



新型气体探测器 MRPC

邵明*, 孙勇杰, 李澄, 陈宏芳, 汪晓莲

中国科学技术大学物理系, 合肥 230026

*联系人, E-mail: swing@ustc.edu.cn

收稿日期: 2012-07-04; 接受日期: 2012-09-03; 网络出版日期: 2012-10-25

国家自然科学基金(批准号: 10610286)和中国科学院知识创新工程基金(编号: KJCX2-YW-A14)资助项目

摘要 介绍了新型探测器多气隙电阻板室(Multi-gap Resistive Plate Chamber, MRPC)在中国十多年的发展. 伴随着在相对论重离子对撞机(Relativistic Heavy Ion Collider, RHIC)上 STAR 实验的成功运行和在带电粒子鉴别方面的突出作用, MRPC 技术在高能核与粒子物理领域逐渐得到广泛应用, 有力地促进了相关物理课题的研究.

关键词 多气隙电阻板室, 高能物理, 重离子物理

PACS: 29.40.Cs, 25.75.-q

doi: 10.1360/132012-606

多气隙电阻板室(Multi-gap Resistive Plate Chamber, MRPC)出现于 20 世纪 90 年代中期^[1], 由大型强子对撞机(LHC)上的 ALICE 合作组首先研制成功, 其主要目的是为了在高能重离子对撞产生的高多重数末态环境中高效地鉴别带电粒子, 同时保持相对低廉的成本. 作为一种新型的气体探测器, MRPC 尤其适合用于建造大面积、多通道的高性能探测器.

1 MRPC 技术在国内的发展

1.1 MRPC 技术原理

MRPC 是在阻性板室(RPC)^[2]的基础上发展起来的一种新型气体探测器, 主要用于高精度的定时测量. MRPC 的工作电场强度较高, 气体放大为有限正比模式, 其主要结构是多块平行放置的阻性板阵列, 板间距通常为 200–300 μm , 并充满负电性的工作气

体(通常为氟利昂). 高压通过最外层的阻性板加在整个阵列上, 中间阻性板电位悬浮, 当带电粒子穿过 MRPC 结构时, 在板间气隙中产生电离, 并由强电场(通常为 100 kV/cm)引发气体雪崩放大, 在外层感应单元上形成脉冲信号从而被读出. 小的气隙有利于减小气体放大过程的时间涨落, 从而提高定时精度; 多层阻性板(体电阻约 10^{10} – 10^{14} $\Omega\text{ cm}$)的作用是猝灭气体雪崩放大的过度发展, 保证 MRPC 工作在有限正比模式, 负电性的工作气体也起着类似作用; 气体雪崩放大的时间尺度为几个 ns, 因此阻性板对此快信号是“透明”的, 读出感应信号是所有气隙中雪崩过程的叠加, 有效改善了信号幅度分布和进一步降低气体雪崩放大过程中的涨落.

作为平板形气体探测器, MRPC 的制作和运行相对简单. 同时由于不同气隙间雪崩放大的补偿效应, 保证所有气隙的增益相当, 进一步简化了室体的机

引用格式: 邵明, 孙勇杰, 李澄, 等. 新型气体探测器 MRPC. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2012, 42: 1135–1140

Shao M, Sun Y J, Li C, et al. New type gaseous detector-MRPC (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2012, 42: 1135–1140, doi: 10.1360/132012-606

械结构精度要求. 阻性板材料常采用普通浮法玻璃或电木. 因此 MRPC 的研制工艺要求相对简单, 造价低, 易于大面积制作, 并具有很好的稳定性. 图 1 给出了 MRPC 的结构示意图.

1.2 MRPC 技术在国内的发展

MRPC 在中国的首次研制是由中国科学技术大学近代物理系的高能实验室在 2000 年完成的, 其背景是美国布鲁克海文国家实验室(BNL)相对论重离子对撞机(RHIC)上的 STAR 实验希望采用 MRPC 技术建造飞行时间谱仪(TOF), 以提高其末态带电粒子的鉴别能力. 多家国内科研单位和高校参与了此项合作, 并由中国科学技术大学负责前期的技术研发.

早期的 MRPC 室体相对简单, 仅有一个读出单元, 灵敏面积约 $4\text{ cm} \times 4\text{ cm}$, 其目的是验证该技术的可行性. 2000 年底, 在欧洲核子中心(CERN)的测试束流上, 科大制作的第一个 5 气隙的 MRPC 原型进行了测试. 数据分析显示, 该原型工作正常, 时间分辨率好于 70 ps, 探测效率在 95% 以上^[3]. 在此初步成功的基础上, 多种不同结构和读出方法的 MRPC 模块陆续被研制出来, 并逐渐优化以适应 STAR 探测器的工作环境. 室体灵敏面积增加到约 $6\text{ cm} \times 20\text{ cm}$, 每个模块有 6–12 路读出, 气隙数增加到 6–10 个, 气隙宽度则取为 0.22–0.25 mm. 经过 CERN 的束流测试, 新的 MRPC 模块设计取得了很好的结果. 对于 6 气隙 12 路读出 MRPC 模块, 时间分辨可达 60 ps, 探测效率在 97% 以上; 采用双层结构的 10 层气隙 MRPC 模块, 时间分辨更达到 50 ps, 探测效率超过 99%, 且具

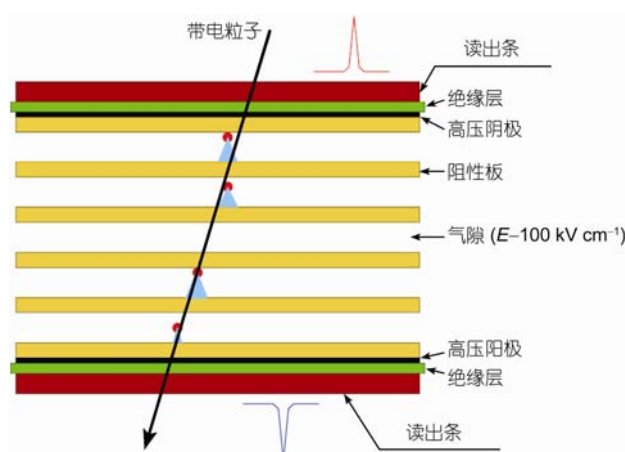


图 1 (网络版彩图) MRPC 结构示意图

Figure 1 (Color online) Schematic structure of MRPC.

有很好的均匀性^[4]. 综合考虑物理要求、性能参数和制作工艺、成本以及 STAR-TOF 的空间限制, 最终的 MRPC 模块设计采用了 $6 \times 0.22\text{ mm}$ 气隙, 6 路读出的方案^[5].

2002 年, 根据最终确定的设计方案, 中国科学技术大学和美国莱斯大学的一个实验组分别制作了小批量 MRPC 模块, 并共同组装成一个拥有 32 个室体的 TOF-Tray(TOFr). TOFr 具有适合安装在 STAR 探测器系统中运行的所有特点, 包括完整的高压、气体和读出电子学系统, 可以直接参加 STAR 物理取数. 经过 BNL 的束流测试后^[6], TOFr 被安装到 STAR 探测器系统中, 取代了 STAR 原有的一块中心触发桶模块的位置, 并保持稳定运行至今. 值得指出的是, 通过这次小批量 MRPC 研制, 中方提供的模块性能显示出具有优异的性能, 得到了 STAR 同行的一致好评, 从而促使 STAR 最终决定其 TOF 系统全部采用中国生产的 MRPC 制作(Proposal for a large area time of flight system for STAR. http://www.star.bnl.gov/~ruanlj/MTDreview2010/TOF_20040524.pdf).

根据 TOFr 小批量制作经验和测试结果, 以及对 MRPC 工作机理的深入研究^[7–9], 为 STAR-TOF 提供大批量 MRPC 模块的制作工艺流程、质量检控等要求逐步明确. 2006 年, 由国家自然科学基金委、中国科学院和科技部资助的重大国际合作项目正式立项, 多家国内科研单位和高校分工合作, 共同进行 STAR-TOF 的研制和 RHIC 物理研究. 至 2009 年, 所有的 4000 多 MRPC 模块由清华大学和中国科技大学制作完成. 由于对 MRPC 技术理解充分, 制作工艺和质量控制得当, 最终的成品率高达 95% 以上, 且性能参数保持很好的稳定性和一致性^[10].

STAR-TOF 的成功研制, 以及对 RHIC-STAR 物理研究的促进, 大大推动了 MRPC 技术在国内的发展, 如北京电子谱仪(BESIII)端盖 TOF 的升级将采用 MRPC 技术. 除了在高能物理领域的进一步研究和应用, MRPC 在更广泛的领域(如生物、能源、环境、天文等)也受到越来越多的关注, 其技术本身在诸如中子、光子和 X 射线探测等方面正得到更深入的发展.

2 MRPC-TOF 在 STAR 的运行

2.1 MRPC 的离线刻度

绝大多数 MRPC 在时间测量中采用快速前放+

定阈甄别的方法, 以充分利用 MRPC 在强电场条件下气体雪崩放大感应产生的快前沿输出脉冲信号(通常大约 1 ns). 但由于气体雪崩过程的本征统计涨落, MRPC 信号有较宽的幅度分布, 因而其定时-幅度关联(slewing, T-A)效应明显. 为了获得好的时间分辨率, 对实验数据进行离线刻度是必须的. 另外, 由于 MRPC 读出单元具有一定的尺寸, 且脉冲信号在其上的传播速度有限(常为真空中光速的 60%–70%), 带电粒子击中 MRPC 模块不同位置也会带来一定的定时晃动. 这两个效应是 MRPC 时间刻度的主要方面. 除此之外, MRPC 工作环境温度的变化、工作高压的漂移、本底计数率的改变等因素都可能影响 MRPC 的运行, 但其贡献通常较小, 并可通过仔细的前期设计和严格的运行监控加以控制. 除了 MRPC 探测器自身, 读出电子学也会影响定时精度, 但其刻度应独立于 MRPC 完成.

MRPC 输出信号幅度可以通过多种方法测得, 例如: 测量信号积分电荷量, 或测量信号前后沿之间宽度. 根据不同的读出电路设计, 刻度方法也稍有不同. 2004 年之前, STAR-TOF 的 MRPC 读出电路采用的是电荷量测量的办法, 其 T-A 关系可以用电荷量的幂次多项式很好的描述, 而位置修正则大部分近似线性, 只有在靠近信号引出端的地方有所偏离^[11, 12]. 经过修正, STAR-TOF 的总时间分辨率在黄金中心碰撞事例中可达 80 ps, 扣除起始时间、飞行距离和粒子动量测量误差后, MRPC 本征时间分辨约为 65 ps, 和束流测试结果很好的吻合^[13].

从 2005 年起, STAR-TOF 采用了新的读出电路. 利用 ALICE 合作组为 MRPC 读出专门设计的 NINO ASIC, 可以有效地读出 MRPC 信号的前后沿时间, 从而同时得到前沿定时信息和信号过阈宽度信息(Time-Over-Threshold, TOT), 从而省略了电荷测量电路, 很好的集成了前端电子学. 但采用这种方法读出的时间和 TOT 关系比较复杂, 难以用解析公式分析, 因此我们采用了多次样条函数拟合的办法对其进行刻度, 并取得了成功^[14]. 该方法显示了很好的稳定性, 刻度后的 TOF 时间分辨和采用 T-A 刻度得到的结果一致. 完全满足了 STAR 实验的要求.

从 2002 年至今, 经过仔细的离线刻度, STAR-TOF 的时间分辨率性能在长达 10 年的运行中一直保持稳定.

2.2 MRPC-TOF 用于 STAR 粒子鉴别

TOF 探测器鉴别粒子的基本思路是通过时间测量确定粒子飞行速度, 再结合粒子动量测量信息, 给出粒子的静止质量, 从而分辨粒子种类. 其基本公式

$$\frac{\partial m}{m} = \left(\frac{E}{m} \right)^2 \frac{\partial t}{t}, \quad (1)$$

给出了质量分辨能力与时间测量精度的关系. 显然时间分辨率越好, TOF 的鉴别能力越强.

STAR-TOF 覆盖了赝快度 $|\eta| < 1$, 2π 方位角的中心快度区, 与碰撞点的垂直距离约为 210 cm. 在设计要求的 100 ps 时间分辨率水平下, 能够将 π/K 分辨范围扩展到横动量 ~ 1.6 GeV/c, K/p 分辨的范围扩展到横动量 ~ 3 GeV/c^[15], 见图 2. 在 STAR-TOF 未安装之前, STAR 的末态带电粒子鉴别主要依靠其时间投影室(TPC)的电离能损(dE/dx)测量. TPC 的 dE/dx 测量精度为 $\sim 8\%$, 可以区分横动量 0.7 GeV/c 以下的 π/K 和 1.1 GeV/c 以下的 K/p 末态粒子. 由此可见, TOF 的安装大大增强了 STAR 的粒子鉴别能力.

不仅如此, 在深入分析 STAR-TPC 和 TOF 工作特性的基础上, 我们发展了新的粒子鉴别方法. 联合 TPC 测量的 dE/dx 和 TOF 给出的飞行时间信息, 可以将 STAR 的末态带电 π , p 鉴别范围扩展到横动量 10

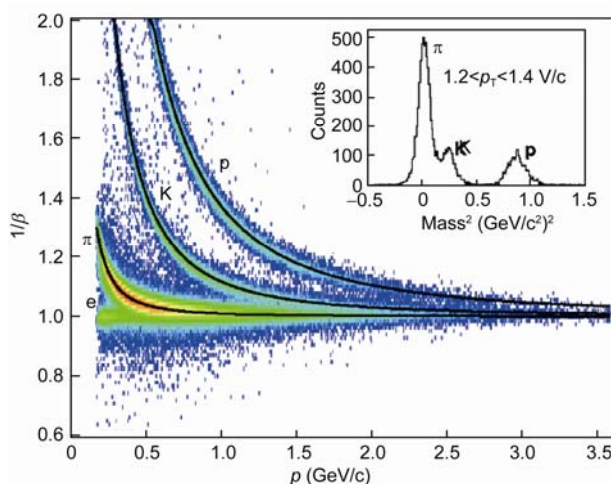


图 2 TOF 对带电粒子的鉴别

图中显示了粒子飞行速度随粒子动量的分布, 小图显示的是横动量 1.2–1.4 GeV/c 区间的强子质量谱, $\pi/K/p$ 的峰位区别很明显

Figure 2 Charged particle identification by TOF. The velocity is plotted as a function of particle momentum. Shown in the inset is the hadron mass distribution in p_T range 1.2–1.4 GeV/c. The separation of $\pi/K/p$ is clear.

GeV/c 以上, 对 K 介子的测量也可达到横动量 5 GeV/c. 其中在 3 GeV/c 以下, TOF 是粒子鉴别的主要探测器; 而在更高横动量, 通过测量在相对论上升区的 dE/dx 可以有效区分 π 和 p , 此时 TOF 起着电离能损参数检验和修正的作用. 同时, 这个方法还可以有效地鉴别电子. 由于电子在 STAR 可探测的运动学参数范围内速度约等于光速, 可以通过飞行时间和距离的测量将粒子速度限制在接近光速的小区间内, 然后再通过比较其电离能损即可很好地将电子和其他强子分离(见图 3). 在横动量 4 – 5 GeV/c 以下, 此方法对强子的排除能力可达 10^5 [16]. 通过鉴别方法的发展, 在增加了 TOF 之后, STAR 可以鉴别中心快度区 99% 以上的末态带电成分, 极大地扩展了 STAR 对不同粒子种类开展物理研究的能力.

在低横动量的运动学区间($p_T < 0.25$ GeV/c), 由于 MRPC 良好的时间分辨率, STAR-TOF 还可以用来区分 π 介子和 μ 轻子. 这对某些物理课题(如重夸克的单轻子衰变测量)的开展起着很好的辅助作用.

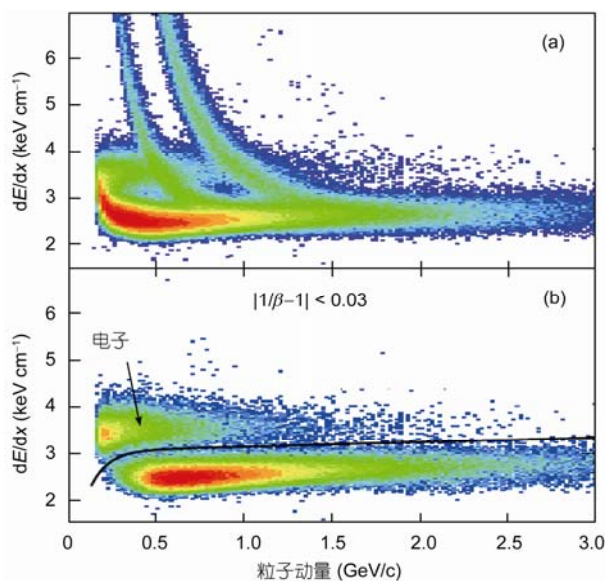


图 3 联合 TPC 和 TOF 鉴别电子

(a) 是所有带电粒子电离能损 dE/dx 随粒子动量的分布; (b) 是限制了粒子飞行速度与真空光速差别小于 3% 的情况, 电子明显从其他带电粒子中区分了出来

Figure 3 Electron identification by combining TPC and TOF at STAR. The dE/dx distributions are plotted as a function of momentum (a) without velocity cut and (b) with a velocity cut by TOF $|1/\beta - 1| < 3\%$. Electrons are separated clearly from hadrons.

3 STAR-TOF 相关物理

STAR-TOF 促进了许多 RHIC 物理的研究, 例如轻强子谱分析、奇异粒子及超子产生、椭圆流(及高阶流)分析、重味夸克产生、稀有粒子寻找等. 本文仅挑选轻强子谱和稀有粒子寻找两个课题加以简要说明.

3.1 轻强子谱

做为重离子碰撞末态产物的主体, 轻强子产生包含了碰撞演化各个阶段的信息. 选择适当的观测量和运动学区间, 可以有针对性地分析不同的物理目标. 通常认为, 重离子碰撞中低动量的轻强子携带了碰撞事例的主要热力学性质, 其集体运动效应很好地由流体模型描述; 而在中横动量区, 轻强子的产生机制和组分夸克标度是人们关注的重点; 高横动量的强子及其产额压低(相对质子-质子碰撞)则是研究部分子在热密核物质中作用机制的重要手段.

STAR-TOF 对轻强子物理的主要贡献在中、高横动量区. 通过对比分析质子-质子碰撞和氩-金碰撞, STAR 分析了 200 GeV 质心能量下不同粒子的 Cronin 效应, 其结论是该能区的 Cronin 效应远小于低能区的结果, 不足以解释金-金碰撞中横动量重子产额的显著提高, 暗示了重离子碰撞末态效应贡献的重要性 [16]. 在 62.4 和 200 GeV 金金碰撞中, STAR 系统研究了 π 和 p 的横动量谱, 给出了中、高横动量区 p/π 产额比和核修正因子的精确测量, 对各种强子化模型如重组模型(Coalescence/Recombination Model)以及喷注猝灭(Jet Quenching)模型参数提出了严格的限制 [17].

3.2 稀有粒子寻找

2011 年, STAR 合作组宣布世界上首次发现反阿尔法粒子(反氦-4 核) [18]. 在 10 亿次金金碰撞、上千亿条带电径迹中, 最终确定了 16 个反阿尔法粒子, STAR-TOF 的鉴别能力是其中的关键之一, 见图 4, 通过飞行时间测量得到的静止质量谱, 阿尔法/反阿尔法粒子清楚地与其他粒子(主要是氦-3/反氦-3 核)分离.

STAR-TOF 还用于搜索其他一些稀有粒子或衰变. 例如: 中国科学家张宗晔提出的 $di-\Omega$ 态, 其衰变产物为两个 Ω 超子, 相对于 TPC, TOF 的存在可以大

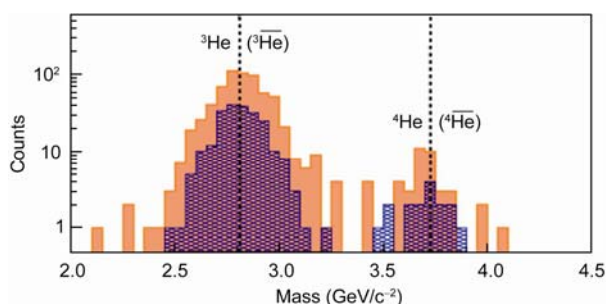


图 4 (网络版彩图) STAR-TOF 测得的氦-4/反氦-4 质量谱
Figure 4 (Color online) The mass distribution of Helium-4/anti-Helium-4 measured by STAR-TOF.

幅度提高 Ω 超子的探测效率和纯度^[19], 因此在 di- Ω 态的寻找中起着重要作用。

4 结论

经过 10 多年的发展, 新型气体探测器 MRPC 技术在中国从无到有的发展了起来。随着 MRPC 工作机理的理解逐渐深入, MRPC 在高能核与粒子物理研究方面起着越来越重要的作用, 有力推动了众多相关物理的开展, 并逐渐推广到更多研究领域。

参考文献

- 1 Zeballos Cerron E, Crotty I, Hatzifotiadou D, et al. A new type of resistive plate chamber: The multigap RPC. Nucl Instrum Meth A, 1996, 374: 132–135
- 2 Santonico R, Cardarelli R. Development of resistive plate counters. Nucl Instrum Meth A, 1981, 187: 377–380
- 3 Li C, Wu J, Chen H F, et al. A prototype of the high time resolution, MRPC. High Energy Phys Nucl Phys, 2001, 25(9): 933–936
- 4 Shao M, Ruan L J, Chen H F, et al. Beam test results of two kinds of multi-gap resistive plate. Nucl Instrum Meth A, 2002, 492: 344–350
- 5 Wu J, Bonner B, Chen H F, et al. The performance of the TOFr tray in STAR. Nucl Instrum Meth A, 2005, 538: 243–248
- 6 Geurts F, Shao M, Bonner B, et al. Performance of the prototype MRPC detector for STAR. Nucl Instrum Meth A, 2004, 533: 60–64
- 7 Ruan L J, Shao M, Chen H F, et al. A Monte Carlo simulation of multi-gap resistive plate chamber and comparison with experimental results. High Energy Phys Nucl Phys, 2003, 27(8): 712–715
- 8 Zhao Y E, Wang X L, Liu H D, et al. Dependence on temperature and voltage of MRPC noise and dark current. Nucl Instrum Meth A, 2005, 547: 334–341
- 9 Shao M, Zhao Y E, Li C, et al. Simulation study on the operation of a multi-gap resistive plate chamber. Meas Sci Technol, 2006, 17(1): 123–127
- 10 Zou T, Wang X L, Shao M, et al. Quality control of MRPC mass production for STAR TOF. Nucl Instrum Meth A, 2009, 605: 282–292
- 11 Ruan L J, Wu J, Dong X, et al. Calibration of TOFr in the STAR experiment (in Chinese). High Energy Phys Nucl Phys, 2005, 29(02): 157–161 [阮丽娟, 伍健, 董昕, 等. TOFr 在 STAR 实验中的标定方法. 高能物理与核物理, 2005, 29(02): 157–161]
- 12 Li L, Shao M, Chen H F, et al. Study on MRPC-TOF timing properties and calibration methods (in Chinese). High Energy Phys Nucl Phys, 2007, 31(06): 576–580 [李亮, 邵明, 陈宏芳, 等. MRPC-TOF 时间性能和刻度方法的研究. 高能物理与核物理, 2007, 31(06): 576–580]
- 13 Shao M, Li L. STAR Collaboration. A study on the intrinsic time resolution of the MRPC used in the STAR-TOF. Int J Mod Phys E, 2007, 16: 2476–2483
- 14 Shao M, Dong X, Tang Z B, et al. Upgrade of the calibration procedure for a STAR time-of-flight detector with new electronics. Meas Sci Technol, 2009, 20: 025102
- 15 Adams J, Aggarwal M M, Ahammed Z, et al. STAR Collaboration. Pion, kaon, proton and anti-proton transverse momentum distributions from p+p and d +Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV. Phys Lett B, 2005, 616: 8–16
- 16 Shao M, Barannikova O, Dong X, et al. Extensive particle identification with TPC and TOF at the STAR experiment. Nucl Instrum Meth A, 2006, 558: 419–429
- 17 Abelev B, Aggarwal M M, Ahammed Z, et al. STAR Collaboration. Energy dependence of pi, p and pbar transverse momentum spectra for Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 62.4$ and 200 GeV. Phys Lett B, 2007, 655: 104–113
- 18 Agakishiev H, Aggarwal M M, Ahammed Z, et al. STAR collaboration. Observation of the antimatter helium-4 nucleus. Nature, 2011, 473: 353–356
- 19 Xu Y C, Dong X, Zhang Z P, et al. Improvement of resonance reconstruction with time-of-flight detector at STAR experiment. Nucl Instrum Meth A, 2008, 596: 186–189

New type gaseous detector-MRPC

SHAO Ming^{*}, SUN YongJie, LI Cheng, CHEN HongFang & WANG XiaoLian

Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

We review the development of a new type gaseous detector, MRPC (Multi-gap Resistive Plate Chamber, MRPC) in the last decade in China. With the successful operation in the STAR experiment at RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider, RHIC) and the outstanding importance in charged particle identification, the MRPC technology has gained extensive interest and progress in the high-energy nuclear and particle physics.

multi-gap resistive plate chamber, high-energy physics, heavy-ion physics

PACS: 29.40.Cs, 25.75.-q

doi: 10.1360/132012-606