

# MRPC-TOF 时间性能和刻度方法的研究\*

李亮<sup>1)</sup> 邵明<sup>2)</sup> 陈宏芳 李澄 唐泽波 董昕 汪晓莲

(中国科学技术大学近代物理系 合肥 230026)

**摘要** 研制的由28个多气隙电阻板室(MRPC)模块构成飞行时间探测系统,从2003年以来在RHIC-STAR实验上成功运行并获得了大量的实验数据.为了深入了解MRPC实际运行中的性能,采用质心能量200GeV的Au-Au对撞的实验数据,对MRPC-TOF的刻度方法进行了深入研究,主要包括:(1)对现有的刻度方法做了进一步的改进;(2)对粒子入射角度等因素进行了修正;(3)STAR径迹重建的位置分辨率对MRPC时间分辨率影响.用改进后的刻度和修正方法,计算得到MRPC的本征时间分辨率为大约60ps,与束流实验结果相近.

**关键词** MRPC TOF 时间分辨率 刻度

## 1 引言

RHIC-STAR实验是近年来中美之间高能领域重要的合作项目,其主要目的是通过相对论重离子对撞实验(RHIC),研究极端条件下核物质的行为,寻找由强子物质向夸克物质——夸克胶子等离子体(QGP, Quark-Gluon Plasma)——相变的信号<sup>[1, 2]</sup>.为进一步提高粒子鉴别的能力,STAR合作组正在建造基于多气隙电阻板室(MRPC)的飞行时间谱仪(TOF)<sup>[3]</sup>,要求TOF系统的时间分辨 $\leq 100\text{ps}$ ,使得STAR探测系统的 $\pi/K$ 分辨和 $K/P$ 分辨( $3\sigma$ )从目前的 $0.65\text{GeV}/c$ 和 $1.3\text{GeV}/c$ 分别提高到 $1.6\text{GeV}/c$ 和 $2.6\text{GeV}/c$ .MRPC作为飞行时间探测器的主要优点是时间分辨率好,探测效率高,价格便宜,单元面积可以做得很小,可以构成不同形状的大面积MRPC阵列<sup>[4]</sup>.2003年STAR-TOF合作组制作了由28个MRPC模块构成飞行时间探测器阵列,并安装在STAR谱仪上.在2003至2005年度RHIC物理运行中,MRPC-TOF成功地采集了大量的实验数据,并获得了很好的物理结果<sup>[5]</sup>.

采用常规方法,MRPC主要的时间性能刻度包括时间零点刻度( $T_0$ )、时-幅刻度( $T_A$ )以及粒子击中位

置刻度( $T_z$ ),分别修正由于读出单元电子学传输线长度不同、信号幅度不同以及粒子 $z$ 方向(沿读出条长轴方向为 $z$ 方向,短轴方向为 $y$ 方向)击中位置不同而引起的时间上的晃动.依次进行 $T_0$ ,  $T_A$ ,  $T_z$ 刻度,可得到MRPC本征时间分辨率为 $\sim 85\text{ps}$ <sup>[6]</sup>,而束流测试结果为 $60\text{ps}$ <sup>[4]</sup>,两者有较大差距.原因可能有两方面:1)常规刻度方法还有进一步改进的余地;2)实验环境中其他未考虑到的因素对MRPC的时间分辨率有影响.因此有必要对MRPC的时间特性和刻度方法进行深入的研究.

## 2 MRPC时间刻度方法的改进

为了对MRPC时间刻度方法作改进,提高统计精度,在数据分析过程中,采用质心能量200GeV的Au-Au对撞物理运行的实验数据,共采集 $\sim 1.6\text{M}$ 有效TOF事例.刻度过程中利用STAR时间投影室(TPC)的电离能损和动量测量挑选了动量在 $300\text{--}600\text{MeV}/c$ 的带电 $\pi$ 粒子样本 $\sim 25$ 万.

由于STAR-TOF在运行时定时信号触发采用的是定阈前沿甄别,定时结果与信号幅度有一定关联,需要进行时-幅( $T_A$ )修正.因为数据量限制,一般的

2006-09-21 收稿, 2006-10-21 收修改稿

\* 国家自然科学基金(10375062, 10610286)和中国科学院知识创新工程(KJCX2-YW-A14)资助

1) E-mail: trumpet@mail.ustc.edu.cn

2) E-mail: swing@ustc.edu.cn

$T_A$  刻度方法将所有读出条的数据叠加在一起进行刻度, 但考虑到不同读出条的信号读出略有差异, 导致  $T_A$  关系会略有不同. 在数据量足够的情况下, 可以对每个读出条单独进行  $T_A$  刻度. 图 1 给出了同一个 MRPC 模块上的两个读出条的  $T_A$  拟合曲线. 可以看出,  $T_A$  关系在信号幅度 (ADC) 较小时偏离可达 0.5ns, 不同读出条  $T_A$  关系有显著差别, 表明各读出条单独刻度确有必要.  $T_A$  修正中采用的拟合曲线函数形式为  $f(x) = \frac{A}{\sqrt{x}} + \frac{B}{x} + \frac{C}{x\sqrt{x}} + \frac{D}{x^2} + E$ , 式中  $A, B, C, D$  和  $E$  为待定拟合系数.

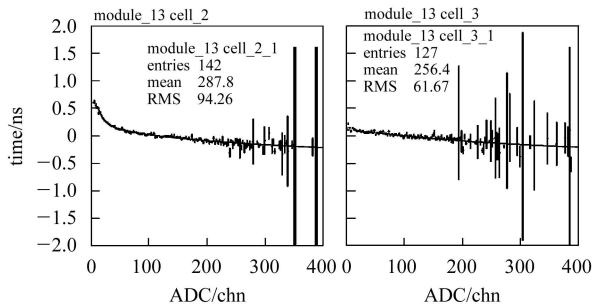


图 1 同一个 MRPC 模块上的两个不同读出条的  $T_A$  修正拟合结果

由于 MRPC 信号读出在读出条的一端, 因此随粒子击中读出条上位置的不同, 会导致感应信号在读出条上传输时间的不同. 读出条上的坐标见图 2 所示. 测得的信号到达时间与  $z$  方向位置大致呈线性关系, 粒子击中位置离读出端越远, 所需传输时间越长. 现有的  $T_z$  刻度将所有读出条的数据叠加在一起进行修正. 由于实际运行中各读出条本身参数和电子学读出均略有差异, 有必要对每个读出条单独进行  $T_z$  刻度. 图 3 所示的  $T_z$  拟合曲线显示了不同 MRPC 读出条  $z$  向位置刻度的差异.

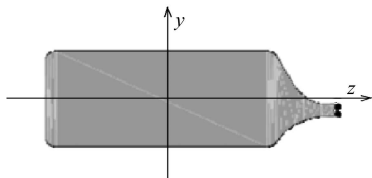


图 2 MRPC 读出条形状及坐标系定义, 右端为信号读出端

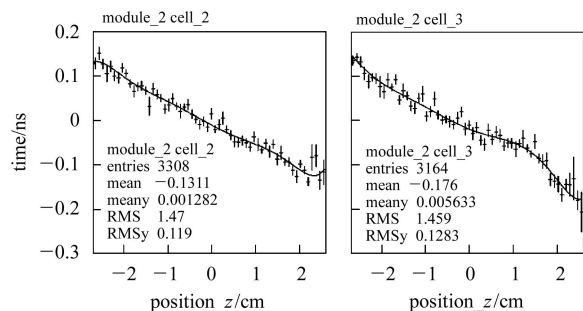


图 3 两个不同 MRPC 读出条的  $T_z$  拟合曲线

除了上述影响 MRPC 时间性能的因素外, 由于带电粒子在磁场中的偏转, 粒子击中 MRPC 时必然有一定的入射角度, 这可能造成定时的晃动. 对入射角度进行刻度的原理如图 4 所示. 考虑到 MRPC 有一定厚度  $l$ , 当粒子以一定的倾角  $\delta$  (与读出条面法线方向夹角) 沿  $AO$  入射时, 气体中雪崩过程在上下读出条上产生感应信号的平均位置  $z'$  与径迹探测器给出的粒子的入射位置  $z$  有一定的距离  $D$ , 且满足  $D = \frac{l}{2} \tan \delta$ . 角度的不同会引起距离  $D$  的变化, 进而导致时间上的晃动. 另外, 考虑粒子穿越 TOF 模块的飞行时间随入射角度不同会导致信号形状的变化, 也会对传输时间产生影响. 在读出条坐标系中, 设法线方向为  $OX$ , 规定入射粒子与读出条法线方向的夹角为  $\delta$ .  $\delta$  可分解为  $z$  方向的倾角  $\theta$  和  $y$  方向的倾角  $\phi$ . 对每个读出条, 用七次多项式拟合  $T-\theta$  关系, 进行  $T\theta$  刻度. 某一个 MRPC 模块的 2 个读出条的刻度曲线如图 5 所示, 可见它们都有较明显的  $\theta$  依赖关系.

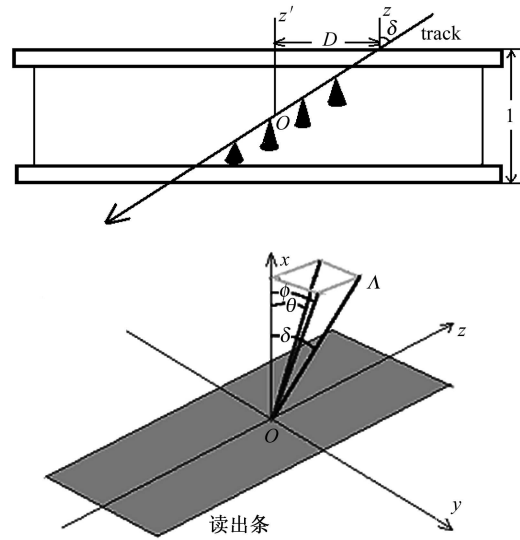


图 4 入射角度刻度的原理示意图

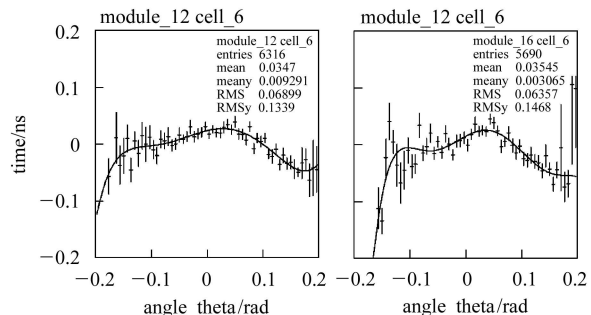


图 5 两个不同 MRPC 读出条的  $T-\theta$  刻度拟合曲线

由于MRPC读出单元是二维条形的,沿 $y$ 方向不同粒子击中位置信号传输延时也可能有所差别.尝试进行 $T_y$ 刻度,与前面的刻度相比, $T_y$ 刻度的贡献很小,可以忽略.由于 $\phi$ 与 $y$ 同向,预计 $T_\phi$ 刻度的贡献更小,故不再进行 $T_\phi$ 刻度.

经过以上的刻度,得到MRPC-TOF系统总时间分辨为74ps(图6,图7).对于Au-Au 200GeV数据,TOF系统起始时间的分辨为20ps,扣除起始时间分辨,MRPC本身的时间分辨率为:

$$\sigma_{\text{MRPC}} = \sqrt{\sigma_{\text{total}}^2 - \sigma_{\text{start}}^2} = \sqrt{74^2 - 20^2} = 71\text{ps}.$$

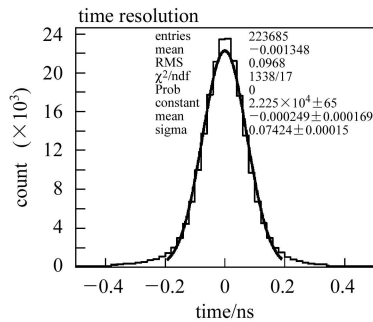


图 6 MRPC-TOF 系统总时间分辨率

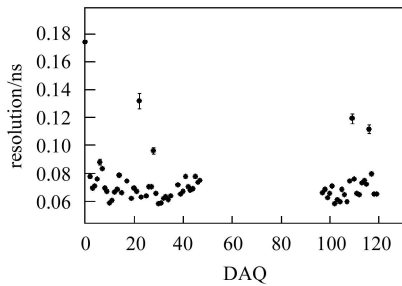


图 7 各MRPC读出条的时间分辨率, DAQ表示读出单元编号

### 3 MRPC-TOF 时间分辨的修正

经过上述刻度后MRPC时间分辨与束流测试结果( $\sim 60\text{ps}$ )仍有差距.为找出其原因,需要对MRPC-TOF时间分辨特性进行进一步分析.由于前面已进行了比较充分的刻度,基本消除了各种因素对TOF定时的影响,这也有利于比较全面地了解MRPC在STAR上实际运行时的工作性能.

图8是STAR上MRPC-TOF时间分辨率(包含起始时间的贡献)与ADC的关系,可以发现当ADC较小和较大时,时间分辨率比较差,而在中间时间分辨率较好,有一段大约为70ps的坪区.分析原因是小信号受噪声影响比较大,故ADC较小时时间分辨率比较差.而大信号流光成分较多,从而导致时间分辨率变坏.

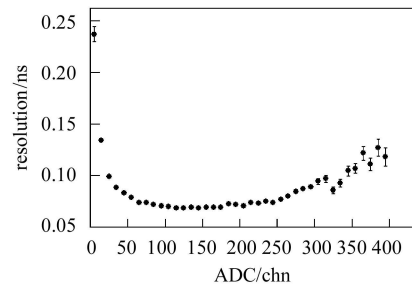


图 8 STAR上MRPC-TOF时间分辨率与ADC的关系

图9是STAR上MRPC-TOF时间分辨率与粒子击中读出条 $z$ 方向坐标的关系,与束流测试条件下的结果(见文献[4])比较接近.信号读出端附近时间分辨率最差,趋向读出条中央时时间分辨率变好,继续远离读出端时间分辨率又略微变差.近读出端时间分辨率变差的原因主要是在此处读出条形状不规则,信号传输中可能存在信号反射影响.

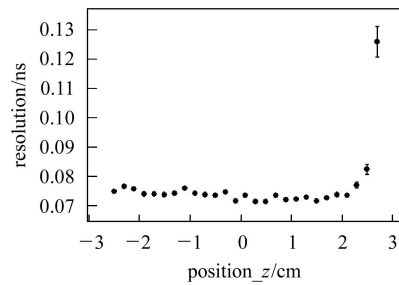


图 9 MRPC-TOF 时间分辨率与读出条 $z$ 方向坐标的关系

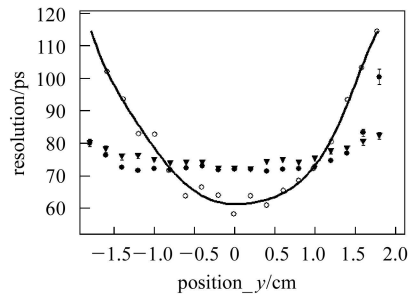


图 10 MRPC-TOF 时间分辨率与读出条 $y$ 方向坐标的关系及模拟分析

图10是MRPC-TOF时间分辨率与粒子击中读出条 $y$ 方向坐标的关系.束流测试结果(空心圆圈)<sup>[4]</sup>与STAR结果(实心圆点)有明显差别.尽管由于边缘效应,时间分辨率在读出条边缘会变差,但在读出条中间区域两者行为不同,这表现在STAR上MRPC时间分辨率在读出条中间的坪区(约3cm)比束流测试条件下宽.其原因可能是STAR径迹探测器给出的 $y$ 向位置准确度不够带来的影响.假设存在1cm的定位误差,对束流测试结果模糊化,则模拟值(实心倒三角)与在STAR测得的结果比较吻合.这表明定位误差可能是

导致STAR上MRPC时间分辨率与坐标 $y$ 的关系与束流测试条件下不同的主要原因。

图11是MRPC-TOF时间分辨率随入射粒子与MRPC读出条平面法向总夹角 $\delta$ 的变化关系。可见,角度越大,时间分辨率越差。其原因将在下文论述。

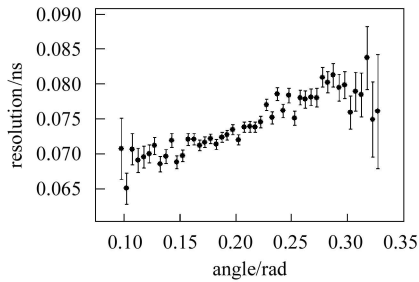


图11 STAR上MRPC-TOF时间分辨率与总夹角 $\delta$ 的关系

进一步考察TOF时间分辨率的动量( $p$ )依赖特性。分析时,确定事例选取条件为 $0.3\text{GeV}/c < p < 1.9\text{GeV}/c$ ,  $|\text{TOF} - T_\pi| < 0.2\text{ns}$  (TOF为粒子飞行时间,  $T_\pi$ 为 $\pi$ 介子预期飞行时间)。图12给出了STAR上MRPC-TOF时间分辨率与总动量 $p$ 之间的关系。可以看出,TOF时间分辨率表现了明显的动量关联,大体上动量越高,则时间分辨率越好(这也恰好是粒子鉴别对时间分辨率要求较高的地方)。当动量大于 $0.5\text{GeV}/c$ 时,TOF的时间分辨率可以达到 $70\text{ps}$ 以下。由于动量高的粒子径迹在磁场中弯曲程度较小,这也解释了图11中时间分辨率与入射角 $\delta$ 之间的关系。

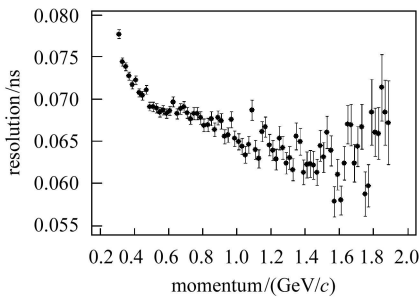


图12 STAR上MRPC-TOF时间分辨率与总动量 $p$ 的关系

鉴于TOF时间分辨率对粒子击中位置和动量的依赖关系,我们利用蒙卡模拟方法对STAR全探测器进行模拟、重建,在此基础上进一步分析了STAR的径迹重建系统的位置分辨率。模拟结果表明,STAR径迹重建系统给出的粒子击中TOF的位置有比较大的误差。图13为其沿MRPC读出条 $z$ 方向和 $y$ 方向的位置分辨率随总动量 $p$ 的变化。其中 $y$ 方向的模拟结果与前文中对图10的论述一致(因考察粒子为动量 $300\text{--}600\text{MeV}/c$ 的带电 $\pi$ 介子)。可见在较低动量区间,STAR探测器有较大的定位误差,这将给TOF定

时带来额外的晃动,使时间分辨率变差。以下定量地考察其对MRPC总时间分辨的影响。

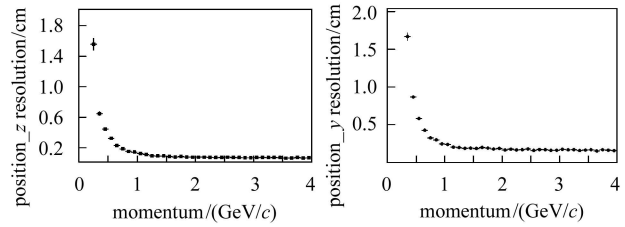


图13 STAR重建粒子击中TOF的位置分辨率(沿读出条 $z$ 方向——左图,沿读出条 $y$ 方向——右图)随总动量 $p$ 的改变

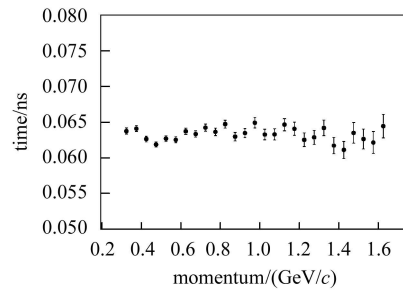


图14 STAR上MRPC的本征时间分辨率随总动量 $p$ 的变化

根据文献[7,8],信号沿读出条 $z$ 方向传导有一定速度 $v_z$ :  $\frac{1}{v_z} = 45\text{ps}/\text{cm}$ 。根据 $T_z$ 刻度, $z$ 方向定位的误差,将导致 $T_z$ 刻度不准,带来额外的时间晃动。换言之, $T_z$ 刻度的应用把径迹重建系统位置分辨率的贡献引入到了最终MRPC的时间分辨率中。根据下面公式,可以将此贡献扣除:

$$\sigma_{\text{intrinsic}} = \sqrt{\sigma_{\text{MRPC}}^2 - \left(\frac{\sigma_z}{v_z}\right)^2}$$

除 $z$ 方向定位误差外, $y$ 方向位置分辨率也会对MRPC时间分辨率有所影响。但如前文所述, $T_y$ 刻度对MRPC时间分辨几乎没有影响,故我们可忽略 $y$ 方向定位误差的贡献。

将图12按上面公式扣除 $z$ 方向位置分辨带来的影响后(已减去系统起始时间晃动),即得到STAR上MRPC的本征时间分辨随总动量 $p$ 的分布(图14)。可见,扣除STAR径迹重建系统位置分辨的贡献后,MRPC时间分辨的动量依赖已基本消除。而且此时的时间分辨约为 $60\text{ps}$ ,这个结果与束流测试结果相当。这说明STAR径迹重建系统位置分辨对MRPC时间分辨和刻度有明显的贡献。

## 4 结论

通过对现有MRPC的时间刻度方法 $T_A$ 刻度、 $T_z$ 刻度的改进,并对粒子入射角度等因素进行了修正,使STAR上的MRPC-TOF的时间分辨率达到 $\sim 70\text{ps}$ .利用TPC提供的径迹信息,对MRPC时间分辨率对信号幅度、入射位置、角度和粒子动量等参量的依赖关系进行了研究. STAR上运行的MRPC-TOF时

间分辨率表现出明显的角度依赖和动量依赖特性,在较高的动量区域( $p > 0.5\text{GeV}/c$ )整体时间分辨率可达到 $70\text{ps}$ 以下.通过对MRPC时间分辨特性的分析,以及束流测试结果的比较,发现STAR径迹探测器位置分辨能力尤其是 $z$ 方向位置分辨能力的不足,导致MRPC的位置( $T_z$ )刻度变差.在扣除位置分辨对总时间分辨率的贡献后,得到MRPC的本征时间分辨率为 $\sim 60\text{ps}$ .

## 参考文献(References)

- 1 Collins J C, Perry M J. Phys. Rev. Lett., 1975, **34**: 1353; Lee T D. Phys. Rev., 1979, **D19**: 1802; Lee T D. Nucl. Phys., 1995, **A590**: 11c
- 2 STAR Whitepaper. Nucl. Phys., 2005, **A757**: 102
- 3 The STAR TOF Collaboration. Proposal for a Large Area Time of Flight System for STAR. May 24, 2004; [http://wjlllope.rice.edu/~TOF/TOF/Documents/TOF\\_20040524.pdf](http://wjlllope.rice.edu/~TOF/TOF/Documents/TOF_20040524.pdf)
- 4 Zebballos E C, Choi J, Hatzifotiadou D et al. Nucl. Instrum. Methods, 1999, **A434**: 362; SHAO M, RUAN L J et al. Nucl. Instrum. Methods, 2002, **A492**: 344; CHEN Hong-Fang, LI Cheng, WANG Xiao-Lian et al. HEP & NP, 2002, **26**(3): 201—206 (in Chinese); LI Cheng, CHEN Hong-Fang, SHAO Ming et al. HEP & NP, 2002, **26**(5): 455—461 (in Chinese)
- 5 Adams J et al(STAR). Phys. Lett., 2005, **B616**: 8; Adams J et al(STAR). Phys. Rev. Lett., 2005, **94**: 062301
- 6 WU Jian, Bonner B et al. Nucl. Instrum. Methods, 2005, **A538**: 243; RUAN Li-Juan, WU Jian, DONG Xin et al. HEP & NP, 2005, **29**(2): 157—161 (in Chinese)
- 7 Akindinov A V et al. Nucl. Instrum. Methods, 2004, **A532**: 611—621
- 8 WU J, Bonner B, CHEN H F et al. Nucl. Instrum. Methods, 2002, **A492**: 344

# Study on MRPC-TOF Timing Properties and Calibration Methods<sup>\*</sup>

LI Liang<sup>1)</sup> SHAO Ming<sup>2)</sup> CHEN Hong-Fang LI Cheng TANG Ze-Bo DONG Xin WANG Xiao-Lian

(Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract** A prototype Time-of-Flight (TOF) detector, consisting of 28 Multi-gap Resistive Plate Chambers (MRPC), has been successfully operated at RHIC-STAR experiment since 2003. Extensive study on the calibration procedure of the MRPC-TOF is performed in order to better understand MRPC's performance. Improvements and extension on current calibration method are discussed. Furthermore, it has been found that the position resolution of the reconstruction system at STAR has significant impact on the MRPC time resolution. After subtracting this effect, the intrinsic time resolution of MRPC is found to be about  $60\text{ps}$ , which is in good agreement to beam test results.

**Key words** MRPC, TOF, time resolution, calibration

Received 21 September 2006, Revised 21 October 2006

<sup>\*</sup> Supported by National Science Foundation of China (10375062, 10610286) and Knowledge Innovation Project of CAS (KJJCX2-YW-A14)

1) E-mail: trumpet@mail.ustc.edu.cn

2) E-mail: swing@ustc.edu.cn