

北京谱仪中的 μ 计数器

朱永生 张良生 高文绣 张英平 赵平德 张家文 李芳 陈乐珺 徐芷菁

(中国科学院高能物理研究所,北京)

摘 要

描述了北京谱仪中 μ 子鉴别器的总体性能和安排,报道了 μ 计数器的气体放大特性、计数率坪特性、漂移时间、探测效率、电荷分配定位精度等一系列性能的测量结果。

一、引 言

北京谱仪(BES)^[1]是我国第一台正负电子对撞机 BEPC (设计束流能量 2.2—2.8 GeV) 上进行 e^+e^- 对撞物理实验研究的通用探测装置, μ 子鉴别器是其重要组成部分之一,通过多层测量粒子的击中点位置确定飞行轨迹,与谱仪内层探测器(漂移室、分层取样簇射计数器)的粒子径迹相联结,可将 μ 子与其它粒子区分开来,并测定 μ 子的动量。

二、 μ 子鉴别器总体安排

μ 子鉴别器由吸收体和 μ 计数器组件阵列构成,它在谱仪上的安排配置见图1。谱仪呈八边形,三层轭铁后,排列着三层共189个 μ 计数器组件,计1512个正比管(每组件8个)。组件结构见图2。第一层组件正比管长4212,第二、三层4638。组件上下两排各四个正比管错开半个管孔(~ 3 cm),以解决击中点“左右模糊”问题,使该方向的单丝定位误差为管孔的一半即3cm。正比管阳极为 $\phi 48 \mu\text{m}$ 不锈钢丝,电阻率 $\sim 727 \Omega/\text{m}$,用电荷分配法作沿丝方向(z 向)定位。 μ 子鉴别器的设计考虑见文献[2,3], μ 计数器组件的结构、清洗、装配及初步测量结果文献[4]已有报道。

三、 μ 计数器组件性能测量

共制作了249个组件,逐一测量了丝张力、气密性、计数率坪特性,抽样测量了暗电流、工作气体氧含量、气体放大特性、漂移时间、电荷分配定位、信号和噪声幅度分布以及探测效率。

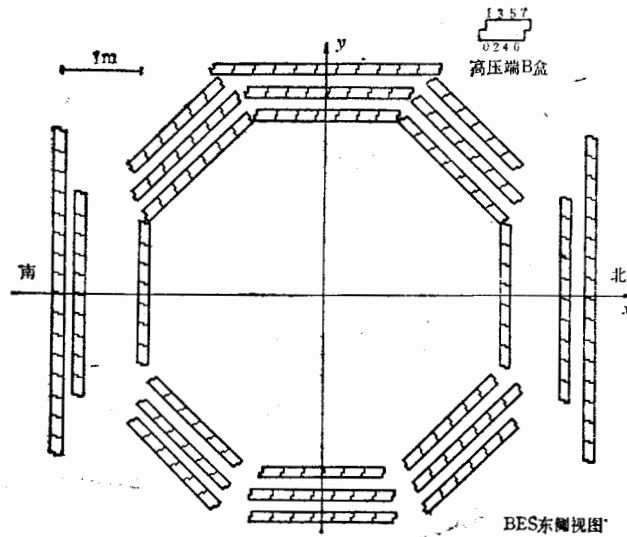


图1 北京谱仪上189个 μ 计数器的配置

【体
能

2.8GeV)
之一,通
叉样簇射

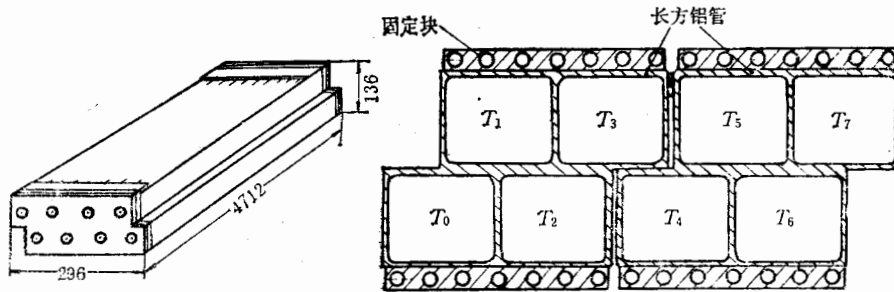


图2 μ 计数器组件结构简图

3.1. 谱
(每组件
下两排各
单丝定位
),用电荷
组件的结

1. 电绝缘性和暗电流

组件每个正比管的阳极丝和阴极管壁之间的电绝缘性用 2.5kV 兆欧表测量,电阻值均大于 500M Ω 。阳极丝-阴极管壁间串接 56M Ω 保护电阻和电流表,加上高电压,测量暗电流,在 3.8kV 左右开始出现 nA 量级的暗电流,到 3.82kV 增大到 ~ 100 nA。

2. 丝张力、气密性和杂质氧含量

金属丝置于磁场中,通以正弦电流发生振动,测量共振频率即可推导出丝的张力^[5]。249 个组件 1992 根丝的张力测量值表明,平均值为 128.4g,偏离平均值 $\pm 5\%$ 内的丝数占 91.5%,可见各组件丝张力有良好的—致性。

量了暗电
分布以及

良好的气密性可保证 μ 计数器工作气体成分不因泄漏而改变,使性能稳定可靠,并可减少工作气体流量。谱仪 μ 计数器系统总容积约 20m³,至少要运行四、五年,低流量可节省大量昂贵气体的消耗。气密性用注硅油的 U 形管压力计测量^[6],在计数器内气压高于环境压力 ~ 35 cm 水柱的条件下,249 个组件中泄漏率小于 4(cm 水柱/天)的占 94.4%,该

数值相应于计数器内气体一天内只泄漏0.4%。谱仪实际运行时， μ 计数器工作气体过压约10cm水柱，泄漏率将远低于上述结果。

工作气体中混入的氧含量对正比计数器性能有明显影响^[7]。 μ 计数器工作气体是Ar/CH₄:90/10,混合比精度~0.5%,氧含量要求 ≤ 100 ppm。经测定,在计数器工作气体一天更换一遍的流量下,总的氧含量(包括钢瓶气本身含有的氧)为~52ppm,好于设计指标。

3. 气体放大特性

谱仪 μ 计数器1512个正比管采用电荷分配法定位,电子学道数达3024。现将每个组件的八根阳极丝按T₀-T₄,T₁-T₅,T₂-T₆,T₃-T₇两两串接,该方式保证串接的两根丝不可能被e⁺e⁻对撞中心射出的同一粒子击中,避免了误计数,又减少了一半电子学道数。

测量放大特性时粒子源是宇宙线(主要成分是 μ 子),没有对入射位置加以选择。测量串接丝对两端信号电荷之和,测到的幅度谱是比较宽的分布,峰值对应于最可几电荷量。典型的气体放大特性如图3所示,2.4kV以下基本上是直线,2.4kV处信号电荷量为5PC,数据有好的重复性。

4. 计数率坪特性

一般测量坪曲线时,粒子射入计数器的位置是固定的。但在北京谱仪中,射入 μ 计数器有效探测体积的粒子都要测量,由于采用了高电阻率阳极丝,击中点离输出端的远近直

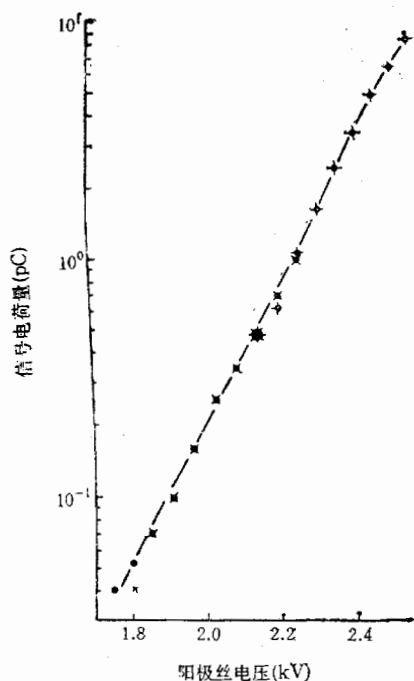


图3 μ 计数器气体放大特性

●○1987.9.2. ×+1987.9.24.

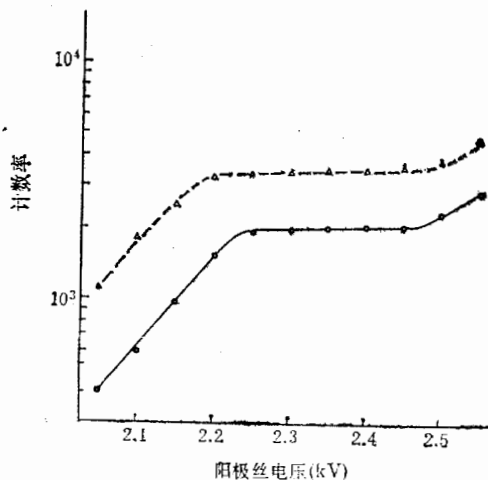


图4 μ 计数器计数率坪曲线

○宇宙线 T₁+T₂, △Sr⁹⁰源 T₁

接影响

没有用
样得到
粒子在
坪区未
关这一
25V以

5. 漂移

在
 μ
管上、
TAC
改变放
线。

三
漂移距
为240
时间呈
2400V
收集时

6. 电荷

为
击中点
器之间
散射导

图5 μ

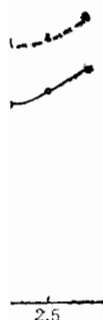
气体过压

气体是工作气体于设计指

现将每个两根丝不学道数。

选择。测可几电荷电荷量为

入 μ 计数器的远近直



1线源 T,

接影响了信号幅度,粒子在固定位置入射的方式不符合实际工作状况。故测量坪曲线时,没有用闪烁望远镜选择宇宙线粒子位置,测量串接的阳极丝对两端“和”信号的计数率.这样得到的坪曲线在图 4 中用实线画出,坪起始电压 $\sim 2.25\text{kV}$,坪长 $\sim 250\text{V}$ 。图中虚线是粒子在固定位置入射时测得的坪曲线,坪起始电压 $\sim 2.2\text{kV}$,坪长 $\geq 300\text{V}$ 。虚线和实线的坪区末端电压相同,这反映了由正比区过渡到有限正比区的阳极电压与粒子击中位置无关这一特性。全部 996 对串接正比管坪曲线有良好的一致性,坪起始电压、坪长的差别在 25V 以内,阳极电压选在 2375—2400V 之间可保证所有 μ 计数器工作于坪区。

5. 漂移时间测量

在北京谱仪实验中,漂移时间是 μ 计数器信号触发判选所需的基本参数之一。

μ 计数器正比管漂移时间的测量原理^[6]如下。 ^{90}Sr 源发射的 β 粒子经准直,穿过正比管上、下壁薄窗后被下方的闪烁计数器记录。闪烁计数器和正比管的输出信号分别作为 TAC 的起始和终止信号,信号时差正比于 TAC 的输出脉冲幅度。利用精密的移动装置改变放射源位置,并测出相应的 TAC 输出幅度,即求得漂移距离——漂移时间的关系曲线。

三种阳极电压下的测量结果示于图 5。漂移距离 $> 10\text{mm}$ 处,电场低,漂移速度低,漂移距离-时间有很好的直线关系,漂移速度为 52.5, 53.5 和 55.0 $\mu\text{m}/\text{ns}$ (阳极电压分别为 2400V, 2375V 和 2348V); $< 10\text{mm}$ 区域,在接近阳极丝附近电场迅速增强,漂移距离-时间呈非线性关系。当粒子击中点在管壁(距离 $\sim 29\text{mm}$)附近,阳极电压 2348V, 2375V, 2400V 时的漂移时间分别为 460, 500, 520ns。北京谱仪触发判选系统规定 μ 计数器信号收集时间 $\leq 550\text{ns}$,这三种阳极电压都能满足信号电荷的完全收集。

6. 电荷分配法定位测量

为了与谱仪内层探测器的粒子径迹相连接,以实现粒子鉴别和动量测量, μ 计数器的击中点应有适当的定位精度。簇射计数器可给出位置的最后一个击中点到第一层 μ 计数器之间有 $\sim 13\text{r.l.}$ 的物质层,对于 500MeV/c (μ 子鉴别器可测最低动量 μ 子)的 μ 子,多次散射导致的位置不确定性均方根值约 7cm,故 $\leq 5\text{cm}$ 是 μ 计数器 z 向定位精度的适当选

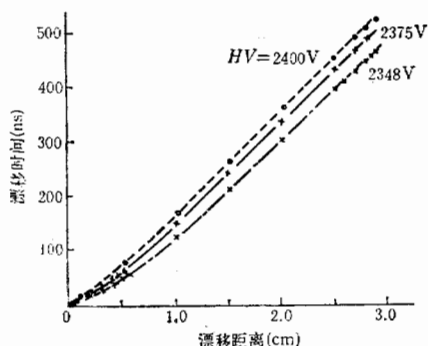


图 5 μ 计数器正比管的漂移时间-漂移距离关系曲线

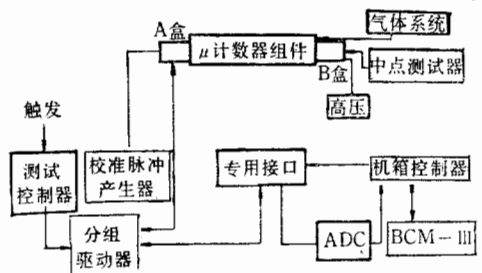


图 6 电荷分配定位测量系统方框图

择, $r-\phi$ 方向 μ 计数器定位精度为 3cm, 已满足要求。

电荷分配定位测量装置的框图如图 6 所示。A 盒和 B 盒为前端电子学线路, 两个面积为 $250 \times 30\text{mm}^2$ 的长条形薄闪烁体组成望远镜, 用来选择穿过 μ 计数器确定位置的宇宙线粒子。望远镜的符合信号作为测试控制器的触发信号, 测试控制器、分组驱动器、专用接口在 BCM III 微机操作程序指令控制下, 通过 CAMAC 机箱控制器, 对触发方式、选址信号、模拟信号进行控制、传输和记录, 将选定的 μ 计数器阳极丝的输出信号存入 ADC, 由此可测得串接正比管两端的信号电荷量。该测量系统可对单个组件进行电荷分配定位及其它测量; 连接到大内存的计算机 VAX 785 上, 实现了谱仪 189 个 μ 计数器电荷分配定位测量、信号存储、读出和显示。

图 7 是一对串接正比管两端信号幅度的分布。阳极丝电压 2.4kV, 宇宙线粒子位置离信号输出近端 15cm (离远端 921.6cm)。由图可见, 距击中点近的近端信号电荷量较大, (大部分信号的幅度超出图 7(a) 横坐标的最大标度), 信号与噪声能明显分开; 远端信号电荷量较小, 与噪声有部分混同。两端的噪声幅度分布大体相同, 最大噪声 13 道, 平均噪声 4.7 道, 相应于电荷量 0.127 和 0.046pC。

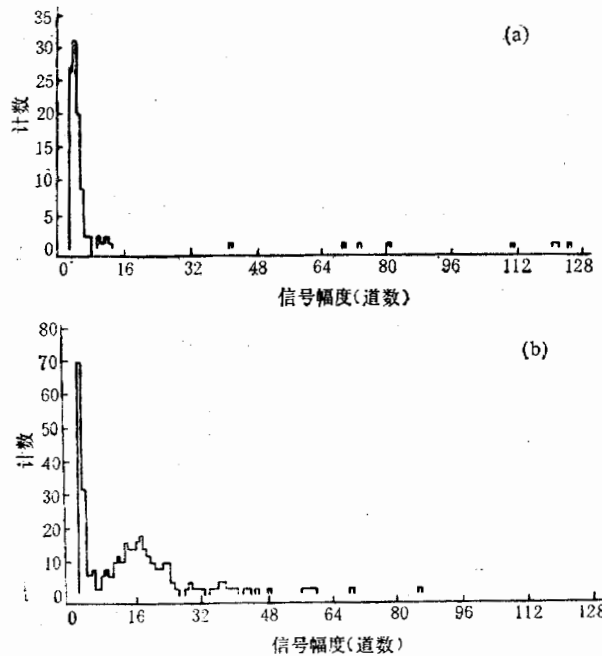


图 7 串接正比管两端输出信号幅度分布
(a) 近端谱, 最大噪声 13 道, 平均噪声 4.7 道 (b) 远端谱

在不同的位置 z_i , 测量串接正比管两端的信号幅度, 可得到电荷比 f_i , f_i 大体呈高斯分布, 其峰值 \bar{f}_i 可视为最可几值。测量了 15 个组件 60 对串接正比管的 $z_i-\bar{f}_i$ 标绘, 典型结果见图 8。图中的拐折点对应于两个正比管阳极丝的连接导线。出现拐折点的可能原因是, 连接导线本身电阻虽极小, 但它与其周围环境对信号传输形成一个不可忽略的阻抗。为避免拐折点的困难, 对串接的两个正比管采用分段拟合, 拟合公式是

系数

表 1 页

注:

1.0

0.7

0.5

0.3

图 8

按

上(1)式

即 z_i 的定位

$$f = Az + Bz^3 + C. \quad (1)$$

，两个面位置的宇宙线计数器、专用方式、选号存入入行电荷分计数器电

粒子位置测量较大，远端信号直，平均噪

系数 A 、 B 、 C 的典型数值(组件 1—073)如下:

$$A_L = -0.9266 \times 10^{-3}/\text{cm}, B_L = -0.5 \times 10^{-3}/\text{cm}^3, C_L = 0.9801368;$$

$$A_R = -1.1781 \times 10^{-3}/\text{cm}, B_R = -0.1 \times 10^{-3}/\text{cm}^3, C_R = 1.0400384.$$

表 1 列出了 15 个 μ 计数器 z_i 的数据点与拟合曲线的平均残差，其数值均小于 2.9cm.

表 1

组 件 编 号	拟合残差平均值 (cm)	组 件 编 号	拟合残差平均值 (cm)
0-067(L)	1.624	1-135(R)	1.239
0-067(R)	1.040	1-141(L)	2.132
0-048(L)	1.624	1-141(R)	1.845
0-048(R)	1.040	1-172(L)	2.132
0-065(L)	1.624	1-172(R)	1.845
0-065(R)	1.040	1-078(L)	2.132
0-050(L)	0.598	1-078(R)	1.467
0-050(R)	1.450	1-059(L)	2.092
0-038(L)	1.362	1-059(R)	1.227
0-038(R)	1.298	1-056(L)	1.594
0-060(L)	1.362	1-056(R)	2.222
0-060(R)	1.298	1-073(L)	2.182
1-112(L)	1.918	1-073(R)	2.476
1-112(R)	1.366	1-136(L)	2.819
1-135(L)	2.626	1-136(R)	2.410

注: 同一组件中, L 表示串接丝对中编号较小的丝(0,1,2,3), R 表示编号较大的丝.

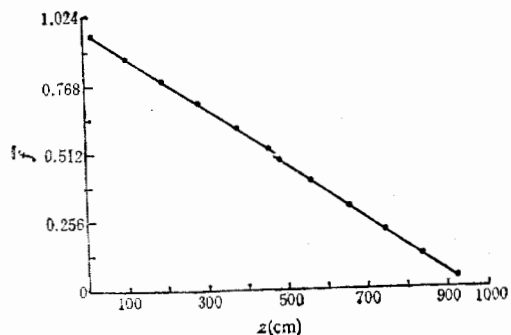


图 8 电荷分配定位 z_i-f_i 测量结果及拟合曲线

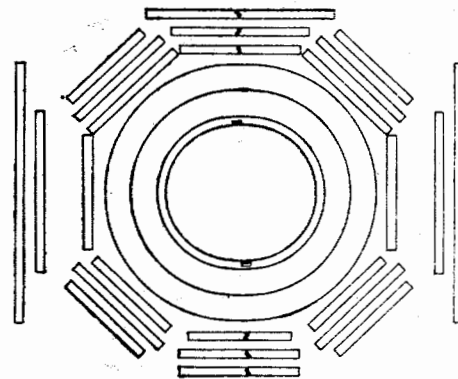


图 9 一个宇宙线事例

大体呈高标绘, 典型的可能原可忽略的阻

按电荷分配原理^[9], 击中点位置 z 与电荷比 $f = \frac{Q_1}{Q_1 + Q_2}$ 近似地有线性关系, 事实上(1)式中三次项系数 B 也很小, 故有

$$\sigma_z \cong \sigma_f / A, \quad (2)$$

即 z_i 的测量误差由 f_i 分布的标准偏差决定, σ_z 的典型值是 $\sigma_z \cong 4.5\text{cm}$. μ 计数器总的定位精度需考虑测量误差 σ_z , 拟合误差 σ_{fit} , 并扣除选择宇宙线位置的条状闪烁体宽

度 3cm 导致的不确定性,故有

$$\sigma_z \cong [\sigma_z^2 + \sigma_{\text{fit}}^2 - (3\text{cm})^2]^{1/2} \lesssim \sigma_z \cong 4.5\text{cm}, \quad (3)$$

即总定位误差略小于测量误差 4.5cm.

7. 探测效率

μ 计数器上方与阳极丝平面平行而又相互垂直地放置两个长条形闪烁体,下方与其中一条闪烁体平行地放置第三条闪烁体,宽度均为 3cm,它们的三重符合作为触发信号,这种安排保证了产生触发信号的宇宙线粒子确定无疑地穿过 μ 计数器的有效探测区域. 阳极丝高压 2.35kV, $z = 267\text{cm}$, 有效触发次数 1000 次的情形下,三次测量得到的探测效率 $\geq 98\%$.

8. 总体联调、宇宙线测试

189 个组件及其前端电子学线路安装到谱仪本体上,与谱仪触发判选系统、VAX785 在线数据获取系统联调成功,利用宇宙线粒子进行测试. 图 9 是一个宇宙线事例的在线显示,触发条件是放置于谱仪几何中心的闪烁计数器和桶部 TOF 任一单元有符合信号,图中 μ 计数器的 12 个击中和 TOF 的两个击中清楚地显示了粒子的轨迹. 根据宇宙线强度的 $\cos^2\theta$ 分布编写了蒙特卡罗程序,按照每个组件的位置可计算各组件接收到的事例数的相对比例. 模拟计算的结果与宇宙线实验数据相符.

四、结 论

1. 制成的 249 个 μ 计数器组件的性能参数有相当好的一致性,可任意互换.
2. 组件实际达到的性能均达到或好于原定指标(见表 2). 由这些组件构成的北京谱仪 μ 子鉴别器总体性能达到并略好于 MARK III μ 子鉴别器的性能^[2].
3. μ 计数器安装到谱仪上后,成功地实现了探测器-触发判选-在线计算机的联调,获得了与蒙特卡罗计算相符合的宇宙线实验数据,为今后 e^+e^- 实验数据的成功获取做好了准备.

表 2 μ 计数器组件性能(典型值)

工作电压	坪长	信号电荷	平均噪声	探测效率	z 向位置分辨	最大漂移时间	氧含量
2.35—2.40kV	~250V	~5pC*	~0.046pC*	$\geq 98\%$	$\leq 4.5\text{cm}$	~500ns	~50ppm

* 工作电压 2.40kV.

致谢:

顾树棣、王佩良提供了全部 μ 电子学线路,刘炜、李家华完成了 μ 计数器组件及其在谱仪上安装支撑的机械设计,魏诚林设计了拉丝台,测试组件性能时使用的抽气-充气系统是在何可人设计的抽气系统上进一步修改完善的,总体联调和宇宙线测试数据的在线

获取
关心

[1]
[2]
[3]
[4]
[5]
[6]
[7]
[8]
[9]

(BES
divisi

获取主要由高能所一室触发判选组、在线组完成。在工作中得到叶铭汉、郑志鹏等同志的关心和支持,在此一并表示诚挚的谢意。

(3)

参 考 文 献

- [1] Proc. of the Workshop on Colliding Beam Physics, Beijing, China, 1984.
 [2] The MARKIII Spectrometer, SLAC-PUB-3222, 1983.
 [3] Gao Wenxiu et al., Proc. of the Workshop on Colliding Beam Physics, p.570; Zhang Yingping, *ibid.*, p. 579.
 [4] 朱永生等,第四届全国核电子学与核探测技术和第三届全国高能实验物理学术会议文集,上册,84页;高文绣等,同上,401页。
 [5] 张家文等, μ 子鉴别器丝张力的测量,内部报告,1986。
 [6] 朱永生,高能物理与核物理,13(1989),1。
 [7] 徐芷菁等,高能物理与核物理,8(1984),248。
 [8] 张良生,北京谱仪 μ 计数器漂移时间测量,内部报告,1988.6。
 [9] V. Radeka & P. Rehak, IEEE NS-25, 46(1978); V. Radeka, IEEE ns-21, 51(1974).

下方与其
 发信号,
 测区域。
 到的探测

VAX785

例的在线
 符合信号,
 据宇宙线
 收到的事

MUON COUNTER IN BES

ZHU YONGSHENG ZHANG LIANGSHENG GAO WENXIU ZHANG YINGPING,
 ZHAO PINGDE ZHANG JIAWEN LI FANG CHEN LEJUN XU ZHIQING
 (Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing)

ABSTRACT

The arrangement and design performance of muon identifier in Beijing Spectrometer (BES) are described. The gas gain, Plateau feature, drift time, detection efficiency, charge division for hit location and other characteristics of muon counter modules have been measured.

的北京谱

勾联调,获
 获取作好

 氧含量

 ~50 ppm

件及其在
 气-充气系
 据的在线