图 2-6。D2 磁铁做动量扫描，桌子上 2 闪烁计数器符合，测量在准直中心不同动量的粒子强度，即聚焦面上的动量谱，如图 2-8。横坐标是归一化磁场强度 (对应动量)，纵坐标是归一化粒子强度。聚焦面上的动量宽度由 2 部分组成，一是狭缝限制的动量宽度，二是粒子从真空管道射出到聚焦面要穿过 11 米的空气和一些探测器，由于空气和探测器的散射 (动量越低散射越严重)，使粒子动量展宽。根据图 2-8 中不同动量的相对动量宽度列表 2-2。

表 2-2

中心动量 (P: MeV/c)	相对动量的半高宽 (%)
400	±2.0
600	±1.5
800	±1.4

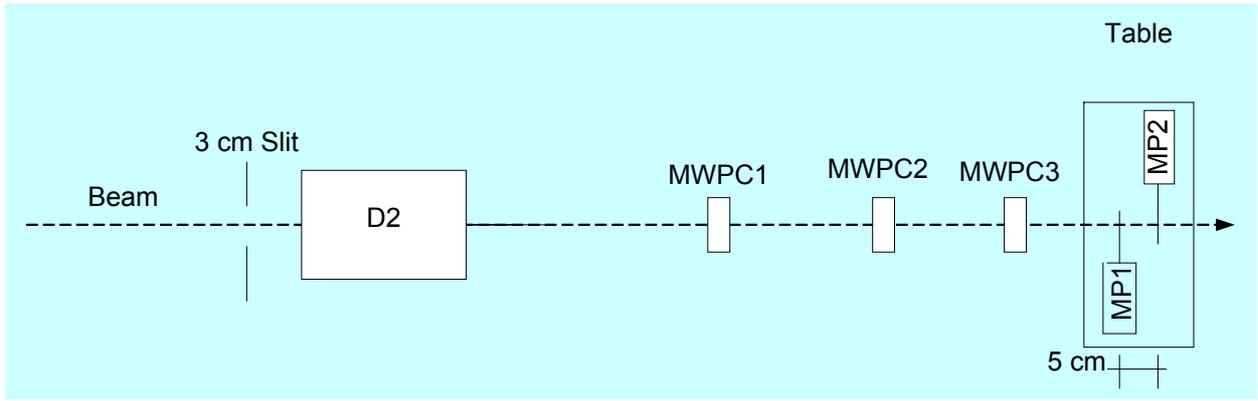


图 2-6 束流截面测量示意图

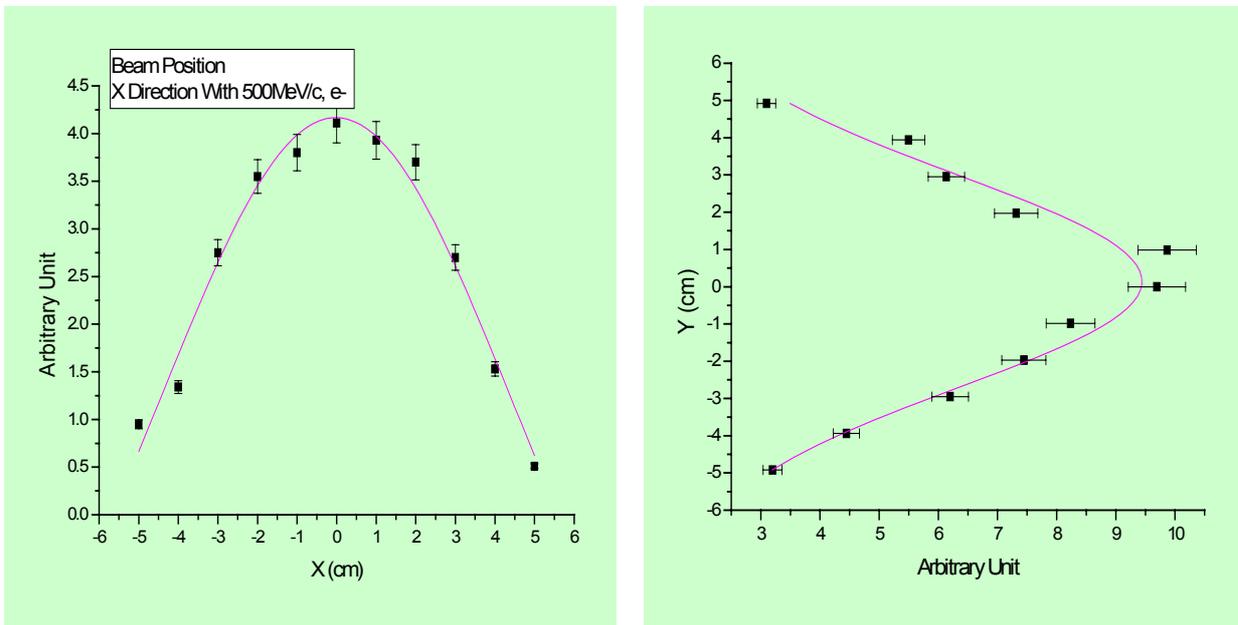


图 2-7 聚焦面上的束流截面

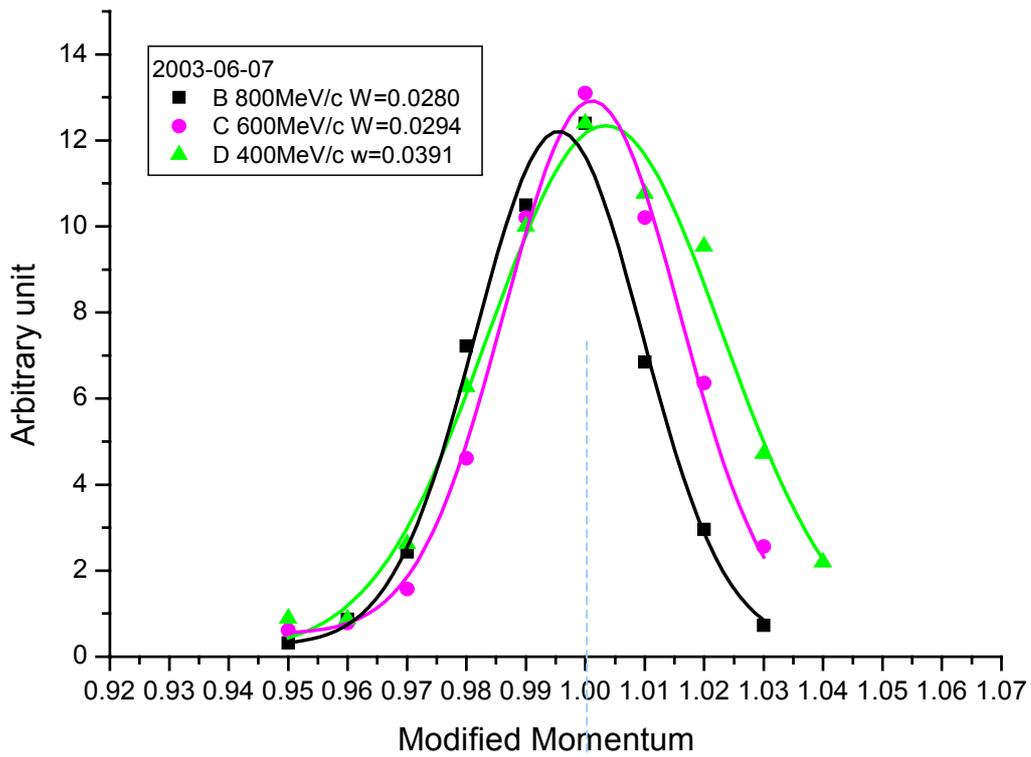


图 2-8 聚焦面动量宽度

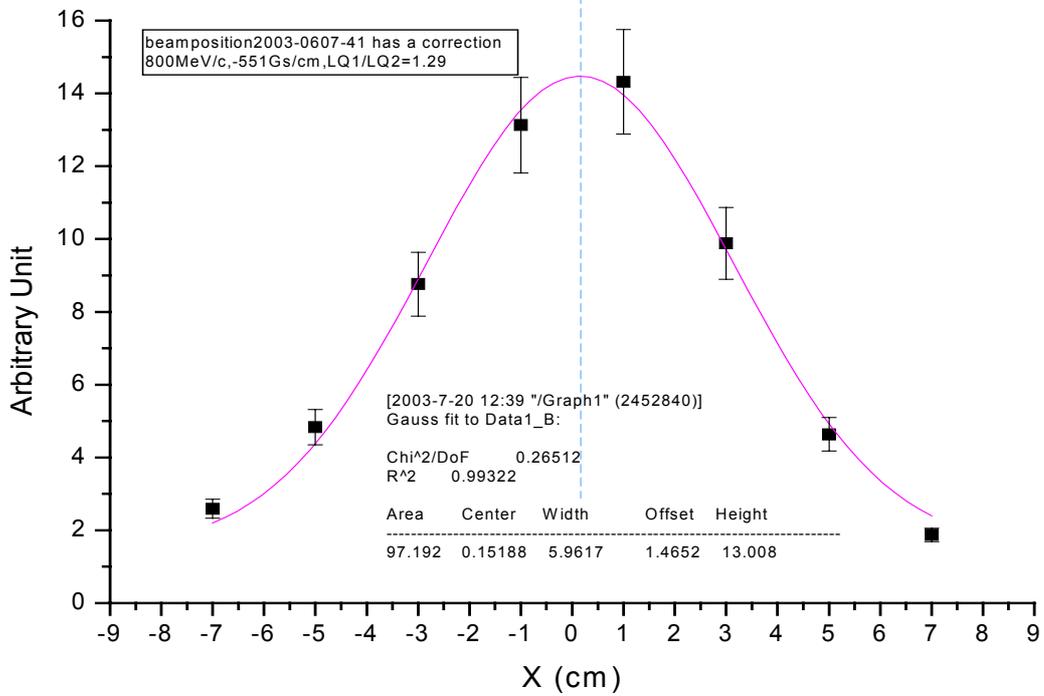


图 2-9 聚焦面上束流在 X 方向分布

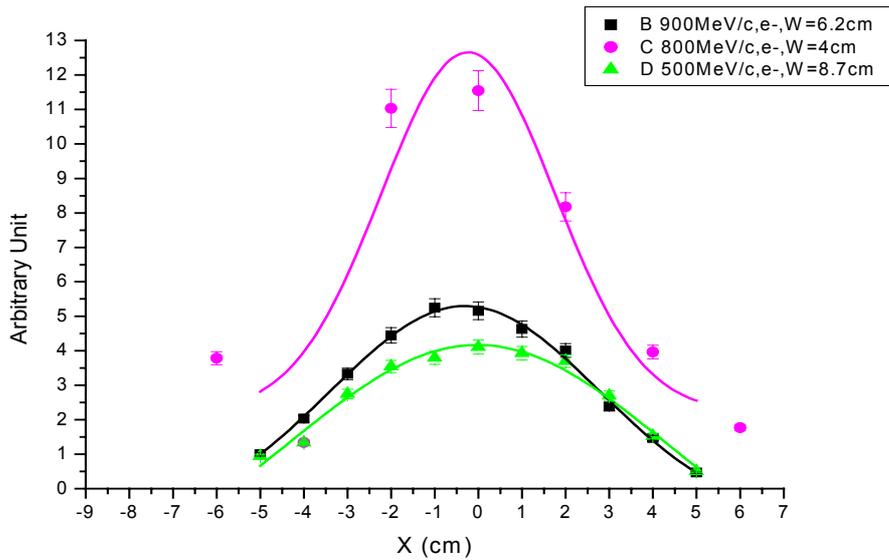


图 2-10 不同动量的束流在 X 方向分布

2, 聚焦面动量分辨

进一步，利用已有的装置（如图 2-6）测量了中心动量 $P_0 = 800 \text{ MeV/c}$ 粒子束在 X 方向分布，如图 2-9。不同动量的 X 方向分布，如图 2-10。以上测量说明，一定的动量宽度，在聚焦面上有相应的 X 方向上的位置散开。在 10 厘米宽的水平位置上几乎包含了 $\pm 3\%$ 动量宽度，以及百分之九十五以上的粒子。粒子飞行，在空气和探测器中散射，造成了击中位置不确定。因此，又在聚焦面上测量了中心动量与 1% 动量偏差的束流的中心位移，如图 2-11。沿束流方向看，左边是高动量击中位置，右边是低动量击中位置。有 1% 动量偏差的束流，相应位置偏移（相对中心位置）10 毫米。假如，在聚焦面上有一个不大于 5 毫米的位置分辨测量，综合动量误差是 P_0 测量误差和聚焦面上位置分辨对应的动量误差组成，所以，动量分辨为：

$$\frac{\Delta P}{P_0} = \pm 0.474\% \pm 0.5\% \approx \pm 1\%$$

800 MeV/c

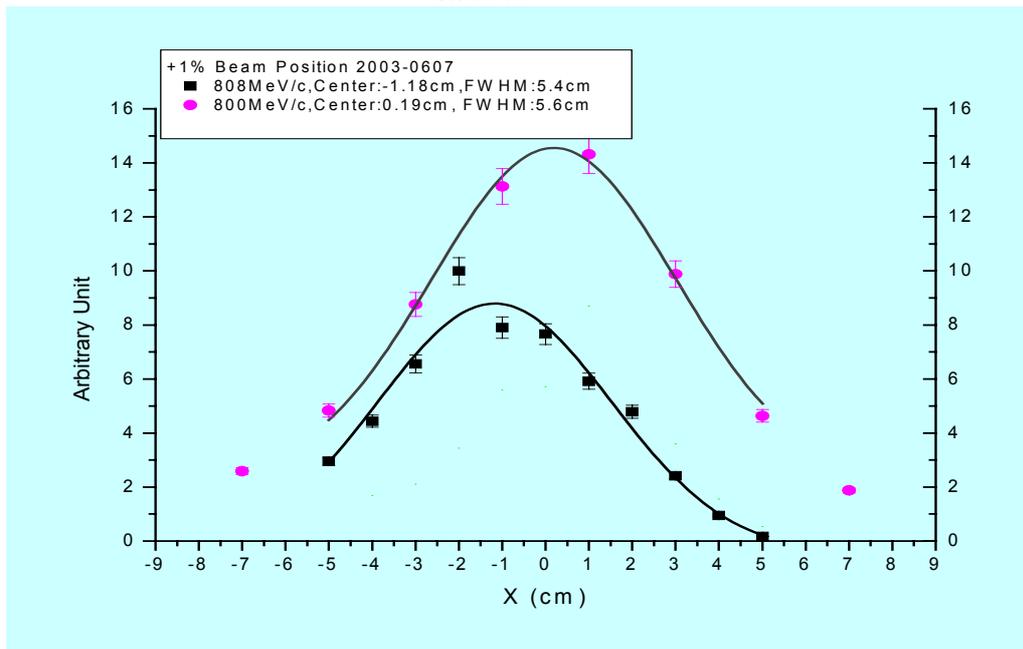


图 2-11 1%动量偏差的束流的中心位移

试验束的在线数据获取系统，纪录了 MWPC 的全部原始数据，其中，击中点位置的 X,Y 方向上的分布如图 2-12。在聚焦面上，MWPC2—X 方向电荷分布，对应聚焦面上的动量谱。

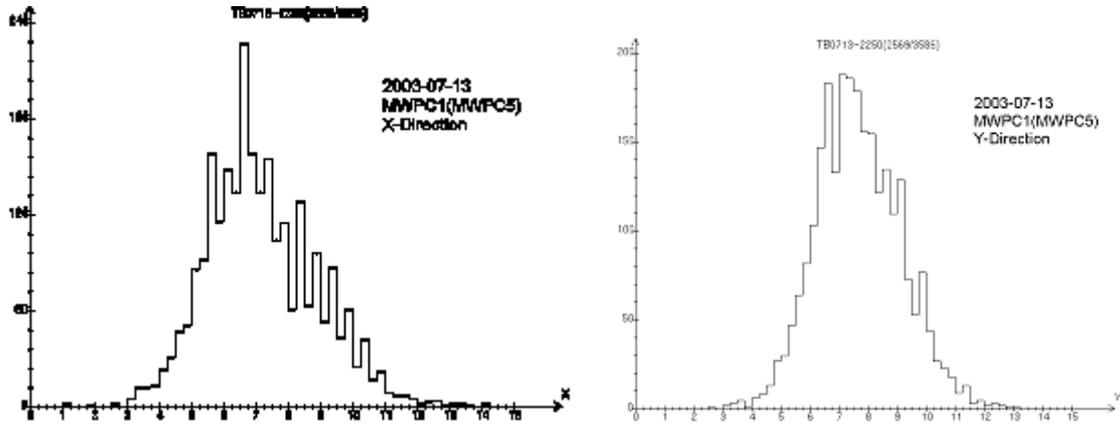


图 2-12 (a) MWPC1 X,Y 方向束流位置分布

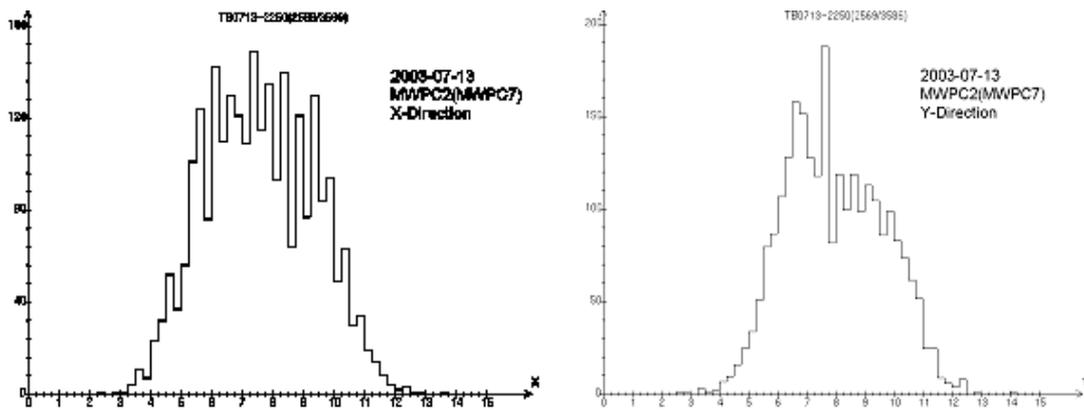


图 2-12 (b) MWPC2 X,Y 方向束流位置分布

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分布变宽。如，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 2-13（纵坐标为计数，横坐标为 Tangent 值）。根据使用要求，利用多丝室 MWPC1 和 MWPC2 位置信息，在离线分析中选取束流截面上一定宽度的束流，以及一定方向角分布的粒子，这样也就选定了一定动量宽度的束流。从而减小或排除因散射引起的粒子位置和动量的不确定。例如，围绕中心动量 $\pm 1\%$ 的束流，在聚焦面 MWPC2 的 x 方向上，围绕束流中心有 ± 5 毫米的位置散开，同时选取 MWPC1 的 x 方向相同宽度的束流，并对所选事例做径迹重建，根据方向角分布选择满足要求的粒子。

如磁谱仪结构图 2-5 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。另外，根据使用要求，多丝室间距可做调整。

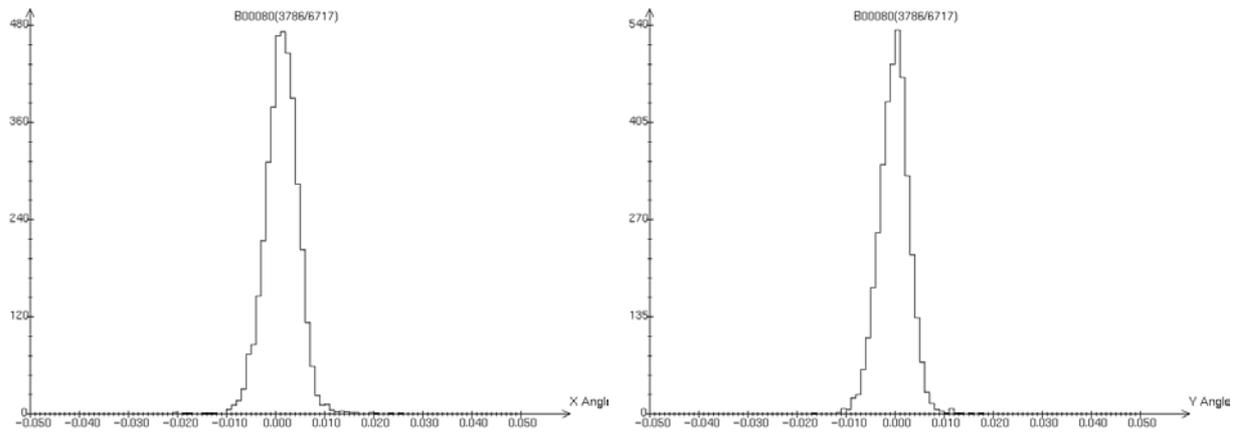
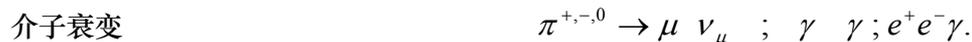
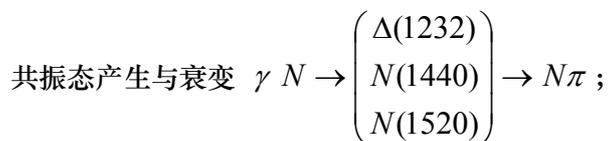
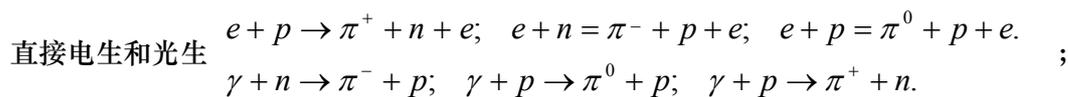


图 2-13 粒子方向角分布 (3*3 平方厘米的束流截面, RUN 号 B00080 数据重建)

2-3 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:



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 2-14 和图 2-16。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 2-15。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 2-17(a)(b)(c), 阴极感应条上的单粒子和多粒子分布如图 2-17(c)(d)。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 : 0	
500	1 : 0.6 : 1.4	1 : 0.1
600	1 : 1.5 : 6.9	

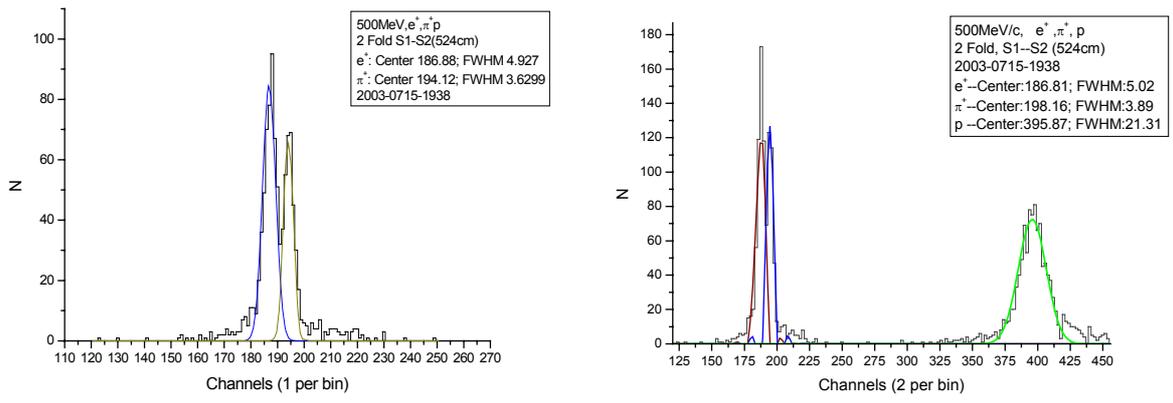


图 2-14 (a) 500MeV/c 混合粒子 TOF 谱 (离线分析时间谱)

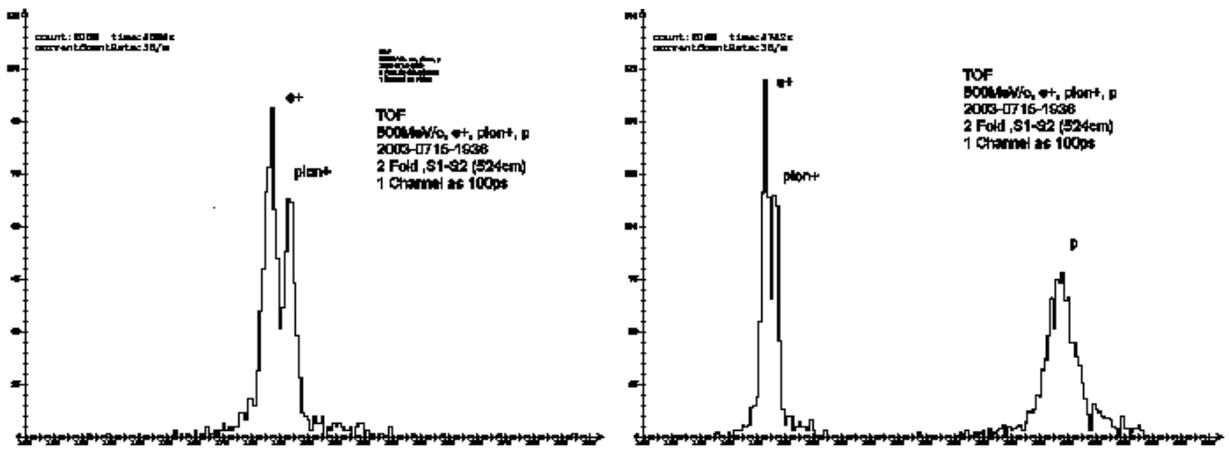


图 2-14 (b) 500MeV/c 混合粒子 TOF 谱 (在线直方图)

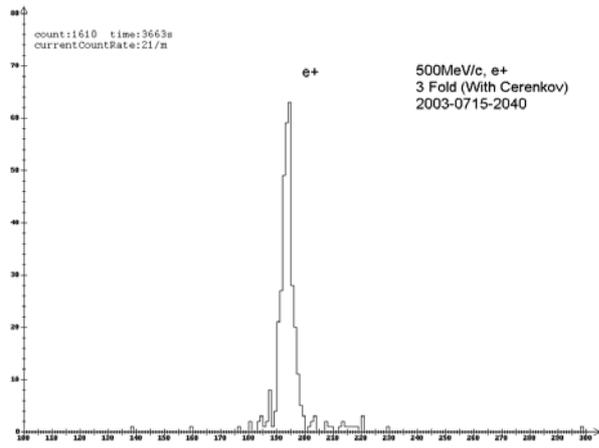


图 2-16 (a) 500MeV/c 在线强子 TOF 谱

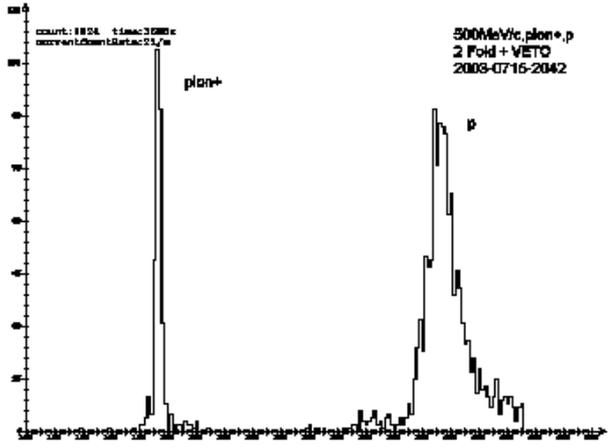


图 2-16 (b) 500MeV/c 在线电子 TOF 谱

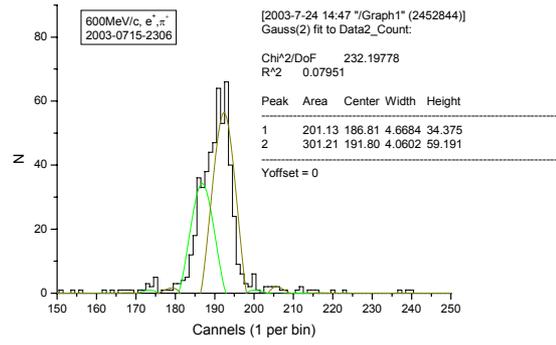
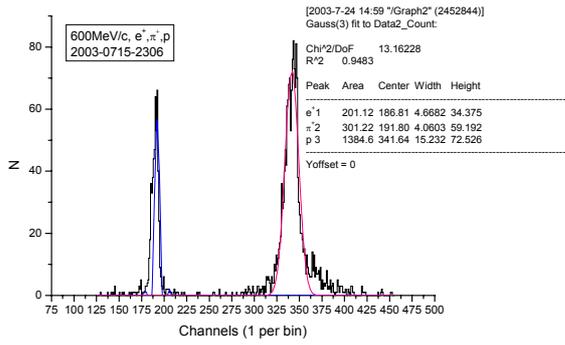


图 2-15 600MeV/c 混合粒子 TOF 谱 (离线分析时间谱)

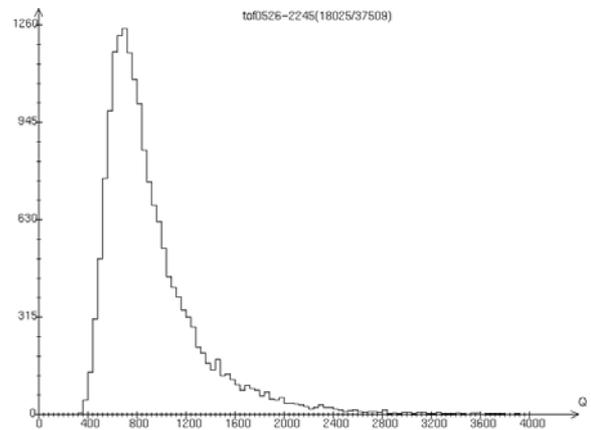
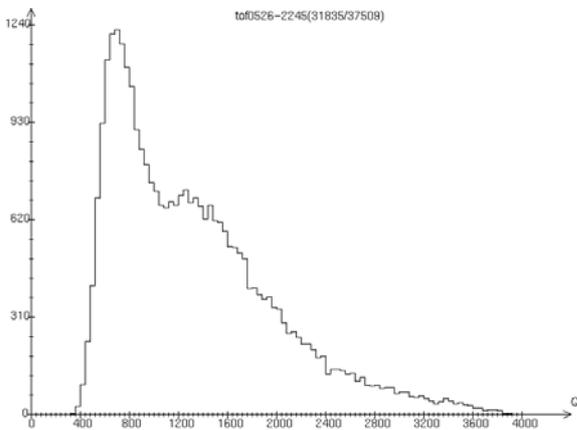


图 2-17(a) 多电子幅度谱(第 1 个峰对应单电子)

图 2-17(b) 单电子幅度谱

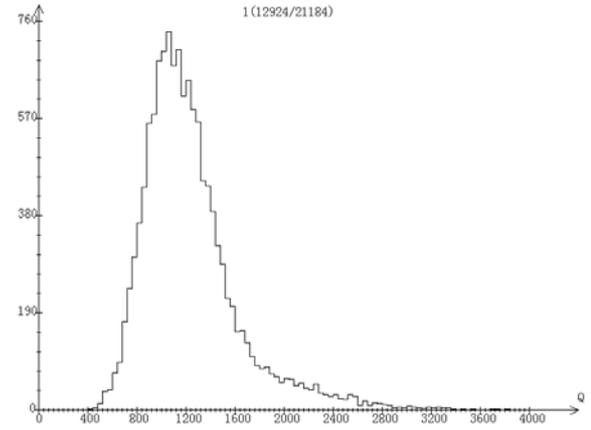
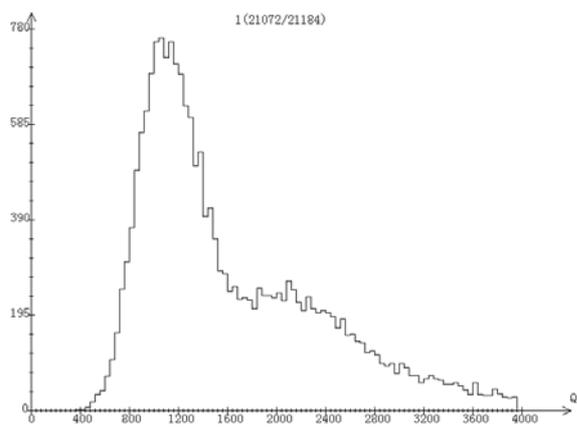


图 2-17(c) MWPC1(MWPC5) 绕 Y 轴旋转 10 度的多粒子 dE/dX 分辨

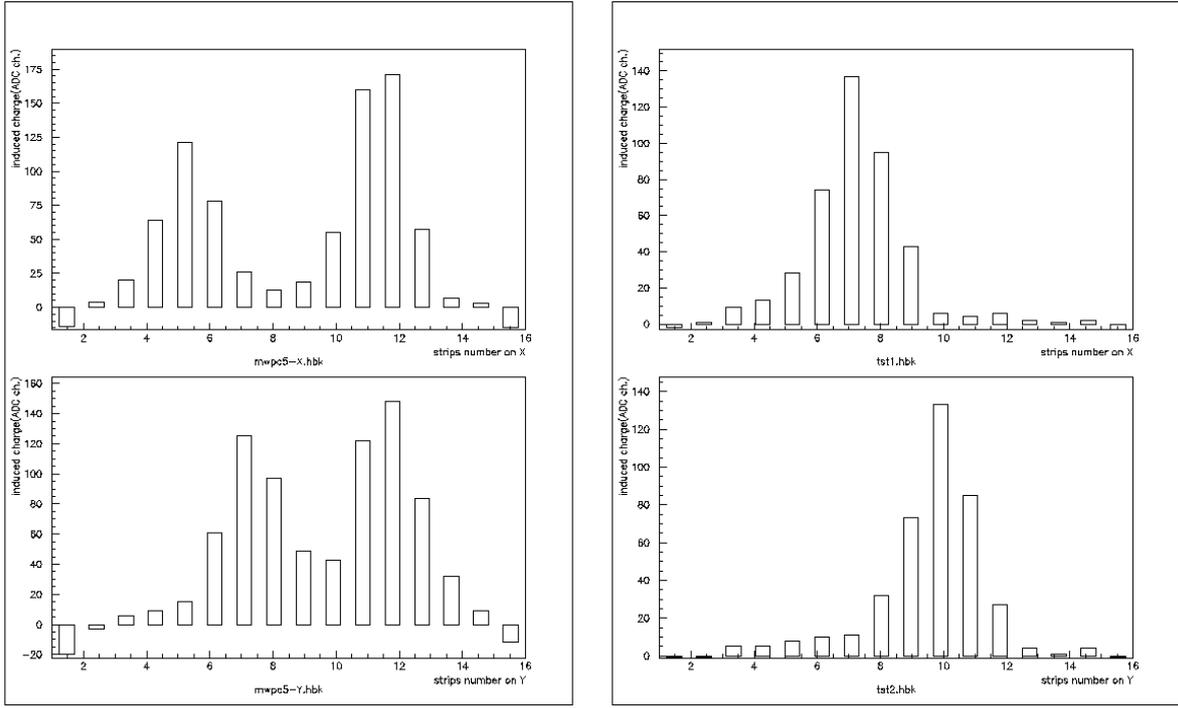


图 2-17(c) mwpc5 阴极感应条上的单粒子和多粒子分布

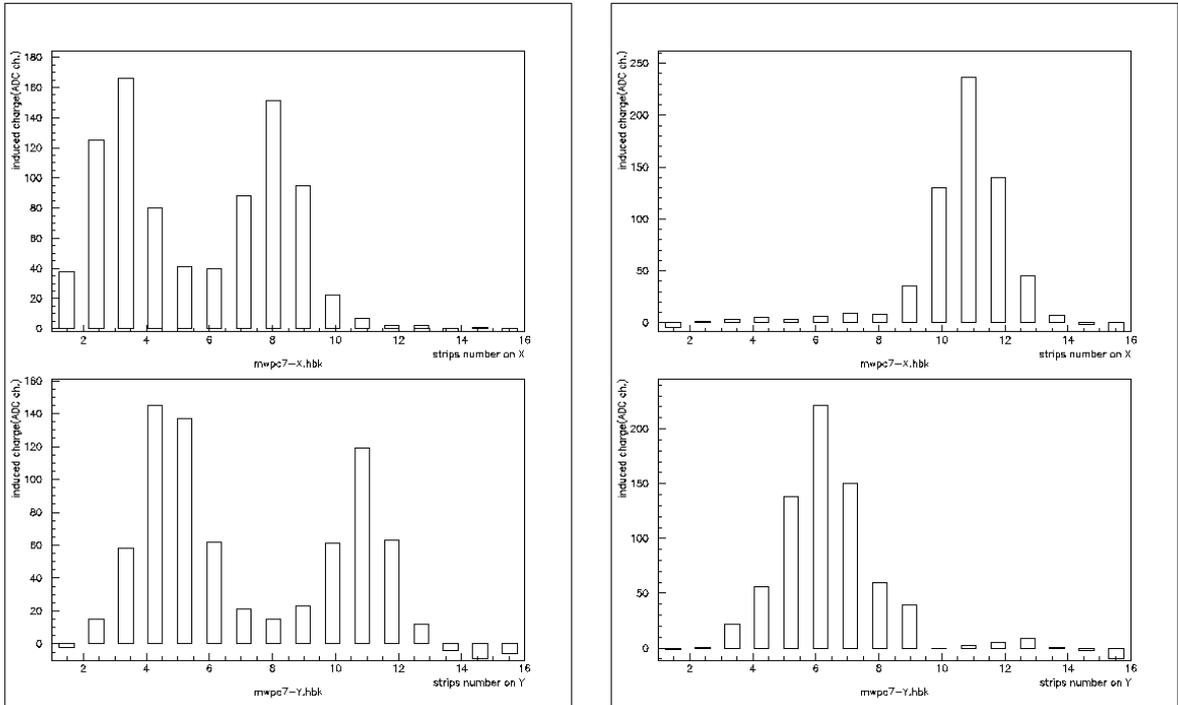


图 2-17(d) mwpc7 阴极感应条上的单粒子和多粒子分布

3, 单粒子计数率

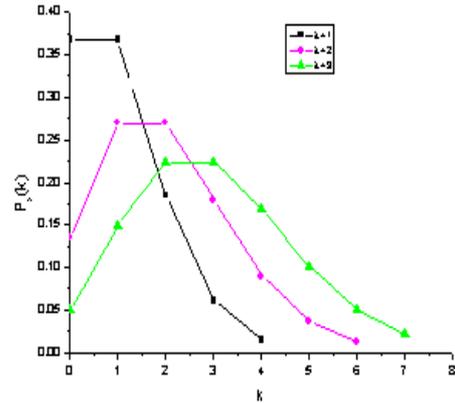
对于 LINAC 的电子束打靶引出, 12.5 赫兹的束流脉冲, 在每脉冲时间内 (2.5ns 宽度) 希望有 1 个粒子或仅仅希望 1 个粒子在磁谱仪末端得到。因为每脉冲可能有的粒子数服从 Poisson 分布, 即 Poisson 分布几率:

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

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 (5Folds=70%), 以及束流输运效率(估计值 75%, 主要是粒子散射), 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 2.25 赫兹, 2 个粒子以上脉冲将有 1.7 赫兹。其中空脉冲 4.6 赫兹。所以, 有粒子计数的总和是 4 赫兹, 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。



目前实验上, 最大计数率 2 赫兹(at 0.8GeV/c electron)。在线判选单粒子选择效率 (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 2-18。

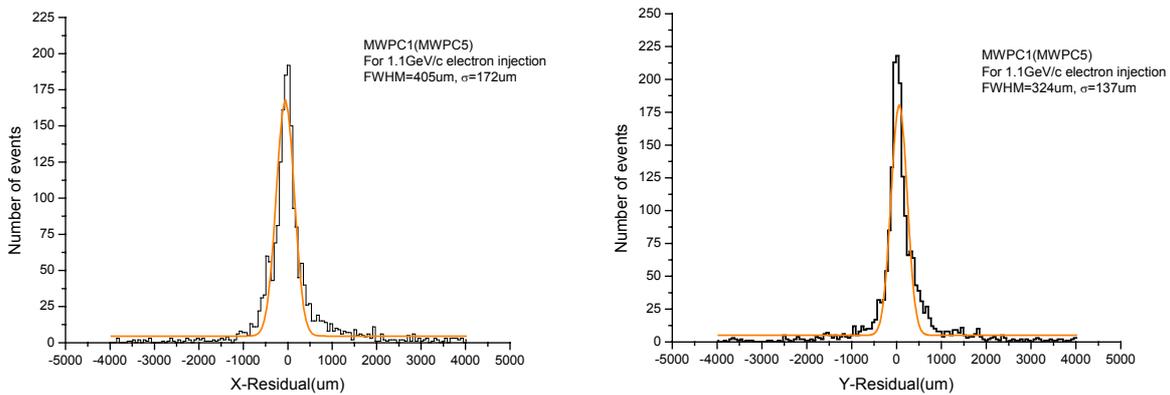


图 2-18(a) MWPC1 X-Y 方向残差分布

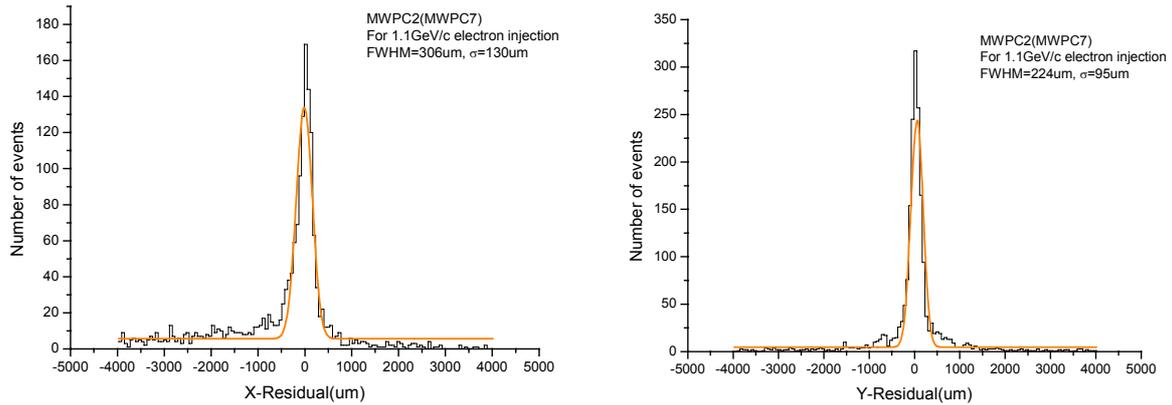


图 2-18(b) MWPC2 X-Y 方向残差分布

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 2-19。

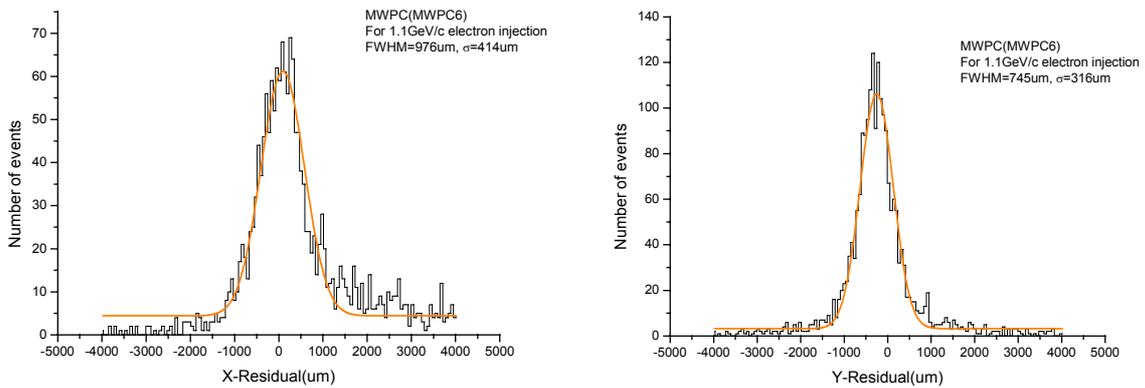


图 2-19 电子学噪声大的多丝室 X-Y 方向残差分布

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 2-20。

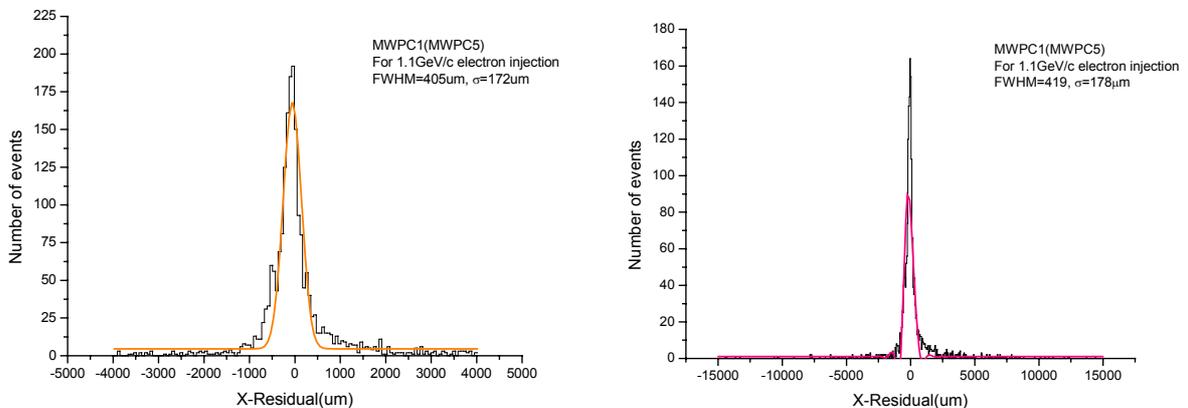


图 2-20 不同拟合参数的 FWHM 变化

另外，当这个室体运行在混合引出束 (e^+, π^+, p) 的情况下，定位分辨明显变差。如图 2-21，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。

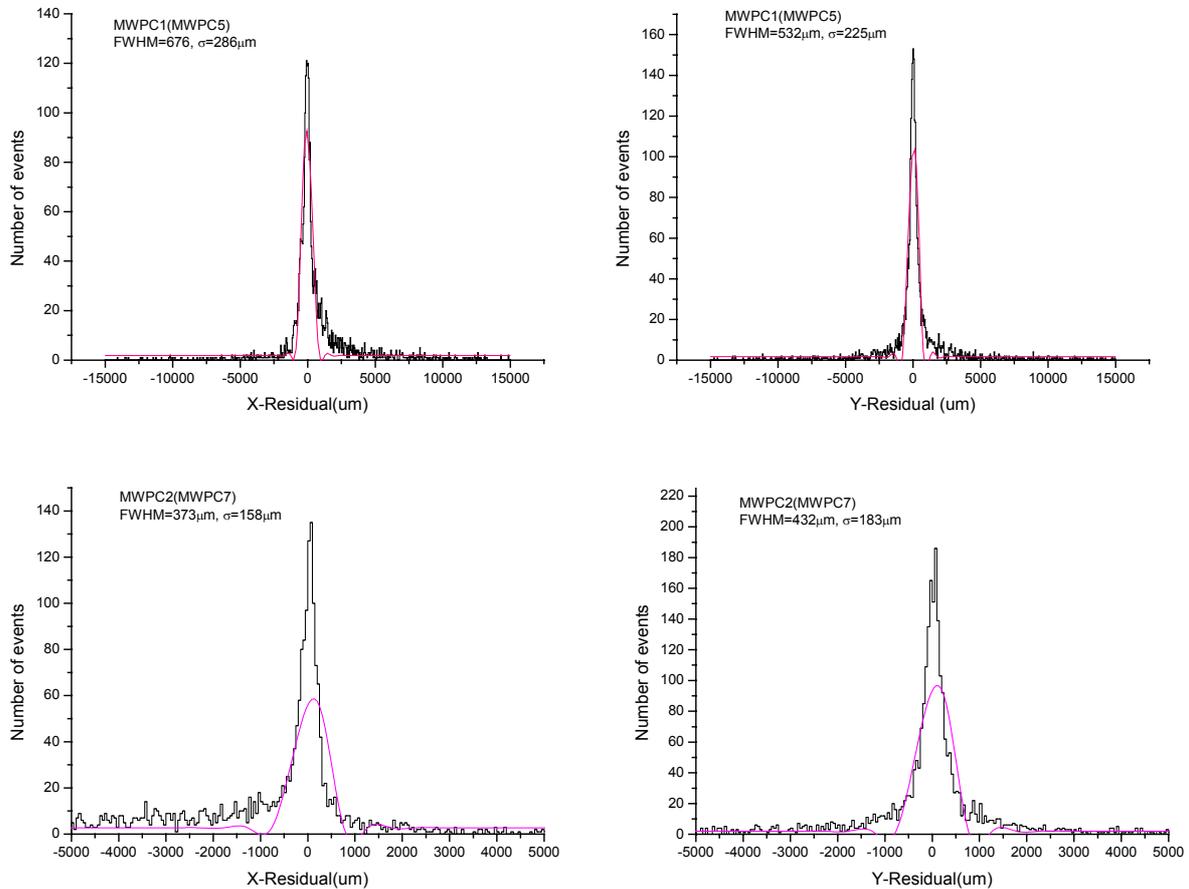


图 2-21 混合束 (e^+, π^+, p) 入射的定位分辨

2-4 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 2-22 (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 2-23。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, γ , μ ...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 μ Sv/h。(加速器中心防护组提供)

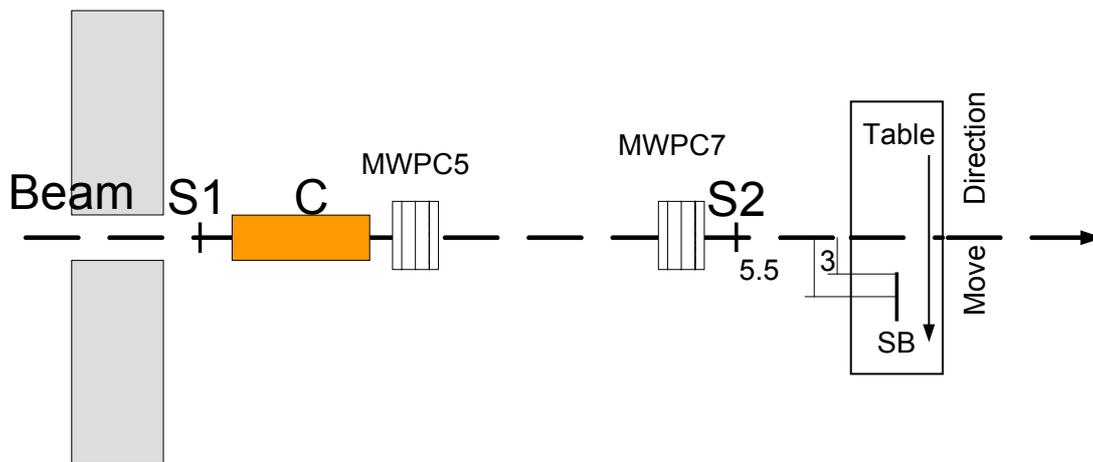


图 2-22 本底计数测量布置图

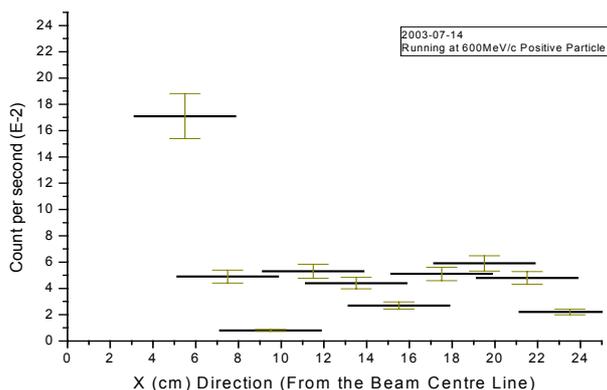


图 2-23 试验区本底水平方向分布

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。

4, 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 2-24。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 2-25。

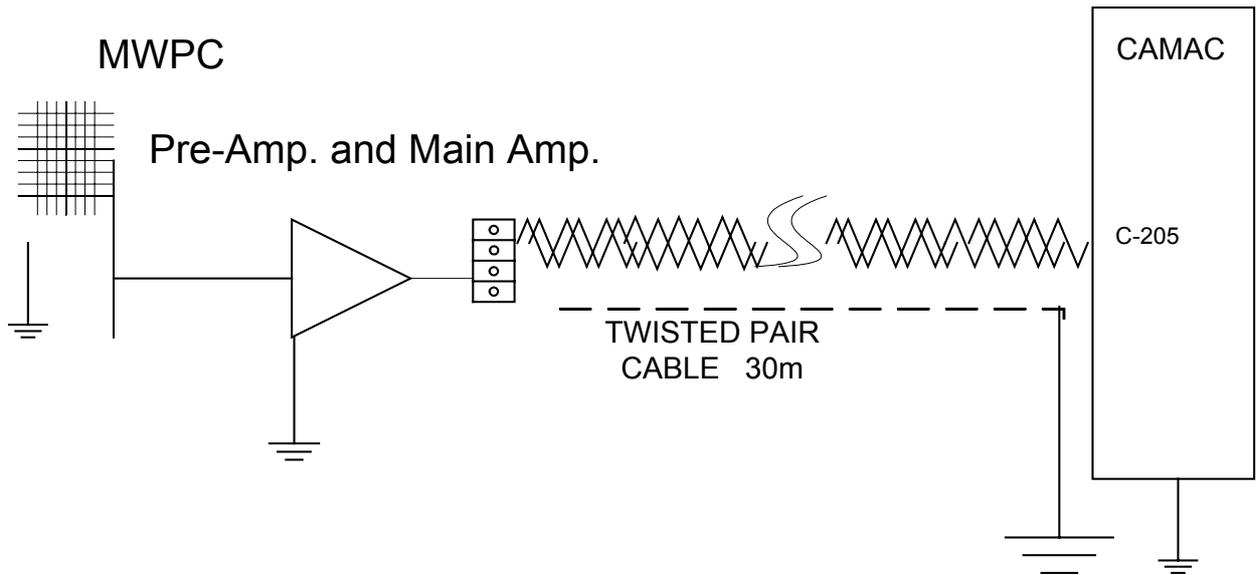


图 2-24 丝室电子学框图

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 2-26。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。

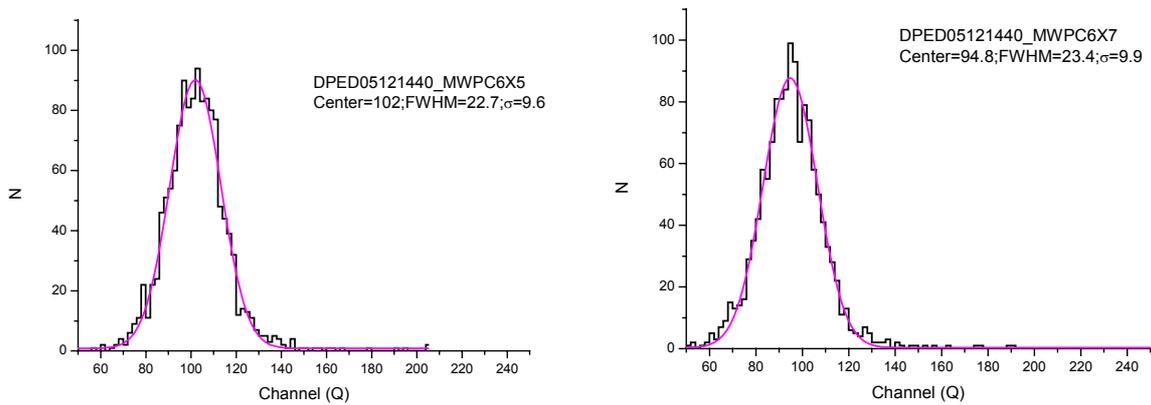


图 2-25 ADC 的台基分布(处理前)

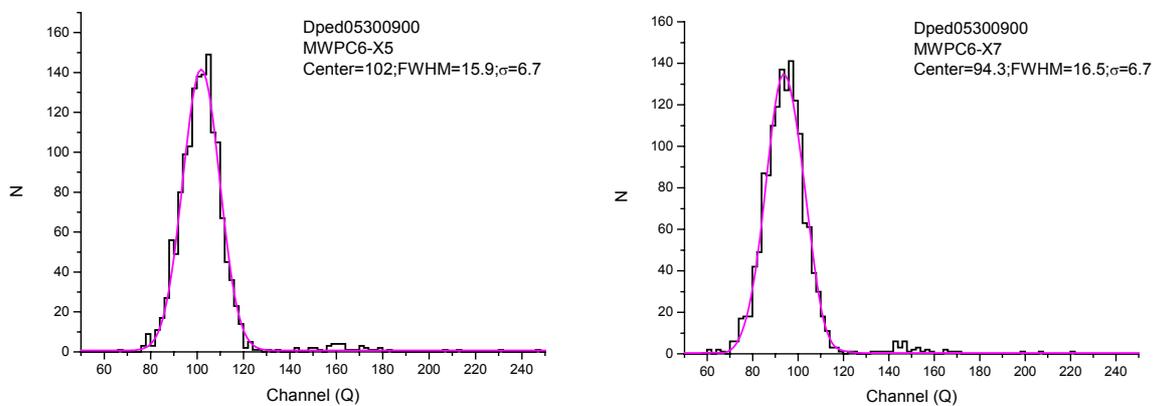


图 2-26(a) MWPC6 ADC 的台基分布(处理后)

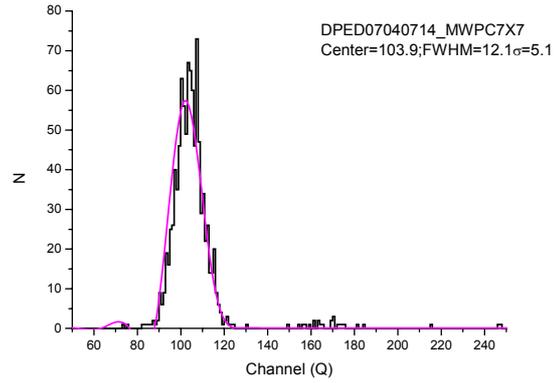
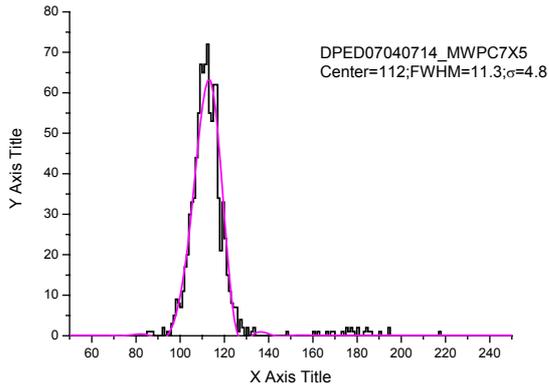


图 2-26(b) MWPC7 ADC 的台基分布(处理后)

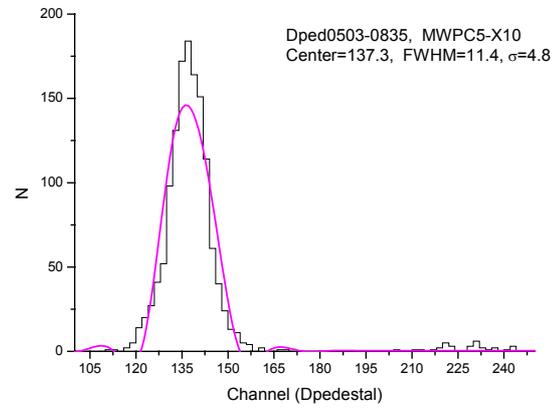
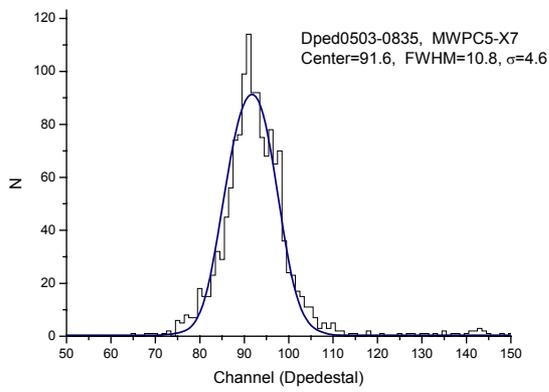


图 2-26(c) MWPC5 ADC 的台基分布(处理后)

