

北京谱仪 μ 子计数器性能的研究*

王征¹⁾ 苑长征 漆纳丁

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 研究了北京谱仪 μ 子计数器的性能,对刻度和重建方法作了改进和完善,纠正了在 $r-\phi$ 方向上 μ 子鉴别的系统偏差,更好地确定了 z 向位置坐标,改善了位置分辨率。

关键词 北京谱仪 μ 子计数器 磁场 刻度 位置分辨

1 引言

北京谱仪(BES)是运行在北京正负电子对撞机(BEPC)上的一台通用磁谱仪^[1],用于测量正负电子对撞后产生的遍举末态,研究末态粒子的性质及其相互作用的规律。 μ 子计数器(MUC)^[2]是北京谱仪的重要子探测器之一。它在北京谱仪最外层,主要功能是鉴别和测量 e^+e^- 反应末态中的 μ 子。如图 1(a)所示,北京谱仪 μ 子计数器共 3 层,每层由 8 块平板计数器阵列(每一块计数器阵列称为一簇)构成八卦形式排列。从内到外每层计数器前有厚度分别为 12cm, 14cm 和 14cm 的钨铁作为吸收体并为 μ 子计数器提供支撑。其中前两层吸收体通过桥板与谱仪磁铁线圈相连,内有磁场,构成谱仪磁场回路。每一簇由 6 到 16 个模块(module)组成,每个模块由形成两排的上下各 4 个正比管构成,上下两排正比管错开半个管距(约 3cm),以解决击中的“左右模糊”问题。为了节约电子学道数,同一排内每间隔一个正比管的两个管子相串联,这样节约一半的电子学线路。整个北京谱仪 μ 子计数器共有 1512 个正比管,1512 路电子学读出。从内到外 3 层正比管长度分别为 4.21m, 4.63m 和 4.63m。 μ 子计数器工作在正比区,工作气体为 90% (Ar) + 10% (CH₄),工作高压为 2.34—2.37kV。从内到外 3 层计数器的立体角覆盖范围分别为 63% $\times 4\pi$, 67% $\times 4\pi$ 和 67% \times

4 π 。由于谱仪内部物质的吸收,使得只有动量高于 500MeV 的 μ 子才能够到达 μ 计数器。

μ 子计数器是北京谱仪中惟一的专用探测器,对于鉴别 e^+e^- 反应末态中的 μ 子,研究宇宙线有着非常重要的作用。在北京谱仪进行的 τ 质量测量^[3], D 和 Ds 介子的纯轻子衰变研究^[4,5], 宇宙线研究^[6] 以及 J/ψ 轻子衰变的研究^[7] 的分析过程中都利用了 μ 计数器的信息。

2 μ 子鉴别方法及存在的问题

在北京谱仪上利用内层探测器记录的带电粒子径迹向 μ 子计数器外推得到在 μ 计数器各层上的预期位置(V_{proj}^i, Z_{proj}^i)与 μ 子计数器的击中位置(V_{hit}^i, Z_{hit}^i)相匹配来鉴别 μ 子,其中 V 为径迹在 μ 计数器 $r-\phi$ 平面各个簇上的位置,定义为 $V_{ij} = r_{ij} \cdot \hat{V}_{ij}$ 。 Z 为径迹在 μ 计数器上沿束流方向的位置, $i=1, 2$ 或 3 为 μ 子计数器的层号, $j=0, 1, \dots, 7$ 为 8 个簇, r_{ij} 为在 $r-\phi$ 平面中 μ 子在 3 层计数器 8 个簇上击中的或外推的位置矢量, \hat{V}_{ij} 为三层计数器 8 个簇在 $r-\phi$ 平面的单位矢量,取顺时针方向,图 1(b)中 O 为对撞中心, ABC 为 $r-\phi$ 平面的第 i 层第 j 簇 μ 子计数器阵列, $C(x, y)$ 为一个击中点或外推点, 线段 BC 即为 V_{ij} , 是矢量 r_{ij} 在计数器平面上的投影。定义两个量:

2003-01-09 收稿

* 国家自然科学基金(19991480), 中国科学院“百人计划”(U-25)资助

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

$$V_{\text{rd}} = \frac{V_{\text{proj}} - V_{\text{hit}}}{\sigma_V}, \quad Z_{\text{rd}} = \frac{Z_{\text{proj}} - Z_{\text{hit}}}{\sigma_Z} \quad (1)$$

分别为在 $r-\phi$ 和 z 方向上归一化的 μ 计数器的击中位置与径迹外推预期位置之间的差别. 根据定义, 它们应该服从平均值为 0, 标准偏差为 1 的标准正态分布. 通常认为这两个量的绝对值均小于 3 的径迹是一个好的 μ 径迹. 这样, 期望准确而且高效地鉴别 μ 子就要求: (1) 径迹由内层探测器向 μ 子计数器的外推是正确的, 没有系统偏差; (2) μ 计数器对击中位置的测量是正确的, 无系统偏差; (3) μ 子计数器有较好的 $r-\phi$ 向和 z 向本征分辨.

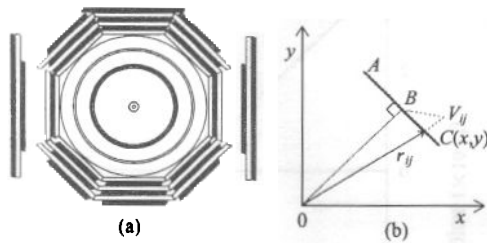


图 1

(a) 北京谱仪 μ 计数器结构示意图. 谱仪外层为 3 层 8 块 μ 计数器阵列, 每块 μ 计数器阵列前为钨铁. 编号最右边的簇为 0, 按顺时针排列各簇编号 0 至 7;
(b) 变量 V_{ij} 的定义.

文献[7]和[8]发现 BES-I 上的 V_{rd} 和 Z_{rd} 与期望的标准正态分布有显著偏差, 且对于 μ^+ 和 μ^- , V_{rd} 的分布也存在明显差异. 该文献中用唯象修正的方法使新的分布满足要求. 本文检验了 BES II^[9] 上的情况, 并从根本上解决了这些差异.

利用在 BES II 探测器上采集的 14M 在 $\sqrt{s} = 3.686\text{GeV}$ 即 $\psi(2S)$ 峰上和 58M 在 $\sqrt{s} = 3.097\text{GeV}$ 即 J/ψ 峰上数据^[10] 中的双 μ 事例对北京谱仪的 μ 子计数器性能作了研究, 因为这一类事例有明显的拓扑特征, 便于事例的选择和性能的测量.

对双 μ 事例的选择条件如下: (1) 有且仅有两条带电径迹; (2) 两条带电径迹在主漂移室 (MDC) 中都有好的螺旋线拟合; (3) 要求径迹的顶点 $|r_{xy}| \leq 2\text{cm}$, $|Z| \leq 20\text{cm}$; (4) 径迹的极角满足 $|\cos\theta| < 0.6$; (5) 两径迹在飞行时间计数器中的飞行时间小于 15ns, 飞行时间差小于 4ns; (6) 两径迹间非共线角小于 4度; (7) 对 $\psi(2S)$ 数据, 要求双 μ 的不变质量在 3.4GeV 到 4.0GeV 之间. (对于质心能量为 3.097GeV 的事例, 要求双 μ 的不变质量小于 3.3GeV); (8) 两径迹在桶部量能器中的沉积能量之和小于 1.0GeV; (9) 研究 μ^+ 行为时严格要求 μ^- 被鉴别为 μ 子; 反

之, 研究 μ^- 行为时严格要求 μ^+ 被鉴别为 μ 子. 图 2 显示在 $r-\phi$ 方向上, μ^+ 、 μ^- 在 3 层 μ 计数器的 V_{rd} 分布中心值不为 0, 存在偏差. μ^+ 和 μ^- 均值偏向相反, 且相对于零点不对称, 它们的方差也不为 1, 在 1.15 到 1.26 之间. 图 3 显示 3 层 μ 计数器的 Z_{rd} 分布的分辨也不为 1, 在 1.3 到 1.4 之间. $\psi(2S)$ 数据的 Z_{rd} 分布均值也不为 0, 原因是没有对 $\psi(2S)$ 作刻度, 重建所用刻度常数为上一轮 J/ψ 取数时对 μ 计数器作的刻度产生的刻度常数. 重新刻度用新常数重建的数据 Z_{rd} 的分布不存在均值偏差. 实验上还发现重建数据的 z 方向分辨与刻度的结果存在差别. 例如, 重建中第一层 μ 计数器的 z 向分辨为 5.6cm, 而刻度中约为 5.1cm. 这些现象的存在必然影响 μ 子的鉴别.

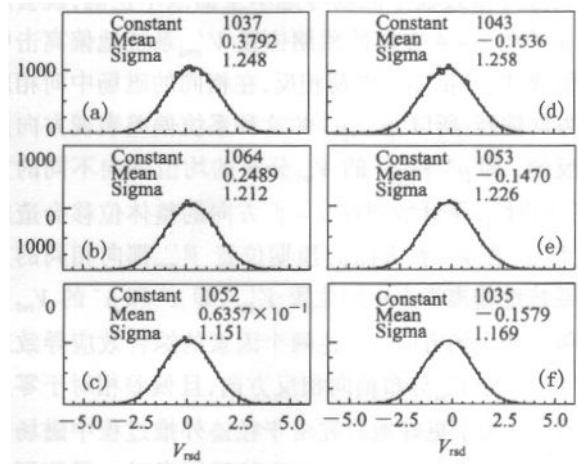


图 2 μ^+ 、 μ^- 的 V_{rd} 分布

(a), (b), (c) 为 μ^+ 对应 3 层 μ 计数器的分布, (d), (e), (f) 为 μ^- 对应 3 层 μ 计数器的分布. 可见, μ^+ 、 μ^- 的 V_{rd} 分布偏向相反的方向, 且偏差相对零点不对称.

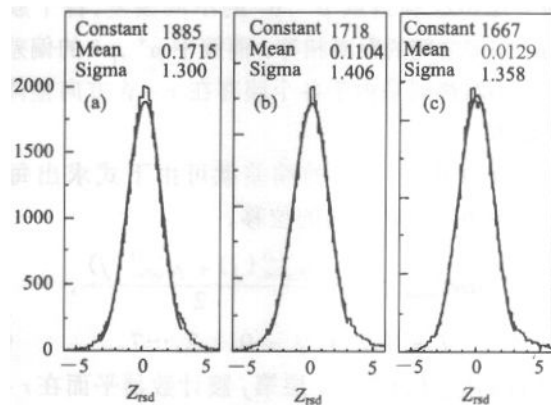


图 3 μ 子的 Z_{rd} 分布

(a), (b), (c) 对应 3 层 μ 计数器, 方差不为 1.

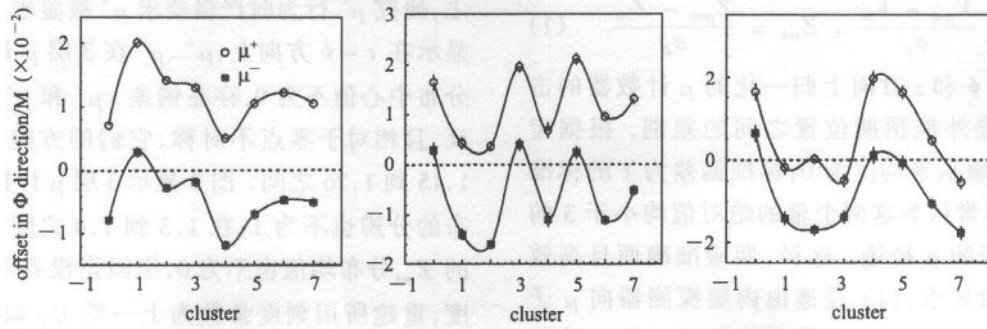


图 4 μ^+, μ^- 在 3 层 μ 计数器中各个簇中的 $r-\phi$ 向偏差

3 μ 计数器 $r-\phi$ 向信息及其修正

由于 μ 子在 $r-\phi$ 方向会受磁场作用而偏转,如果在径迹外推过程中磁场考虑不全面或不正确,就会造成 μ 子在 $r-\phi$ 方向的预期位置 V_{proj}^i 系统地偏离击中的位置 V_{hit}^i . μ^+, μ^- 电荷相反,在相同的磁场中向相反的方向偏转,所以, μ^+, μ^- 的这种系统偏差表现方向是相反的. 即 μ^+ 和 μ^- 的 V_{nd} 分布的均值偏向不同的方向. 同时, μ 子计数器在 $r-\phi$ 方向的整体位移会造成 μ^+ 和 μ^- 在 $r-\phi$ 方向的预期位置 V_{proj}^i 都向相同的方向系统地偏离于击中的位置 V_{hit}^i , 即 μ^+ 和 μ^- 的 V_{nd} 分布偏向相同的方向. 上述两个因素的综合效应导致对 μ^+ 和 μ^- 的 V_{nd} 分布偏向相反方向,且偏差相对于零点不对称. 为了更好地研究由于径迹外推过程中磁场因素和 μ 子计数器在 $r-\phi$ 方向位移因素对 μ 子鉴别的影响,我们作了 3 层 μ 子计数器的每一簇中 μ^+, μ^- 在 $r-\phi$ 方向上 $V_{proj} - V_{hit}$ 的分布,见图 4,可见,由于以上两个因素造成的 μ^+, μ^- 的 V_{nd} 分布的系统偏差表现于 μ 计数器的每一个簇上. 即由于在计算径迹外推过程磁场考虑不正确造成 μ^+, μ^- 的不同偏差,各个簇中 μ^+, μ^- 偏差之间的距离相等. 而簇中 μ^+, μ^- 的偏差相对零点不对称则是由于各个簇存在 $r-\phi$ 方向整体的定位偏差.

由图 4 中 μ^+, μ^- 的偏差就可由下式求出每层每一个簇在 $r-\phi$ 方向的位移,

$$offset_{cluster}^i(j) = \frac{\mu_{offset}^{+(i)}(j) + \mu_{offset}^{-(i)}(j)}{2},$$

$$i = 1, 2, 3, j = 0, 1, 2, \dots, 7. \quad (2)$$

其中 $offset_{cluster}^i(j)$ 为第 i 层第 j 簇计数器平面在 $r-\phi$ 方向的整体位移, $\mu_{offset}^{+(i)}(j)$ 和 $\mu_{offset}^{-(i)}(j)$ 分别为 μ^+ 和

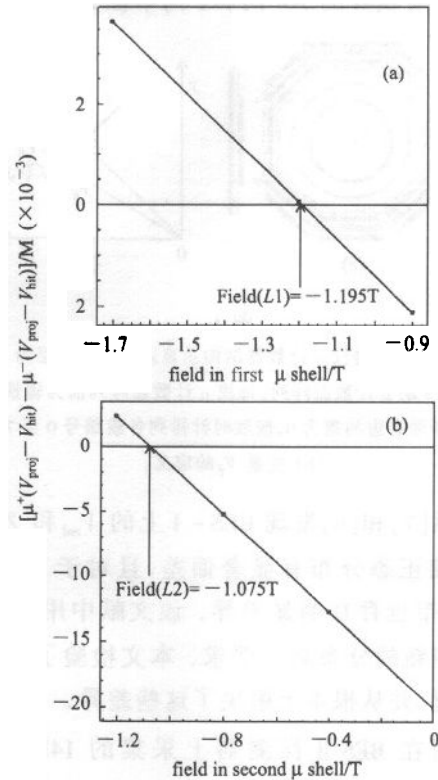


图 5 拟合第一、第二层轭铁中的磁场值分别为 -1.195T 和 -1.075T

μ^- 样本在第 i 层第 j 簇计数器中的位置偏差.

重建过程中径迹外推的计算是从桶部簇射量能器的最内层的击中坐标开始,经过桶部簇射计数器,磁铁线圈,轭铁到各层 μ 子计数器,得到在各 μ 子计数器层的外推径迹坐标. 然而,目前的重建过程径迹外推时没有考虑磁铁线圈中的磁场,用到的第一、第二层轭铁中的等效磁场值 -1.29T 和 -0.43T 也缺乏依据,不能保证正确地计算出外推径迹在 3 层 μ 计数器上的 $r-\phi$ 向位置. 图 4 中 μ^+, μ^- 偏差不重合但各个簇中偏差都相等就是径迹外推过程中磁场考虑不恰当的反映. BES 设计的模拟计算¹⁾显示,在

1) 韩世温.“北京谱仪磁铁磁场和电磁力的计算”,高能所科技档案谱仪磁铁卷(02-13.6-16-1-5)

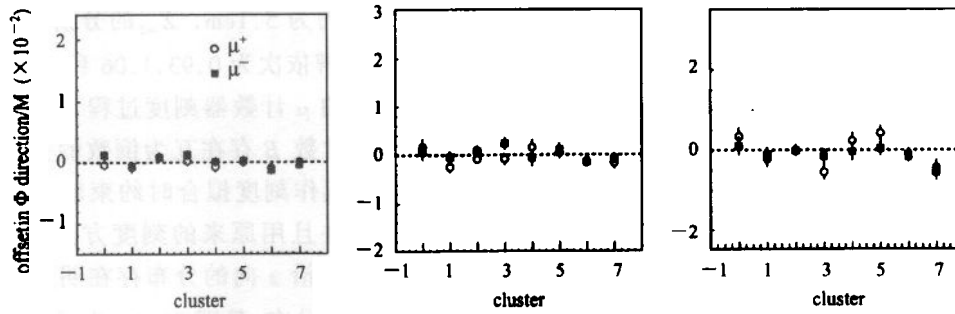


图 6 放入 3 层各个簇的 $r-\phi$ 向位置修正和正确的线圈和轭铁磁场,

数据重建之后的 μ^+, μ^- 在 3 层 μ 计数器中各个簇中的 $r-\phi$ 向偏差接近于零

磁铁线圈中存在着由谱仪中心 0.403T 开始递减且基本为线性递减到零的磁场. 在径迹外推经过磁铁线圈时放入线性递减磁场之后, 外推径迹在进入 μ 计数器之前的 $r-\phi$ 向位置的计算才是正确的. 轭铁中的磁场可由以下方法确定: 改变轭铁中的磁场值再次重建数据, 再看 μ^+, μ^- 在第一、第二层 μ 计数器中的 $r-\phi$ 向位置偏差, 通过 μ^+, μ^- 样本在第一、第二层 μ 子计数器上 $r-\phi$ 方向的偏差的数值拟合出第一、第二层轭铁中的磁场值, 即选取使得 μ^+, μ^- 样本在计数器中的偏差的差值等于零的磁场值作为第一第二层轭铁中的磁场:

$$B_{\text{york}}^i = B^i (|\mu_{\text{offset}}^{+(i)} - \mu_{\text{offset}}^{-(i)}| = 0), \quad i = 1, 2 \quad (3)$$

其中 B_{york}^i 为确定的第 i 层轭铁中的磁场, $\mu_{\text{offset}}^{+(i)}$ 和 $\mu_{\text{offset}}^{-(i)}$ 分别为 μ^+ 和 μ^- 在第 i 层 μ 计数器中的 $r-\phi$ 向偏差. 图 5 显示在考虑磁铁线圈磁场的情况下, 拟合出第一第二层轭铁中磁场分别为 -1.195T 和 -1.075T , 负号表示磁场方向与磁铁线圈内磁场方向相反.

图 6 和图 7 显示在放入了正确的磁场和 μ 子计数器的 $r-\phi$ 向位置参数之后, 数据经过重新重建得到的 μ^+, μ^- 的位置偏差和 V_{nd} 分布, 可见系统偏差已经消除. 图 2 中 V_{nd} 分布的分辨不为 1 是因为原来的重建过程和刻度过程位置坐标的计算不一致造成的. 在原来的重建过程中, z 坐标对于多次击中作了不合适的加权平均, 使得位置分辨变差. 在保证重建过程和刻度过程位置坐标计算一致的情况下, μ 计数器 3 层的 V_{nd} 的均方差接近于 1. 见图 7. 图 7 中 V_{nd} 的分布中间有突起, 不是标准正态分布的形状, 是因为在重建程序中各层 $r-\phi$ 向位置坐标的确定, 是选取各层多个击中与预期位置最近的那个击中位置坐标. 原来各个击中相对预期位置的差分别是正态分布, 记为 $N_{\Delta V}^1, N_{\Delta V}^2 \dots N_{\Delta V}^n$, 取最小 $\text{MIN}(N_{\Delta V}^1, N_{\Delta V}^2 \dots N_{\Delta V}^n)$ 之后的分布不是正态分布了.

以上得到的 μ 计数器的 $r-\phi$ 向位置参数和磁场数值经过 1999—2000 年度和 2000—2001 年度采集的 58MJ/ ψ 数据中随机抽取的部分双 μ 事例检验, 再次重建的数据中 μ^+, μ^- 在 $r-\phi$ 向不再存在偏差. 这说明原来 μ^+, μ^- 在 $r-\phi$ 向的偏差是由于系统的原因造成的, 也在一定程度上证明上面考虑的磁场和 μ 子计数器的 $r-\phi$ 向位置修正参数是正确的.

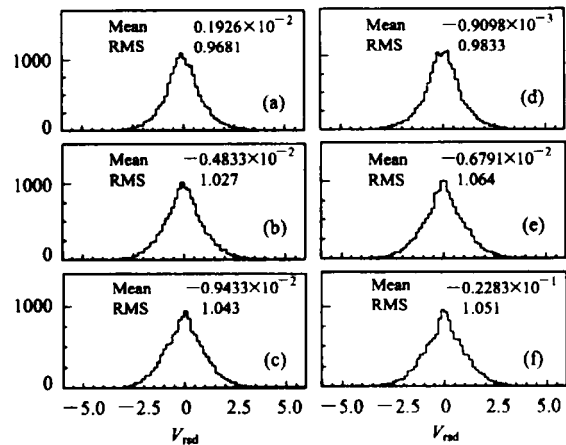


图 7 放入 $r-\phi$ 向位置修正和正确的线圈及轭铁中的磁场后 μ^+, μ^- 的 V_{nd} 分布

(a), (b), (c) 为 μ^+ 对应各层 μ 子计数器的分布; (d), (e), (f) 为 μ^- 对应各层 μ 子计数器的分布, V_{nd} 的偏差消失. 重建过程和刻度过程位置坐标计算保持一致以后, V_{nd} 的均方差接近于 1.

4 μ 计数器的 z 向信息及其改进

4.1 BES-II 的 z 坐标的刻度

μ 计数器的 z 坐标由电荷分配法计算:

$$Z = A \cdot [Q_L / (Q_L + B \cdot Q_S)] + C \quad (4)$$

式中 Q_L, Q_S 分别为计数管输出大的脉冲高度和与此计数管配对的计数管输出的小的脉冲高度, A, B, C 为刻度待确定的常数. 其中 A, C 为此计数管的

刻度常数, B 为与此计数管配对的计数管的刻度常数. 由于 μ 子计数器相间的两个计数管相互串联, 所以这样相互配对的两个管子在一起刻度, 要求满足约束: $B_1 = 1/B_2$. μ 子计数器的刻度用双 μ 事例为样本, 以外推径迹给出的 z 坐标为准, 设目标函数:

$$\chi^2 = \sum_i (Z_{\text{hit}}^i - Z_{\text{proj}}^i)^2 \quad (5)$$

式中 Z_{hit}^i 为 μ 计数器测量得到的 μ 子击中的 z 向位置, Z_{proj}^i 为径迹外推到 μ 计数器的 z 向坐标, i 为刻度用到的所有的径迹. μ 计数器有 1512 个计数管, 配对的两个管子一起作刻度拟合, 刻度一次做 756 次拟合. 用非线性最小二乘法拟合出刻度常数 A, B, C . 这样刻度得到第一层 μ 计数器的 z 向分辨约为 5.1cm.

4.2 重建中 z 向信息的修正及刻度的改进

在前文中提及的 Z_{nd} 分辨不为 1, 是由于在重建过程和刻度过程中位置坐标计算不一致造成的. 由于在重建过程中对坐标作多次击中的平均不合适, 从而导致重建过程 z 坐标的分辨变差, 也导致 Z_{nd} 的分辨不为 1. 在保证重建和刻度过程位置坐标计算一致的情况下, 刻度和重建过程的 z 向分辨相近,

第一层分辨约为 5.1cm. Z_{nd} 的分辨趋于 1, 从内到外, 3 层的分辨依次为 0.93, 1.06 和 1.09.

BES-II 的 μ 计数器刻度过程, 要求两根配对计数管的刻度常数 B 存在互为倒数的关系, 从而两根计数管在一起作刻度拟合时约束较强, 影响刻度拟合的结果. 并且用原来的刻度方法, 刻度结果 $\Delta Z (= Z_{\text{proj}} - Z_{\text{hit}})$ 沿 z 向的分布存在明显的起伏, 而不是预期的平坦分布, 见图 8(a). 为了提高刻度精度, 我们取消配对计数管刻度常数 B 的约束, 每根计数管分别刻度拟合. 新的刻度结果中, $\Delta Z (= Z_{\text{proj}} - Z_{\text{hit}})$ 沿 z 向的分布起伏有明显改善, 见图 8(b), 刻度结果相应有所改善. 3 层 μ 计数器 z 向分辨为 $\sigma_z = 5.0\text{cm}, 7.0\text{cm}$ 和 8.6cm . 见图 9.

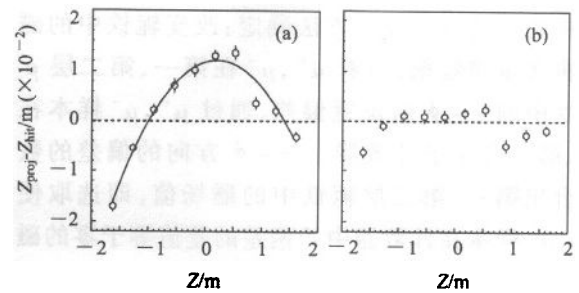


图 8 μ 计数器第一层 ΔZ 沿 Z 的分布
(a) 原来的刻度结果; (b) 配对丝分开刻度的结果.

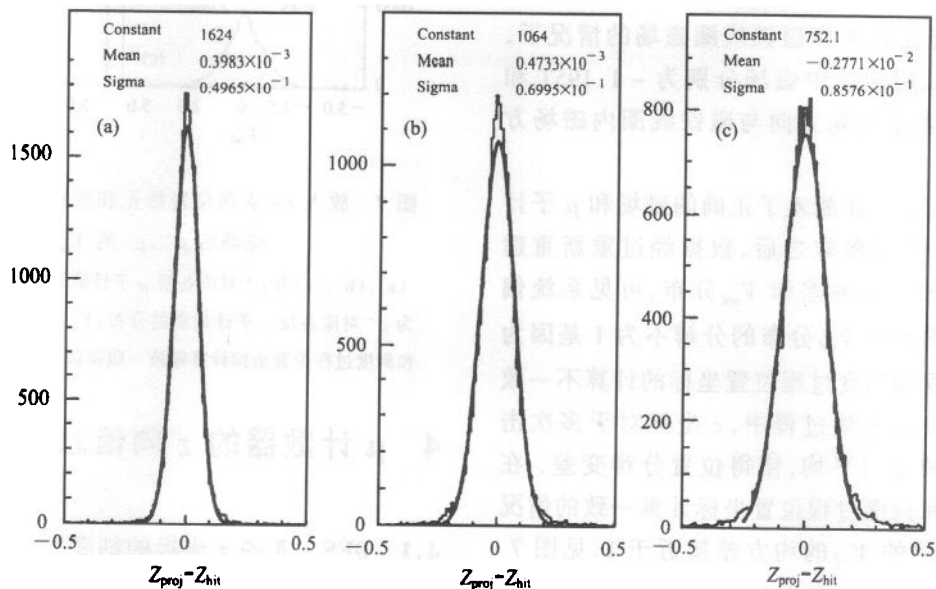


图 9 配对丝分开刻度 μ 计数器 z 向分辨
(a), (b), (c) 对应 3 层 μ 计数器.

5 结果与讨论

通过以上改进,修正了北京谱仪 μ 计数器在 $r-\phi$ 方向的系统偏差,得到了更好的位置分辨. 第一层 μ 计数器 z 向分辨由 5.6cm 提高到 5.0cm,改善 12%. 对 Monte Carlo 模拟数据(BES II 模拟软件 SIMBES104 版本)作了同样的分析研究,见表 1. 其中 M.C. 模拟的原始数据的重建过程与改进后的数据的重建过程一致,但是没有放入 μ 计数器每一簇的位置偏移. 对比发现 M.C. 数据在 $r-\phi$ 方向的 V_{rad} 分布的均值存在系统偏差,均方差大于 1. μ 计数器第一层的 Z_{rad} 分布的方差远小于 1, 3 层 μ 计数器 z 向分辨分别为 $\sigma_z = 4.2\text{cm}, 6.6\text{cm}$ 和 8.9cm , 与数据有差别. M.C. 数据与真实数据的不一致表明 M.C. 模拟中尚存在需要改进的地方.

表 1 M.C. 数据 μ^+, μ^- 的 $V_{\text{rad}}, Z_{\text{rad}}$ 分布和 z 向分辨

		第一层	第二层	第三层	
V_{rad} 分布	均值	μ^+	-0.132	-0.154	0.136
		μ^-	0.109	0.050	0.194
	均方根偏差	μ^+	1.138	1.199	1.197
		μ^-	1.121	1.206	1.191
Z_{rad} 分布	均值	0.035	0.023	0.024	
	均方根偏差	0.758	0.993	1.066	
z 向分辨		4.19cm	6.62cm	8.87cm	

综上所述,研究了北京谱仪 μ 子计数器的性能,对刻度和重建方法作了改进和完善,使得探测器的性能指标有较大幅度提高,这对于更有效地利用 μ 计数器的信息进行物理分析是很有意义的.

诚挚地感谢毛泽普、朱永生、韩世温、陈江川、黄亮和杜书先等的有益讨论.

参考文献 (References)

- 1 BES Collab. Nucl. Instr. Meth., **A344**(1994)319—334
- 2 ZHU Yong-Sheng et al. HEP & NP, 1989, **13**(7): 586—593 (in Chinese)
(朱永生等. 高能物理与核物理, 1989, **13**(7): 586—593)
- 3 BES Collab. Phys. Rev. Lett., 1992, **69**: 3021—3024
- 4 BES Collab. Phys. Lett., 1998, **B429**: 188—194
- 5 BES Collab. Phys. Rev. Lett., 1995, **74**: 4599—4602
- 6 GU Jian-Hui et al. HEP & NP, 1996, **20**: (1): 26—31 (in Chinese)
(顾建辉等. 高能物理与核物理, 1996, **20**(1): 26—31)
- 7 BES Collab. HEP & NP, 1996, **20**(2): 97—106 (in Chinese)
(BES 合作组. 高能物理与核物理, 1996, **20**(2): 97—106)
- 8 YUAN Chang-Zheng. Master thesis, Institute of High Energy Physics (1994)
(苑长征. 硕士学位论文, 高能物理研究所, 1994)
- 9 GUO Ya-Nan. Nucl. Instr. Meth., 1996, **A379**: 349—353
- 10 Harris F A. Recent $\psi(2S)$ and η_c Result from BES. Report at ICHEP 2002, Amsterdam, Holland, July 24—31, 2002

Study of BES II Muon Counter Performance*

WANG Zheng¹⁾ YUAN Chang-Zheng QI Na-Ding

(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China)

Abstract The BES II Muon Counter (MUC) performance is carefully studied. The MUC cluster positions and the magnetic fields in the coil and iron yoke of BES II are calibrated by dimuon events collected at J/ψ and $\psi(2S)$ peak energies. With these calibration constants, the MUC raw data are re-reconstructed, the offsets of hit-positions in $r-\phi$ plane are diminished, and a better resolution is achieved. The charge-division algorithm to determine the hit position in z direction is modified, which improves the z resolution to 5cm for the first layer of MUC. All these modification will make the data analyses involving MUC information more reliable.

Key words BES, muon counter, position resolution, magnetic field, calibration

Received 9 January 2003

* Supported by National Natural Science Foundation of China (19991480), "100 Talents Programme of CAS" (U-25)

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