

BEPC-LINAC 试验束上 1GeV/c 多粒子磁谱仪的设计和性能测量*

李家才¹⁾ 张良生 胡春良 吴元明 崔象宗

刘正全 张少平 周宝庆 郑林生

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 试验束上 2Q2D 结构的磁谱仪系统由 2 块二极磁铁和 2 块四极磁铁以及位置灵敏探测器组成。该磁谱仪的接收立体角 5×10^{-4} Sr, 动量范围 0.2-1.3 GeV/c。测量了聚焦面上的束流截面和动量谱。介绍了一种测量电子与质子飞行时间差的动量测量方法。

关键词 磁谱仪 狭缝 动量谱 飞行时间

1 引言

高能探测器的试验和性能测量最有效的方法是利用加速器的已知粒子束,其中单粒子束流试验是必不可少的方法之一。利用加速器的初级束流打靶产生次级粒子并引出,形成不同应用或研究需要的次级粒子束。引出次级束流,一条合适的束流运输线或分析线必不可少。这样的次级束流线在各个高能加速器实验室都有一条或多条^{[1][2][3]}。利用现有的 BEPC(北京正负电子对撞机)电子直线加速器(LINAC)的电子束,快引出方式打靶产生的次级粒子(e^{\pm} , π^{\pm} , p ...)。并利用磁铁的动量分析能力和聚焦能力组成束流运输线,引出并形成探测器的试验束流线,这也是高能所试验束发展和应用的一个主要目标²。由于电子束目前的最高能量为 1.3 GeV,为了获得高能量段的更大的次级粒子产额,以及利用现成的聚焦磁铁的尺寸,从 15 度产生角引出次级粒子是合适的。我们参考了 KEK-PS 上的 T1 试验束线³,并根据电子直线加速器束流的特点和现成的设备及空间条件,以及探测器对试验束流的要求,设计了这套 2Q2D 结构的磁谱仪系统⁴。2Q 为 2 块聚焦磁铁 LQ1 和 LQ2, 2D 为 2 块偏转磁铁 D1 和 D2。该系统除了 2Q2D 方式的束流传输结构外,还包括阈式契伦科夫计数器,定位闪烁计数器和位置灵敏的 2 维读出的多丝正比室。数据获取中利用符合技术在线选择电子或强子,在离线分析中进行径迹重建并选择。这样的磁谱仪系统能满足探测器试验对束流性能的不同要求^{[4][5]}。例如,北京谱仪(BES)上的飞行时间探测器束流试验,它对入射粒子的能量分辨要求不象簇射量能器那样高,但他们的试验测试点多,累积数据量大,需要试验束流有较高的计数率,以及要知道入射粒子的位置和方向。簇射量能器的束流试验除这些要求外,还要求入射粒子有较好的能量分辨(1%左右)。

2 磁谱仪的结构和参数

不同的应用要求,磁谱仪的设计差别很大。例如,用于次级低能离子束分析的 QMG/2 磁谱仪^[6],基本结构为 QMDM2D,他分析的动量范围较窄,但动量分辨率高($\Delta P/P=0.5-1.8 \times 10^{-4}$)。Brookhaven 实验室用于多粒子末态产生分析研究的 MASS 装置(Multiparticle Argo Spectrometer System)^[7], MASS

* 国家 BEPC 改进专项经费资助

1) E-mail: lijc@ihep.ac.cn

2) 李家才,高能所试验束的发展与应用,档案分类 HA3983, N01419-7

3) M.Takasalei et al, KEK ENGINEERING NOTE, T1 Beam Line, 8.11.1985

4) BEPC 直线加速器分支线改进和 e^- 、 π^- 试验束——技术设计报告,档案分类 HA3983, N01419-7

包括高动量谱仪(2D), 低动量谱仪(D)和顶点谱仪(Argo), 以及火花室, 位置灵敏探测器, 闪烁计数器和契仑科夫计数器等。因此 MASS 具备粒子位置探测, 质量鉴别和动量分析等功能。

粒子探测器的束流试验需要已知粒子的种类和能量, 以及相应的能量分辨。而且需要尽可能宽敞的试验空间, 较低的试验区本底。电子直线加速器束流打靶可产生不同种类的次级粒子同时, 低能电子和光子本底也非常高⁵。所以, 探测器的束流试验区应尽可能远离打靶区, 便于靶区的屏蔽和降低实验区的本底。但远离打靶区的探测器接收角很小, 计数率低。为了减小本底并提高计数率, 一个相应的 2Q2D 结构的束流输运和磁谱仪系统是合适的。2Q 满足对束流的 X 和 Y 方向上的聚焦, 增加了次级粒子接收角 (5×10^{-4} 单位立体角), 提高了计数率。2 块偏转磁铁 D1 和 D2, 他们的偏转角分别为 $+14^\circ$ 和 -17° (沿束流方向顺时针偏转为正)。它们对来自靶上的不同能量的次级粒子进行动量选择。这套简结的 2Q2D 磁谱仪系统的结构设计如图 1, 磁谱仪中的 2 块 D 铁分别向不同的方向偏转结构, 具有一定的消色散特性⁶, 所以这种结构在聚焦面上可获得较高的粒子流强。在束流输运参数匹配上, 希望在第一级的偏转磁铁 (D1) 上有较高的动量色散。便于通过动量狭缝来限制束流聚焦面上的动量误差。该磁谱仪长 22 米, 其中前端真空盒长 10 米。动量范围 0.2-1.3GeV/c, 要求动量误差 $\Delta P/P=1\%$ 。

该磁谱仪的磁铁元件 (LQ1, LQ2, D1, D2) 的磁场测量参数和束流输运结构参数如表 1, 根据这些基本参数和束流线性要求, 利用 TRANSPORT 程序 (专门的束流输运计算程序) 计算具体磁元件的参数设置。反复调试计算结果显示⁶, 在以上特定结构的限制下, 束流在 D1 磁铁下游获得了满足要求的动量色散特性。输运计算的束流包络图如图 2 显示, 当 D1 磁铁下游的 2 个狭缝 (也称动量狭缝) 宽度限制在 5 厘米处, 在聚焦面上确定的粒子击中区域内, 其动量误差 (没有考虑空气散射) 在 1% 附近。空气中的粒子散射对动量误差的影响将在下面详细讨论。

表 1 磁铁和输运结构参数

元件类型(偏转角)	最大功率 (VA)	最大磁场	有效长度 (L_{eff})	Gap/(漂移长度)
次级粒子产生靶				
无场漂移空间				(249cm)
LQ1	1500×159	1.75KGs/cm	53.5cm	孔径 70mm
无场漂移空间				(51cm)
LQ2	1500×159	1.75KGs/cm	53.8cm	孔径 70mm
无场漂移空间				(172.8cm)
D1 ($+14^\circ$)	480×90	1Tesla	107cm	120cm
无场漂移空间				(414cm)
D2 (-17°)	1000×86	1.2Tesla	106.42cm	100cm
无场漂移空间				(800cm)

由于磁铁的安装误差和磁场测量误差, 在束流线运行调试中对计算参数进行了优化和参数匹配 (LQ1 与 LQ2 的比例, D1 与 D2 的比例), 获得了一组新的实际运行参数。目前磁谱仪负粒子运行时的一组参数如表 2 (正粒子运行改变参数符号)。

表 2 运行参数 (LQ1 与 LQ2 比值为 1.27)

P_0 (GeV/c)	LQ1 (A)	LQ2 (A)	D1 (13.87°) (A)	D2 (17.58°) (Tesla)
0.3	-100.03	86.44	89.12	-0.28734
0.5	-165.81	142.72	149.24	-0.4789
0.6	-198.70	170.86	179.30	-0.57468
0.8	-264.48	227.13	239.42	-0.76624

5) 张良生, 蒙特卡罗模拟档案分类 HA3983, 1419-1

6) 胡春良, 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, 档案分类 HA3983, 1419-4

1.1	-363.15	311.55	329.59	-1.05358
-----	---------	--------	--------	----------

Beam spectrometer

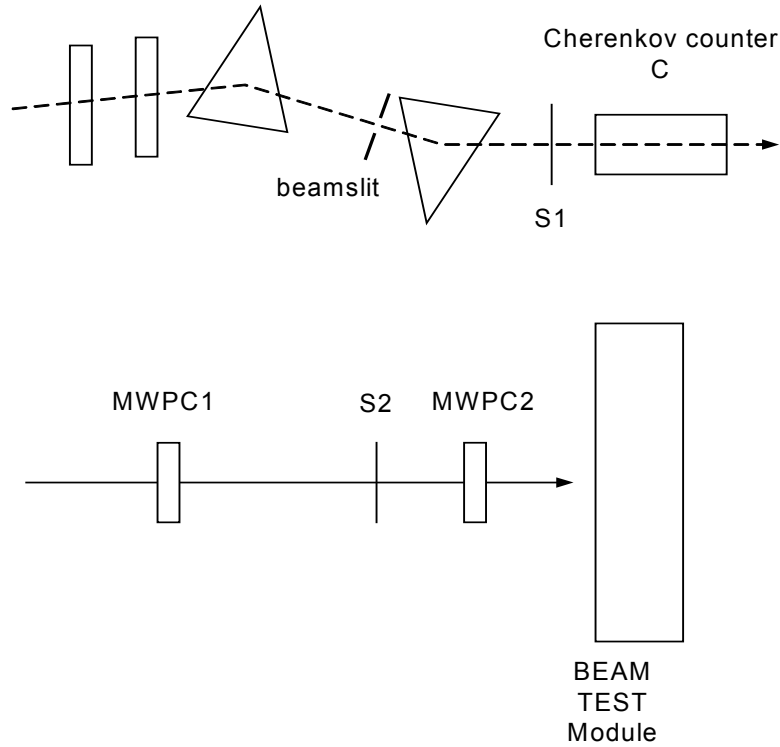
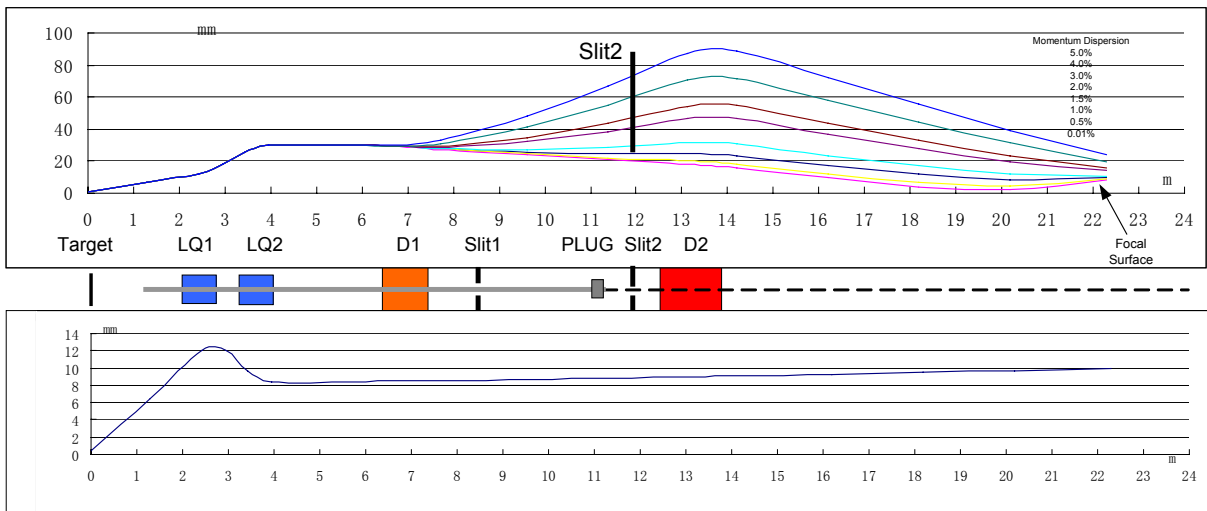


图 1 E3 试验束流线结构



The TEST BEAM of E3
TEST BEAM GROUP 2003/05/17

图 2 2Q2D 磁谱仪束流包络图

2.1 中心动量

在线运行的中心动量刻度，是根据 D2 磁铁的实时磁场测量值 (0.01%精度的 DTM-151 特斯拉计测量) 和磁铁的有效长度以及偏转角的准直测量值，由下式计算给出。

$$P_0 = 0.29979B \cdot \rho. \quad \rho = L_{eff} \frac{1}{2 \sin(\phi_0 / 2)}. \quad (1)$$

上式动量单位(GeV/c)，磁场单位(Tesla)，偏转半径单位(M)。

把磁场测量得到的磁铁有效长度 $L_{eff,at Y=0} = 106.42$ 和准直测量得到的偏角 $\phi_0 = 17.5769^0$ ，以及运行的实时磁场强度 B ，代入(1)式，计算粒子的中心动量。

中心动量误差是计入以上各种参数测量误差得到的，如：

$$\Delta L_{eff} = 0.347; \quad \Delta \phi = \left| \pm 0.00254^0 \right|_{Max} = 4.4 \times 10^{-5} Rad; \quad \Delta B / B = 0.1\%, \quad \text{其最大相对误差为}$$

$\Delta P / P = 0.44\%$ (ΔP 为准直和测量误差引入的动量误差)。

2.2 粒子散射引起的动量误差估计：

E3 试验束的束流输运程序的动量分析计算说明，当狭缝宽度(SLIT2)为4厘米时，可获得动量误差为 0.5% (在真空条件下)的束流。实际的束流线从真空管道出口直到试验测量点，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。

只考虑粒子在 D2 磁铁中及其上游的空气和真空窗上的散射，以及动量狭缝上的散射。当散射粒子进入磁铁后(相对中心粒子入射角的变化)，其动量误差 (δP)，可由粒子偏转半径的改变来度量。如偏转角 $\phi = \phi_0 + \delta\theta$ 和磁铁有效作用长度 $L = L_{eff} + \delta L_{eff}$ 。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(1)式，最大动量误差

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

最大相对误差

$$\frac{\delta P}{P_0} = \left(\frac{\delta L_{eff}}{L_{eff}} + \frac{\delta\theta}{2 \tan(\phi_0 / 2)} \right). \quad (3)$$

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)，计算非平行入射束和散射粒子的情况。粒子在狭缝上的散射示意图如图 3。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 阴影部分。

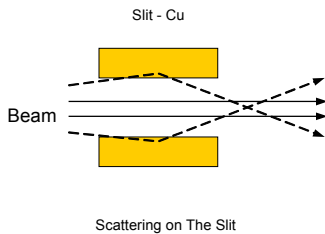


图 3 粒子散射示意图

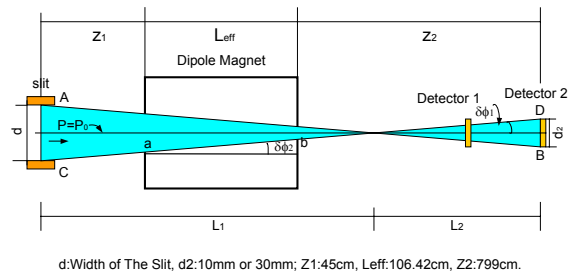


图 4 最大接收角示意图

考虑粒子在狭缝上的散射，该狭缝有效宽度增宽系数^[8]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，狭缝有效宽度是 $d_1 = d\xi = 40$ 毫米

(当狭缝的准直宽度 $d = 30$ 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

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

$$\tan(\delta\theta) = \frac{d_1 + d_2}{2(z_1 + L_{eff} + z_2)}, \quad \delta\theta = \tan^{-1} \left(\frac{d_1 + d_2}{2(z_1 + L_{eff} + z_2)} \right), \quad (5)$$

这里 $\delta\theta = \delta\phi_1 = \delta\phi_2$ (弧度)。式 (5) 说明, 狭缝宽度和探测器的宽度正比于接收角。把 d_i 值和图中标出的距离值代入式 (5), 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

$$\delta\theta = 0.151^\circ = 2.63 \times 10^{-3} \text{ rad} \quad (3.68 \times 10^{-3} \text{ rad}, 4.73 \times 10^{-3} \text{ rad}) \quad (6)$$

δL_{eff} 带来的误差非常小, 计算中忽略, 把 $\phi_0, \delta\theta$ 代入 (3) 式计算得到

$$\frac{\delta P}{P_0} \leq 0.85\% \quad (1.2\%, 1.5\%), \quad (7)$$

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, 根据式 (1) 给出粒子动量 P_0 , 考虑机械准直误差, 磁场测量误差以及粒子散射引入的偏转半径的改变, 其动量的均方误差为

$$\frac{\Delta P}{P_0} \leq (0.44^2 + 0.85^2)^{1/2} \% \prec 1\% \quad (1.3\%, 1.6\%) \quad (8)$$

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。计算结果证明, 该动量谱仪在聚焦面中心 1 厘米的水平宽度上, 满足了动量误差 $\Delta P/P=1\%$ 的要求。

3 性能测量

3.1 聚焦面束流截面测量

束流截面测量安排如图 5。D1 下游的真空管内的控制狭缝 (SLIT1) 宽度 5 厘米。运动平台上的 2 个闪烁计数器作 2 重符合 (重叠面积 2×3 平方厘米)。分别在水平和垂直方向做位置扫描, 移动步长 1 厘米。测量了 500MeV/c 动量的电子在不同位置上的归一化粒子强度谱 (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 6。由于粒子在空气和探测器上的散射, 使束流截面增宽。聚焦面上粒子强度分布的 FWHM 为 4-5 厘米。

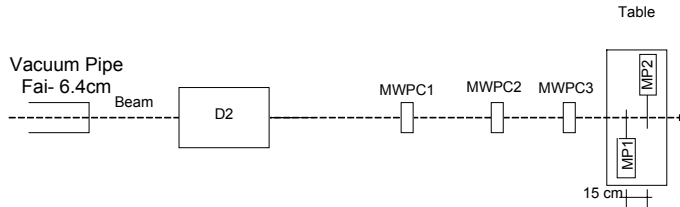
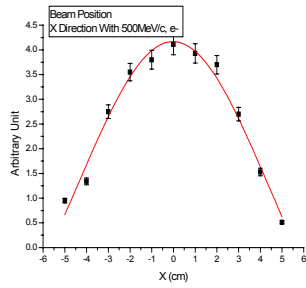
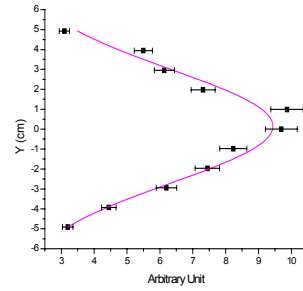


图 5 动量谱测量示意图



(a) X方向



(b) Y方向

图 6 聚焦面上的 500MeV/c 束流截面

3.2 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。通过聚焦面上的动量谱测量将直接测到动量分辨。测量条件包括：(1) 聚焦面测量区域：水平方向 2 厘米，垂直方向 3 厘米；(2) 闪烁计数器 (S1, S2,) 符合计数与打靶流强归一化；(3) 没有第 2 个狭缝限制；(4) D2 磁铁下游包含的簇射介质有 8.5 厘米空气，契合可夫计数器和 2 块多丝正比室。测量探测器是 2 个闪烁计数器，他们之间的距离为 15 厘米（闪烁计数器重叠截面水平方向 2 厘米，垂直方向 3 厘米），并做 2 重符合，记录相同时间内不同动量下的强度计数。D2 磁铁作动量扫描，每一个扫描点步长为 $1\%P_0$ 。测量结果如表 2。电子动量谱，如图 7。由于较低动量的粒子在空气中有更大的散射，所以其动量分辨也变差。另外，测量也说明磁铁动量设定值 P_s 与动量谱拟合给出的中心动量值有很好的线性关系，标准偏差为 $0.5\text{MeV}/c$ 。磁铁的动量线性如图 8。

表 2 (聚焦条件: $LQ1/LQ2=1.27$; $LQ1=-551\text{Gs}/\text{cm}$ 对应 $1.1\text{GeV}/c$ 动量)

中心动量 P_0 (MeV/c)	FWHM (归一化宽度)	动量分辨 (σ/P_0) %
800	0.032	1.36
500	0.038	1.61

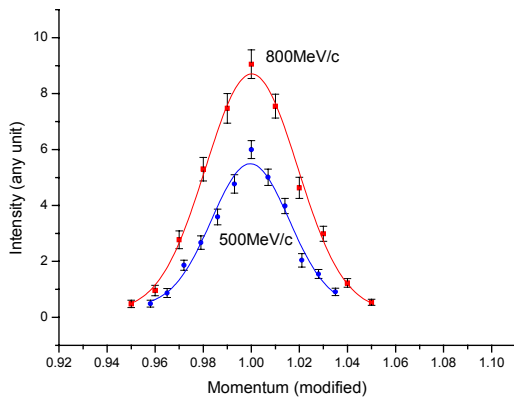


图 7 束流动量谱

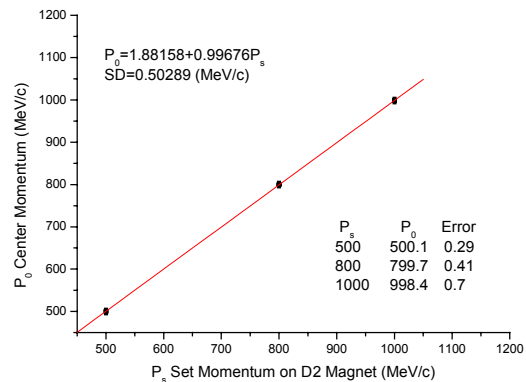


图 8 动量线性

3.3 中心动量粒子的飞行时间 (TOF) 测量

为了验证 D2 磁铁给出的中心动量值，我们利用了一个参考方法，即利用电子与质子的飞行时间差来刻度中心粒子动量，这样，同一物理量的不同测量方法给出了相互的比较和验证。利用 2 个闪烁计数器，并在粒子飞行的中心轨迹上拉开一定距离，同时测量正电子与质子的飞行时间谱，利用正电子与质子的飞行时间差计算质子的动量，这样也避免了绝对时间测量中的系统误差。TDC 时间刻度误

差是 0.1%。在动量为 511.6MeV/c（2003-11-03, 14:04 动量谱仪运行数据）的混合粒子 TOF 谱中，如图 8，质子与电子飞行时间差为 $\Delta T_{pe}(ns) = xc3 - xc1$ 。根据相对论关系 $W^2 = W_0^2 + p^2c^2$ ，和关系式 $m_p = m_{p0}(1 - \beta_p^2)^{-1/2}$ ，

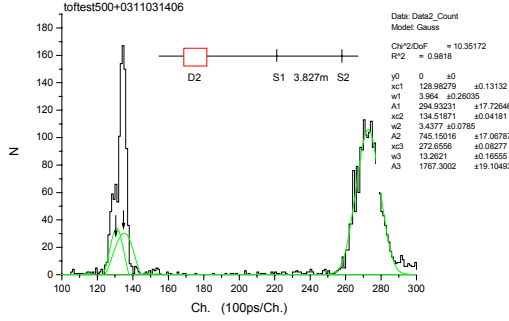


图 8 混合粒子 TOF 谱

因为

$$\Delta T_{pe} = \left(\frac{1}{\beta_p c} - \frac{1}{\beta_e c} \right) \cdot S, \quad (9)$$

即有

$$\beta_p = \frac{S}{\Delta T_{pe} \cdot c + S/\beta_e} \quad (10)$$

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

根据图 8 的飞行时间谱拟合得到： ΔP_{pe} （电子和质子中心时间差）=14.367(ns)， $\beta_p=0.47049$ ，质子的动量由下式计算

$$p_p (MeV/c) = m_{0p} \left((1 - \beta_p^2)^{-1} - 1 \right)^{1/2} \quad (11)$$

得到

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

飞行时间测量表明，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，质子的动量降低了 $\Delta P_{loss} = 511.6 - 500.28 = 11.32 MeV/c$ 。蒙特卡罗模拟计算输入的初始动量为 511.6MeV/c 的质子，计算得到，在空气和探测器中质子平均动量降低了 10.9MeV/c，其平均动量为

$$\overline{P}_{p M.C.} = 500.9 MeV/c.$$

以上结果表明，飞行时间差测量方法和蒙特卡罗模拟计算，所得到的质子初始动量与磁谱仪设定的动量值符合得很好。这样也就验证了由分析磁铁给出的粒子中心动量值的可靠性。

4 结论

该磁谱仪在聚焦面上 3 平方厘米 ($1 \times 3 cm^2$) 的区域上动量误差（计算值） $\Delta P/P < 1\%$ ，中心动量为

800MeV/c 的粒子, 在 6 平方厘米($2 \times 3\text{cm}^2$) 的区域上, 动量谱分辨达到了 1.36%。对于希望进一步提高动量分辨的试验束应用试验, 可利用多丝室的在线测量数据作离线分析, 其动量分辨将得到改善。由于试验束的计数率依赖于直线加速器的工作频率, 更高的动量分辨必然以降低计数率为代价。由于第二个狭缝(Slit2)对粒子的散射, 测量显示聚焦面上的动量谱变宽。是否在 E3 线上只保留第一个狭缝有待进一步研究确定。

作者感谢李卫国研究员在磁谱仪结构设计上有益的建议, 感谢加速器中心和运行室在工程建设中的合作和协助。感谢王贻芳研究员对本文的修改提出许多宝贵的意见和建议。

参考文献 (References)

- 1 T.A. SHIBATA, T. KOBAYASHI, T. NOMAO, et al. NIM, 179 (1981) 67-76
- 2 C.J. ORAM, J.B. WARREN, G.M. MARSHALL, et al. NIM, 179 (1981) 95-103
- 3 M. BARBIER, J. D. DOWELL, P.I.P. KAMUS, et al. NIM, 20 (1963) 66-70
- 4 MA Ji-Mao, MAO Ze-pu, MAO Hui-Shun, et al. HEP&NP, 1987, 11(4):441-450 (in Chinese)
(马基茂, 毛泽普等. 高能物理与核物理, 1987, 11(4):441-450)
- 5 LU Jun-Guang, HU Jing-Liang, ZHENG Yang-Heng, H. Kichimi, LI Jin. HEP&NP, 1999, 23(6):505-511 (in Chinese)
(吕军光, 胡敬亮, 郑阳恒, H. Kichimi, 李金. 高能物理与核物理, 1999, 23(6):505-511)
- 6 A. G. DRENTJE, H. A. ENGE, S. B. KOWALSKI. NIM, 122 (1974) 485-490
- 7 E.W. ANDERSON, G.B. COLLINS, G.P. FISHER, et al. NIM, 122(1974) 587-598
- 8 A. P. BANFORD, The Transport of Charged Particle Beams, 188-192, 156
[英] A. P. 班福德著 刘经之等译, 带电粒子束的运输, 1984 年 原子能出版社 188-192, 156

Design and Performance Measurement of The 1GeV/c Multiparticle Magnetic Spectrometer In The BEPC-LINAC Test Beam*

LI Jia-Cai¹⁾ ZHANG Liang-Sheng HU Chun-Liang WU Yuan-Ming CUI Xiang-Zhong
LIU Zheng-Quan ZHANG Shao-Ping ZHOU Bao-Qing ZHENG Ling-Sheng
(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China)

Abstract On the Test Beam, the 2Q2D magnetic spectrometer consists of 2 quadrupole magnets and 2 dipoles and 2 position sensitive detectors. The spectrometer has a maximum solid angle acceptance of 5×10^{-4} sterad, a momentum range 0.2 – 1.3 GeV/c. A beam section and momentum spectra have been measured on the focal plane. A reference method of momentum measurement is introduced, that is based on the TOF difference of a proton and an electron.

Key words magnetic spectrometer, momentum spectra, slit, time of flight (TOF)

* National special funds for BEPC improving

1) E-mail: lijc@ihep.ac.cn