

MRPC技术的发展和应⽤

李 澄

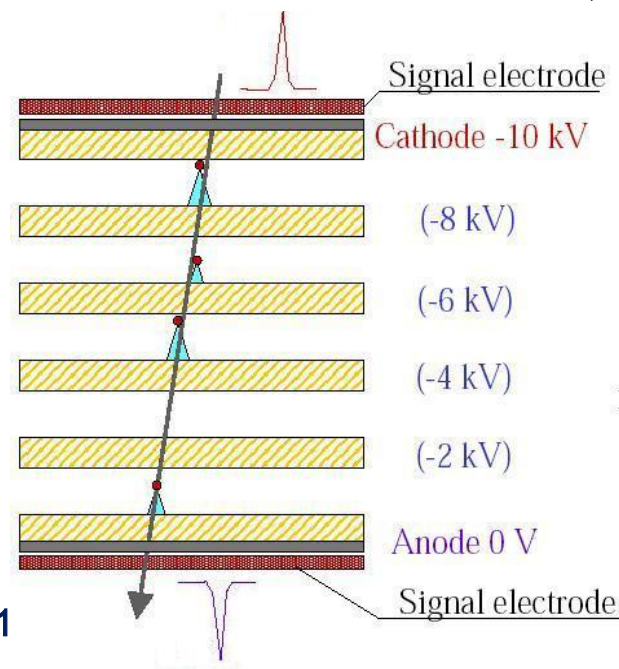
中国科学技术⼤学,近代物理系
核探测与核电⼦学国家重点实验室

多气隙电阻板室 :MRPC

- (Multi-gap Resistive Plate Chamber, 简称MRPC), 是二十世纪90年代后期由欧洲核子研究中心强子对撞机(LHC)的ALICE实验组首先研制一种新型气体探测器.

- ✓ 具有高时间分辨: $< 50\text{Ps}$
- ✓ 高探测效率: $> 95\%$ (MIPs)
- ✓ 抗强磁: $> 1\text{T}$
- ✓ 适用于高粒子多重数探测
如: ALICE达到8000末态粒子/单位快度
- ✓ 价格相对便宜: 约闪烁探测器1/3-1/5

The concept first published on Nucl. Instr.& Meth. A374 (1996) 1

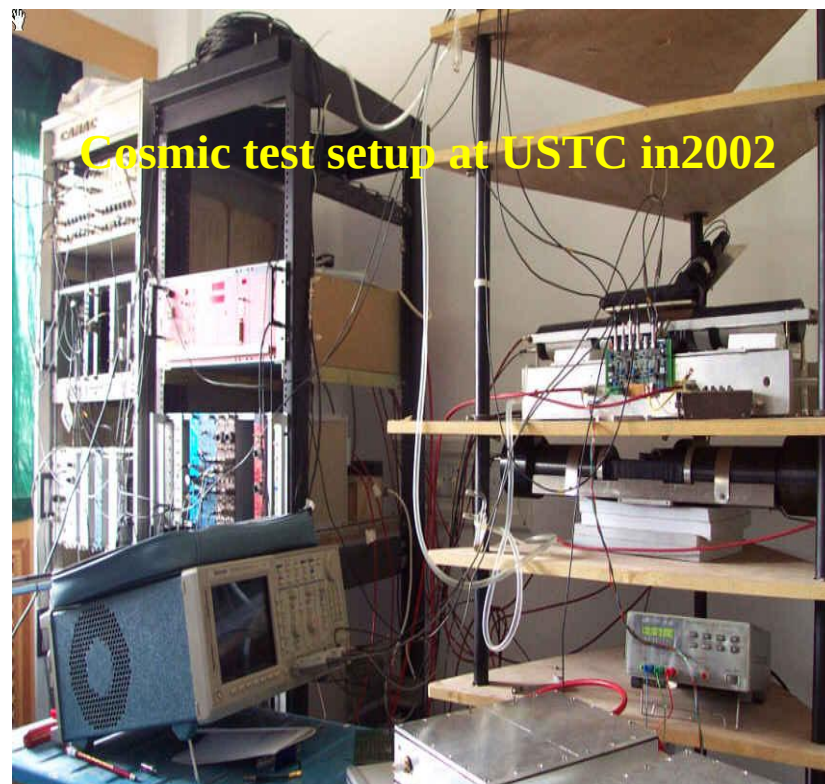
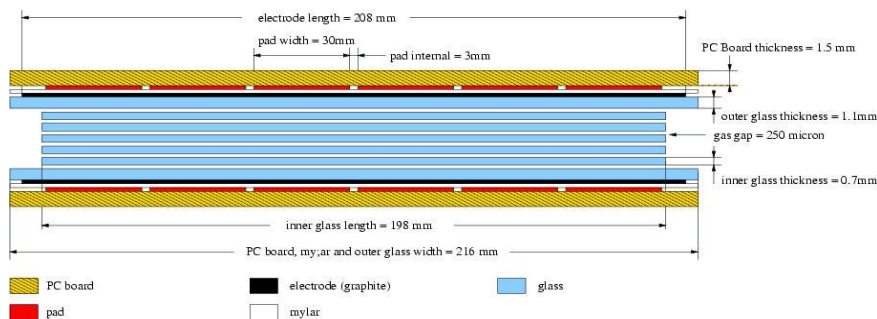


高能物理实验中新一代飞行时间探测器 (TOF)

MRPC-TOF技术

从Spark Counter, PPC, RPC ➔ MRPC

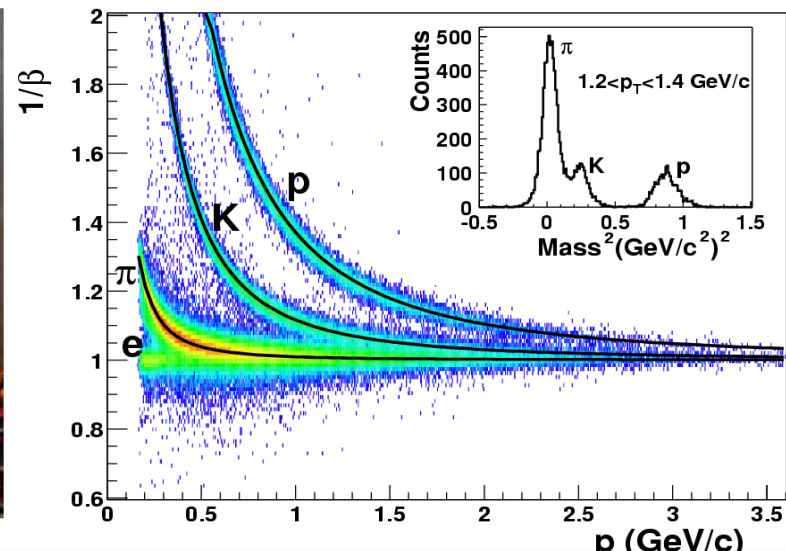
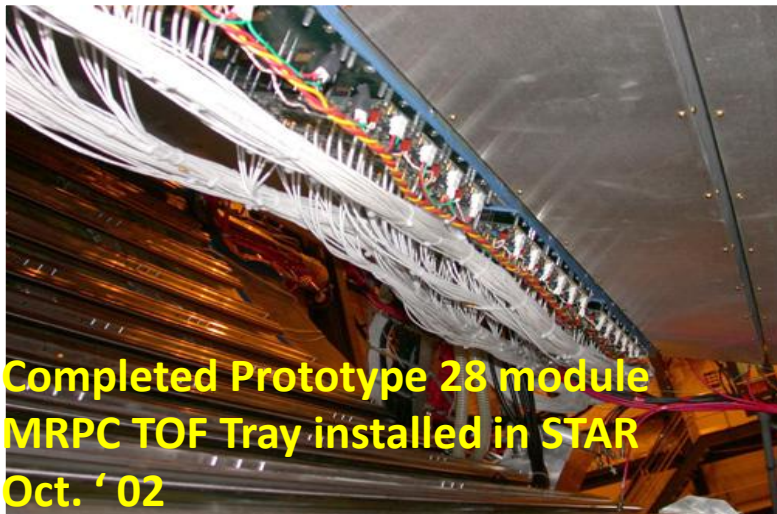
- 气体放大与电荷传输机制
- 绝缘(半绝缘)材料电学特性
- 室结构设计和制作工艺
- 多通道/高速读出电子学
- 数据处理与刻度方法
- 高时间分辨测量技术



科大高能物理实验室在国内率先进行MRPC研究，先后成功研究了不同结构的MRPC原型。

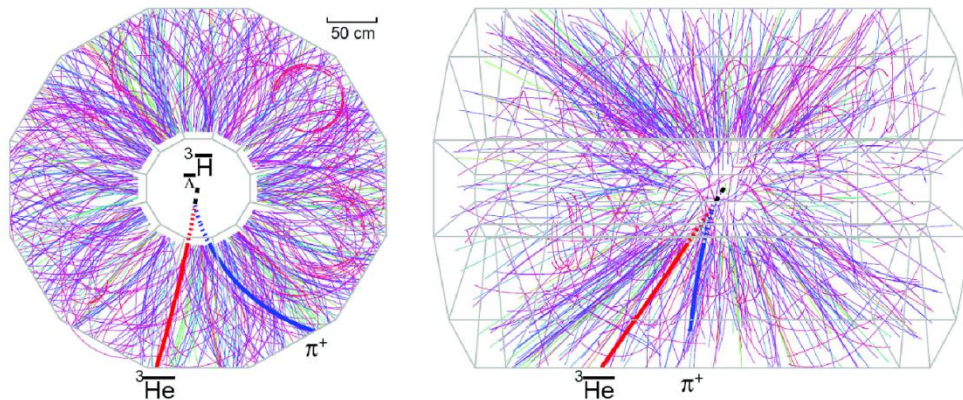
MRPC-TOF at STAR

- 在国家自然科学基金委、中国科学院、国家科技部的支持下，承担了美国布鲁克海文国家实验室相对论重离子物理和STAR -TOF探测器研制的项目。
- 整个STAR-TOF由4000多个MRPC模块构成，第一个TOF-tray于2002年建成并投入STAR实验运行. 整个项目2009年8月通过美国DOE验收并开始正式运行。
- MRPC作为飞行时间探测器在世界上首次大规模使用。

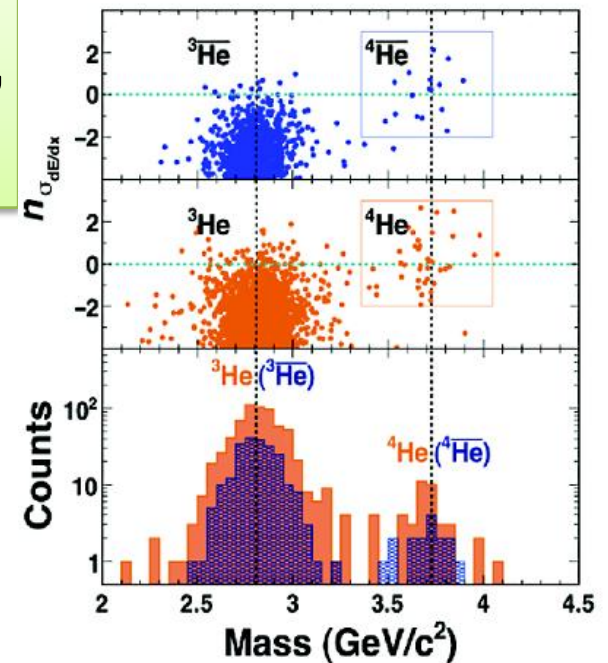


SATR Collaboration, kaon, proton and anti-proton transverse momentum distributions from p+p and d+Au collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV, Phys. Lett. B **616** (2005) 8.

- STAR collaboration, Observation of the antimatter helium-4 nucleus, Published on Nature 2011.5



许长补研究员等和 STAR 合作组的科学家共同合作，在 RHIC 上通过反氦 3 和 π^+ 介子衰变道，探测到第一个反超核粒子：反超氦核（图 1）。它是一个反 Λ 超子和一个反质子、反中子聚合形成的束缚态，质量为 $2.991 \pm 0.001 \pm 0.002$ GeV，寿命在 200 ps 左右，和自由反 Λ 超子的寿命相



上图和中图是通过 STAR 中国合作组研制的大型飞行时间探测器所测得的带电粒子质量和能量损失的二维图；下图是带电粒子质量的一维图，反物质氦 4 的质量等于 $3.73 \text{ GeV}/c^2$ 。利用大型飞行时间探测器，我们可以在 10 亿次碰撞产生的 5000 亿条径迹中清晰地分辨出反物质氦 4。

基于MRPC技术的STAR-MTD

- **STAR Muon Telescope Detector (MTD)**
- 中国科学技术大学高能组在国内率先开展了长读出条MRPC的相关研究工作，对探测器性能测试的结果显示，时间分辨达到70 ps，沿读出条方向的位置分辨可以达到~1 cm，满足STAR-MTD对探测器的设计要求。

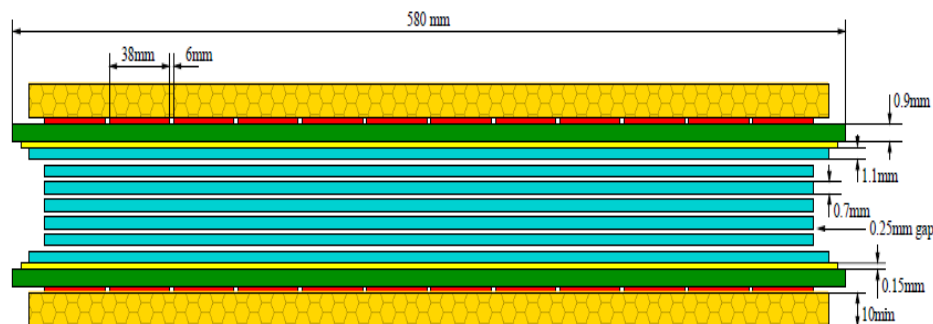
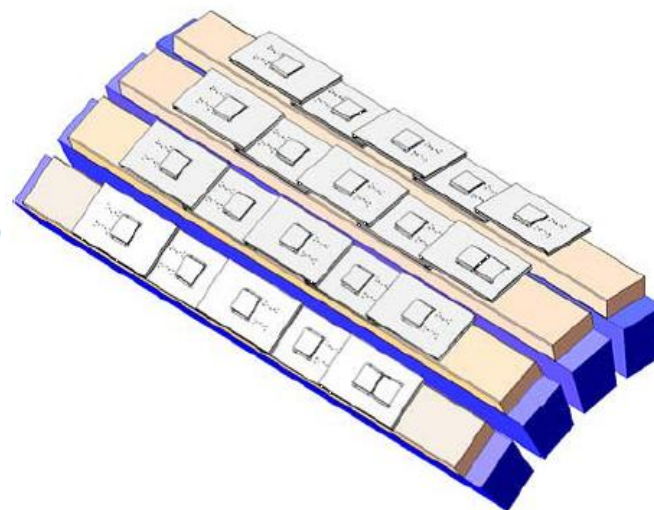


Figure 26. End view of an LMRPC module for the full MTD.



STAR合作组通过对LMRPC原型样机的性能研究，以及原型样机的实际运行测试，最终采用了中国科学技术大学的设计方案。

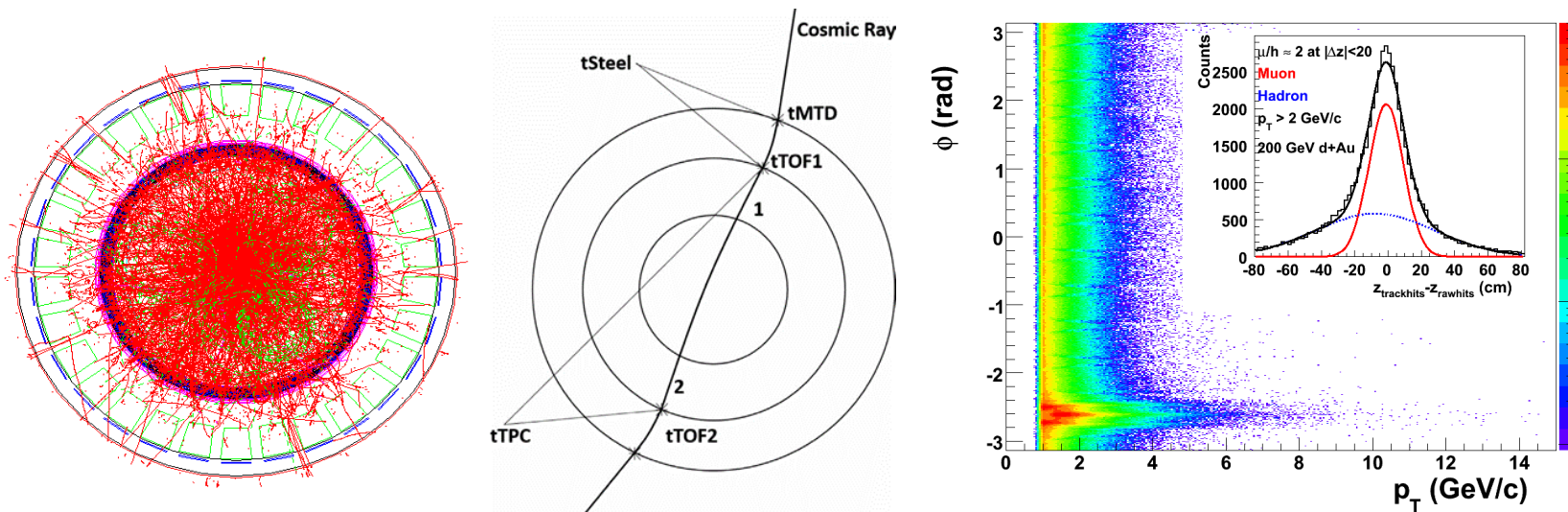
国家自然科学基金委 “高时间分辨 LMRPC原型设计和性能研究” (2008年)

MTD探测器位于磁铁轭铁的外侧，利用轭铁作为吸收体。在 $|\eta| < 0.5$ 的区间内，接收度为45%。

整个MTD探测器需要共计117个长读出条MRPC模块，1404根读出条，2808路读出通道。

STAR-MTD特性

- 不同于传统的缪子探测器，STAR的缪子探测器（Muon Telescope Detector, MTD）位于谱仪的最外层，利用磁铁的轭铁作为吸收体，采用长读出条的多气隙电阻板(LMRPC)探测阵列，通过LMRPC对带电粒子的高精度时间和位置测量，与TPC的动量测量和外推径迹进行匹配，实现对缪子的鉴别并排除强子本底。



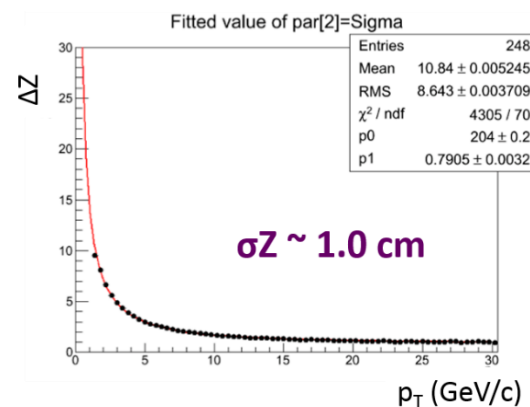
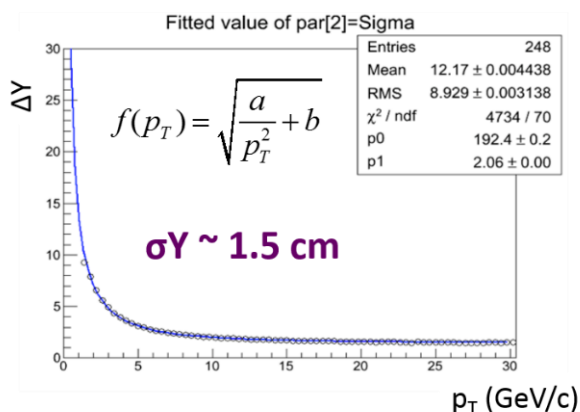
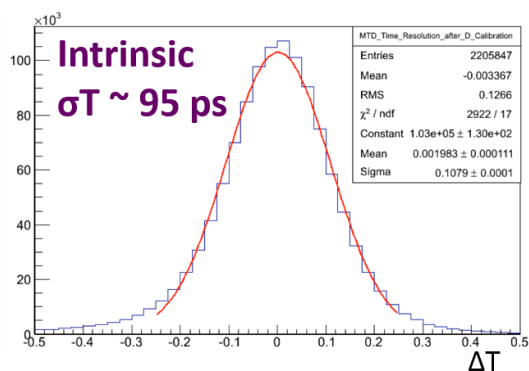
获得国家自然科学基金国际合作重点项目资助. 2011年开始工程研制

STAR/MTD开始正式物理运行



整个STAR MTD系统已经完成安装，在2015年1月的物理运行中，开始全系统的运行。

高能物理实验中，首次采用定时RPCs技术，用于Muon 鉴别。



BESIII-TOF性能改进的MRPC技术研究

国家自然科学基金联合基金重点项目

- 该项目总体研究目标是：针对BESIII/ETOF性能改进需求，研制MRPC/TOF实验原型研究结果将为今后BESIII端盖TOF升级及工程设计提供依据。研究项目从2010年1月开始执行。
- BESIII-ToF组(科大和高能所)紧密合作，共同完成。

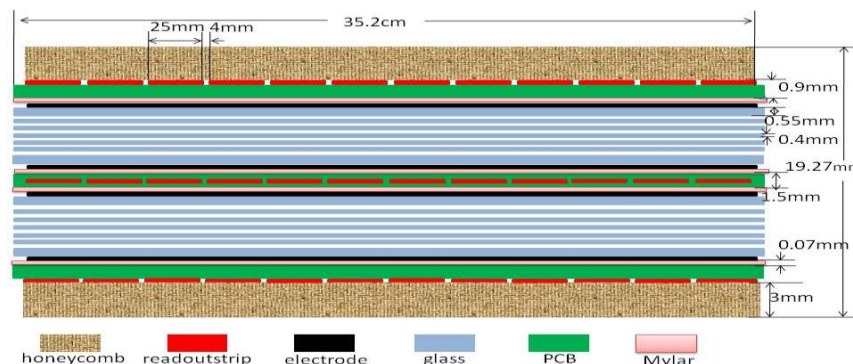
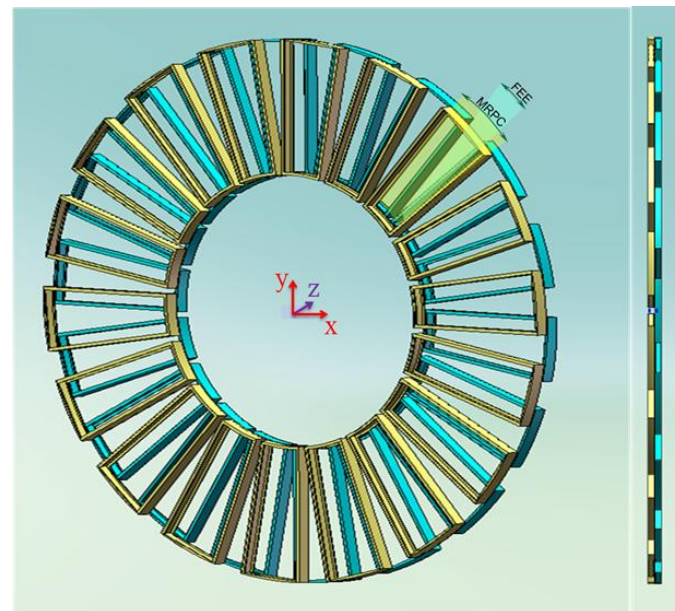
关键指标：

MRPC本征分辨(包含电子学) < 55ps
(非ToF贡献: 50ps)

→ 总分辨 < 80ps

→ π/K 分辨达到 1.4 GeV/c (2σ)

- 气隙: 2 x 6
- 气隙尺寸: 0.22 mm
- 总厚度: < 20 mm



ETOF MRPC 特性

ETOF 闪烁探测器:

- 电子在MDC和E-TOF之间发生多重散射
- 次级粒子造成多重击中
- 基于位置的时间刻度难以进行

ETOF MRPC双端读出:

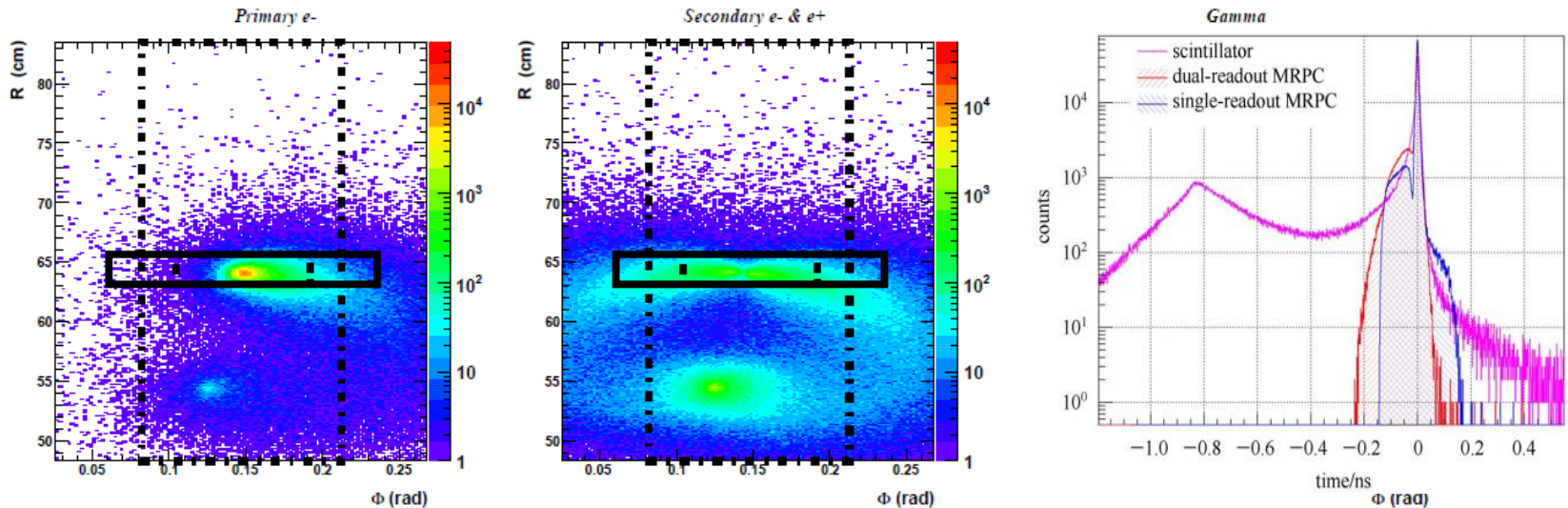
- 宽: 2.5 cm
 - 长: 8.6~14.1 cm
 - 每个模块24个channel
- ➔ $24 \times 36 \times 2 = 1728$ channels



需要更小的读出单元

$t_{up} + t_{down}$: 消除击中位置引起的时间晃动
 $t_{up} - t_{down}$: 提供击中位置的信息

Hit position distribution on one single EndCap TOF Module

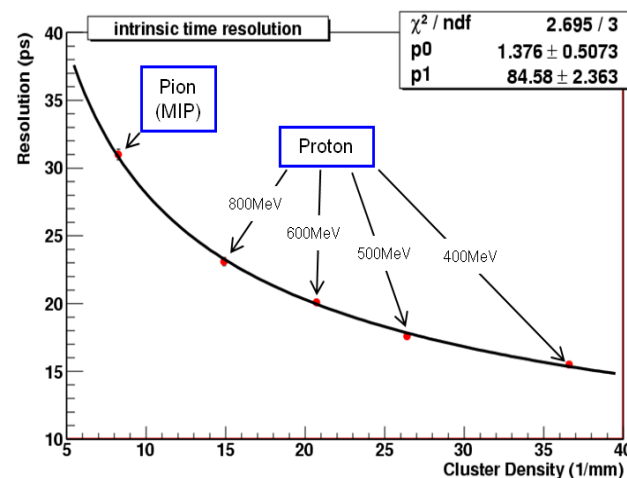
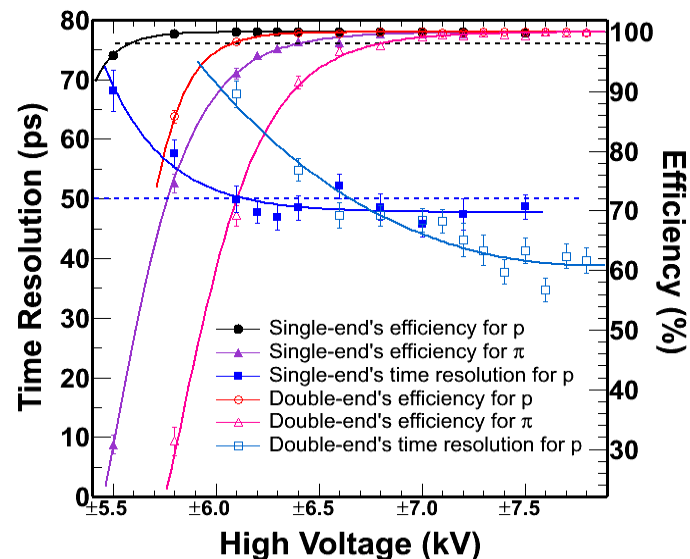


ETOF MRPC 性能

束流实验结果显示，探测器本征的时间分辨率分别达到：单端读出 <50 ps，双端读出 <45 ps，探测效率超过98%。

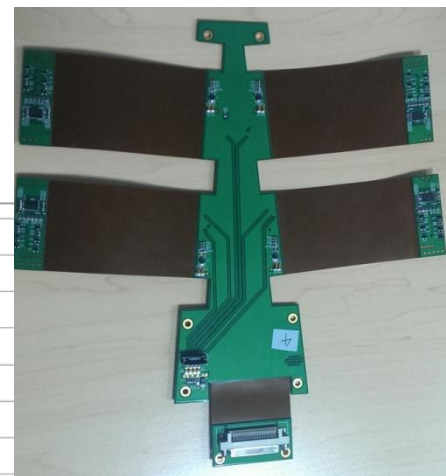
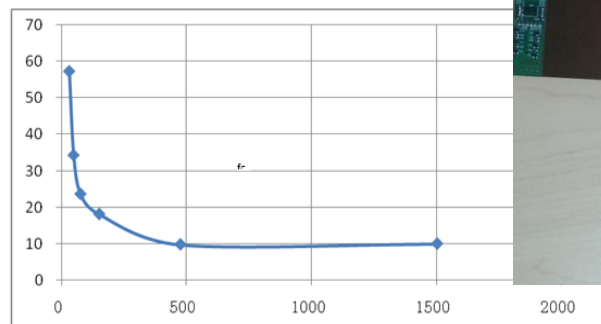
三个MRPC模块(见下表)对不同动量粒子的时间分辨. 其性能完全满足BESIII_ETOF升级的要求.

Momentum		500MeV	600MeV	600MeV(p2*)	800MeV
Pion sample	MRPC #1	56	47	47	45
	MRPC #2	51	48	51	40
	MRPC #3	46	48	53	45
Proton sample	MRPC #1	29	32	32	36
	MRPC #2	28	30	35	35
	MRPC #3	31	31	32	35



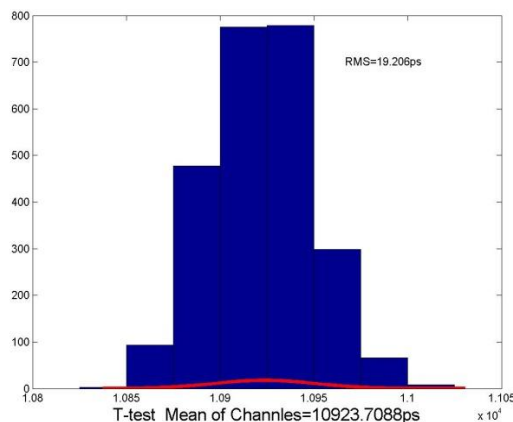
高时间分辨读出电子学

- 研发适用于MRPC信号读出的高时间分辨，低功耗前端放大电路。
- 实现对MRPC输出的信号进行放大甄别和时间过阈（Time Over Threshold，简称TOT）功能。其
- 定时精度好于15ps，单通道功耗小于50mW。



NINO前放, 高能所电子学组研制

- 研发适合MRPC/TOF升级的时间数字化插件
- 解决了TDIG与前端电子学高密度长距离信号传输与连接难点
- 通过在线实时对多插件的INL进行修正，实现了好于20ps的时间测量精度。

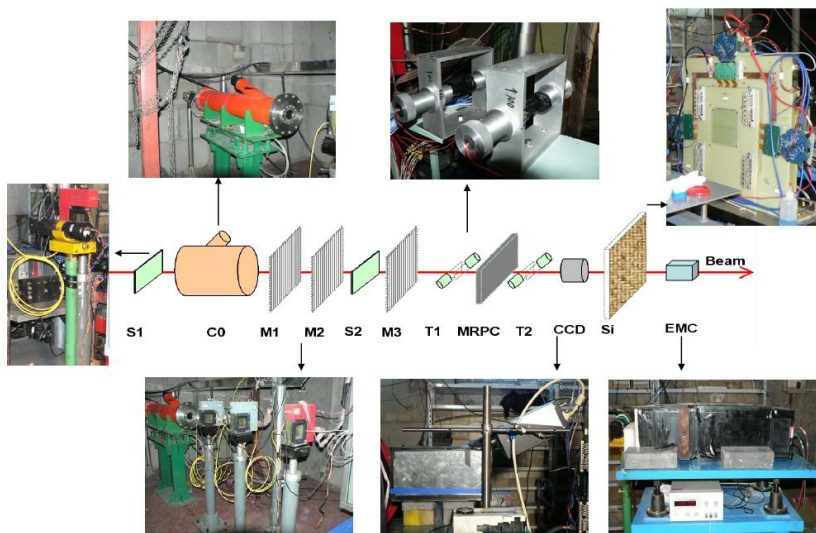


达到国际先进水平!

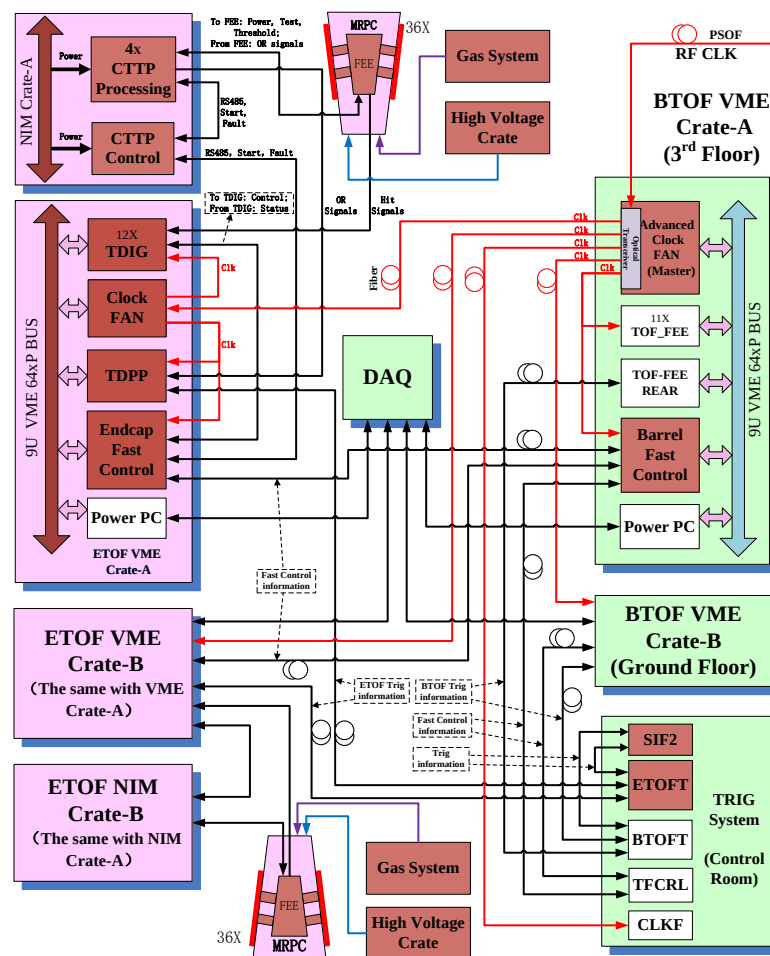
TDIC, 科大物理电子学组研制

探测器阵列方案设计和束流测试

- 针对BESIII/TOF探测器结构和性能测量需求, 完成MRPC阵列的方案设计. 建立束流测试软硬件平台, 解决MRPC/TOF测量中的技术和方法问题. 为工程设计提供了大量的实验数据.



在E3线上的束流测试系统子探测器位置分布



BESIII MRPC-ETOF 总体结构图

系统的掌握MRPC/TOF技术

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 763 (2014) 190–196



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Nuclear Instruments and Methods in
Physics Research A

journal homepage: www.elsevier.com/locate/nima



Test of high time resolution MRPC with different readout modes for the BESIII upgrade



S. Yang^{a,c}, Y.J. Sun^{a,c,*}, C. Li^{a,c,*}, Y.K. Heng^{b,c}, S. Qian^{b,c}, H.F. Chen^{a,c}, T.X. Chen^{a,c},
H.L. Dai^{b,c}, H.H. Fan^{a,c}, S.B. Liu^{a,c}, S.D. Liu^{b,c}, X.S. Jiang^{b,c}, M. Shao^{a,c}, Z.B. Tang^{a,c},
H. Zhang^{a,c}, Z.G. Zhao^{a,c}

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

^b Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences(IHEP), Beijing 100049, China

^c State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics(USTC-IHEP), China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 24 October 2013

Received in revised form

23 May 2014

Accepted 23 May 2014

Available online 10 June 2014

Keywords:

Multi-gap resistive plate chamber

Single-end readout

Double-end readout

BESIII

End-cap TOF

ABSTRACT

In order to further enhance the particle identification capability of the Beijing Spectrometer (BESIII), it is proposed to upgrade the current end-cap time-of-flight (eTOF) detector with multi-gap resistive plate chamber (MRPC). The prototypes, together with the front end electronics (FEE) and time digitizer (TDIG) module have been tested at the E3 line of Beijing Electron Positron Collider (BEPCII) to study the difference between the single and double-end readout MRPC designs. The time resolutions (sigma) of the single-end readout MRPC are 47/53 ps obtained by 600 MeV/c proton/pion beam, while that of the double-end readout MRPC is 40 ps (proton beam). The efficiencies of three MRPC modules tested by both proton and pion beam are better than 98%. For the double-end readout MRPC, no incident position dependence is observed.

© 2014 Elsevier B.V. All rights reserved.

MRPC detector for the BESIII E-TOF upgrade

R.X. Yang^{a,c}, C. Li^{a,c,*}, Y.J. Sun^{a,c}, H.F. Chen^{a,c}, H.L. Dai^{b,c}, Y.K. Heng^{b,c}, S.B. Liu^{a,c},
M. Shao^{a,c}, Z.B. Tang^{a,c}, Z. Wu^{b,c}, S. Yang^{a,c}, H. Zhang^{a,c}

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

^b Institute of High Energy Physics(IHEP), Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100049, China

^c State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics,
USTC-IHEP, China

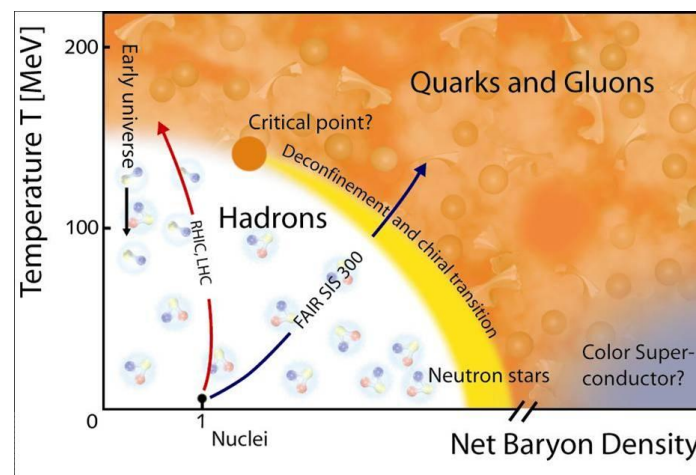
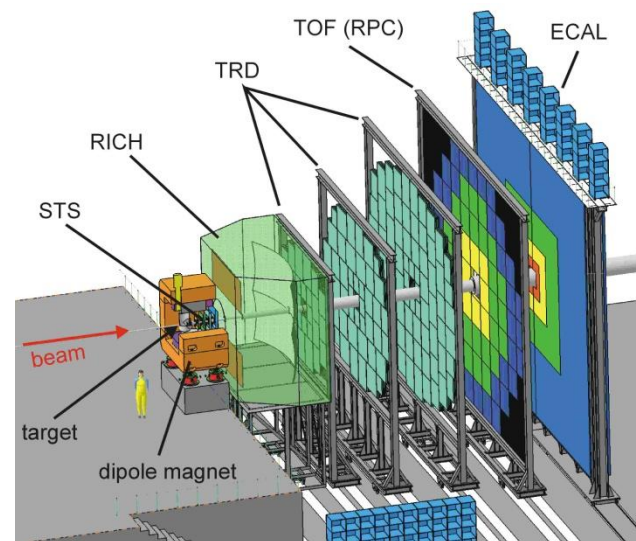
E-mail: licheng@ustc.edu.cn

ABSTRACT: An end-cap Time-of-Flight (E-TOF) system with higher granularity compare to the current E-TOF and intrinsic time resolution of better than 50 ps will extend the K/ π separation (2σ) momentum range to 1.4 GeV/c and enhance the physics capability of Beijing Spectrometer (BESIII). A R&D project was carried out aiming at upgrading the current BESIII E-TOF with the Multi-gap Resistive Plate Chamber (MRPC). The beam test for the MRPC prototype, together with the custom-designed Front End Electronics (FEE) and TDC boards, was performed at the BEPC E3 line in the last years. The test results show that the detector has stable performance at different positions and working High Voltage (HV). A time resolution of better than 50 ps can be achieved. The different performance between pion and proton events is also discussed.

2014年9月，经专家组的评审，其性能和模块设计指标达到工程设计要求，一致通过并同意该项目开始工程建设。北京谱仪端盖飞行时间探测器升级项目，获得中国科学院大科学装置维修改造项目支持，正在进行工程建设中。

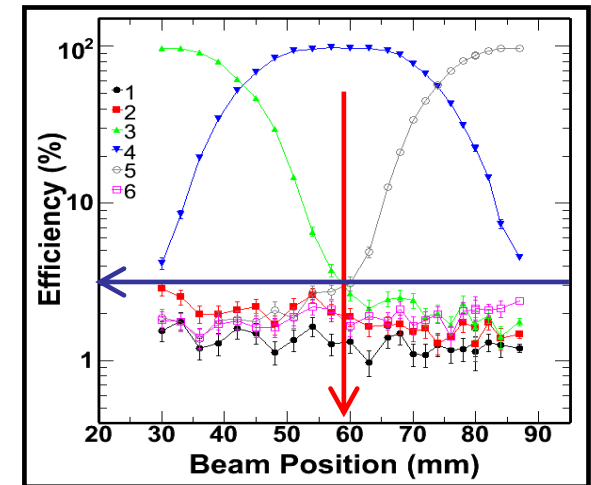
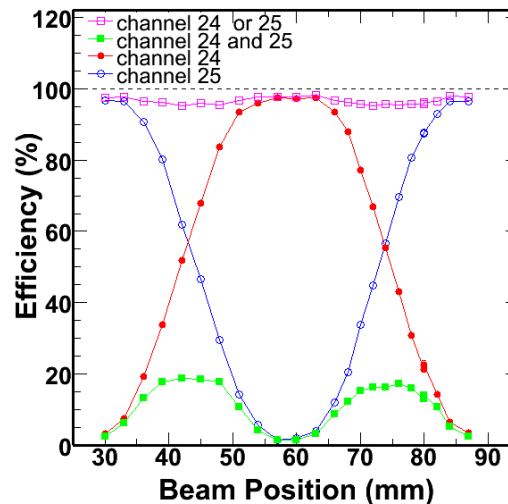
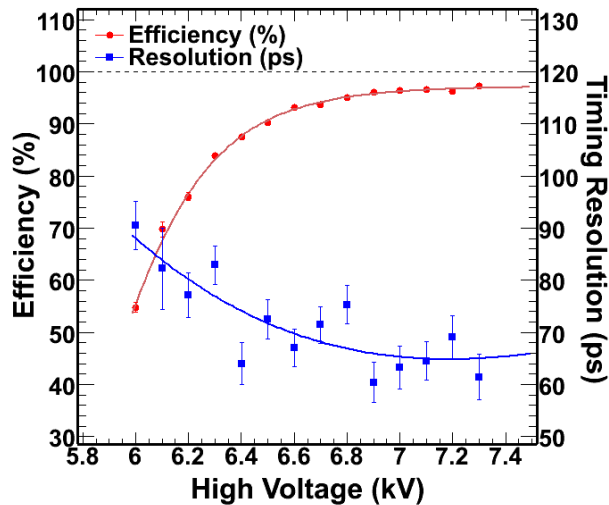
CBM TOF 研制

- CBM (Compressed Baryonic Matter) 实验是德国正在建造的FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) 加速器上的主要实验之一。CBM实验通过高能量的核子打靶，对QCD相图中高重子密度区域进行探索。
- CBM-TOF面临的重大技术挑战是重离子打靶产生的高通量的末态粒子识别。为了提高MRPC的计数率能力，降低电极板的电阻率和减小电极板的厚度是两个主要的途径。
- 考虑到低电阻率电极材料高昂的成本，CBM-TOF墙外围部分拟采用超薄特种浮法玻璃作为电极材料制作，要求探测器的计数率能力可以达到 $\sim 1 \text{ kHz/cm}^2$ 。



MRPC for CBM TOF

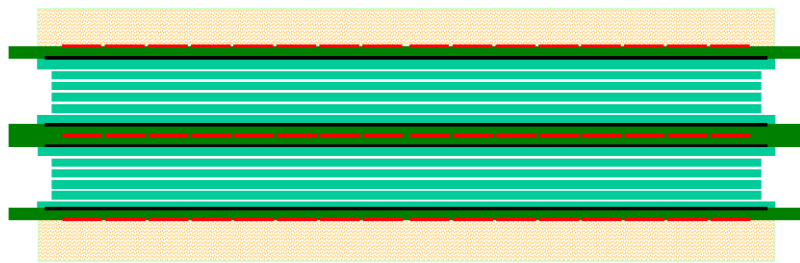
- 设计的一种了双层10气隙结构LMRPC探测器，解决了长读出条之间的信号传输和串扰问题。实验结果显示，读出条间的串扰低于3%，时间分辨性能好于70 ps。



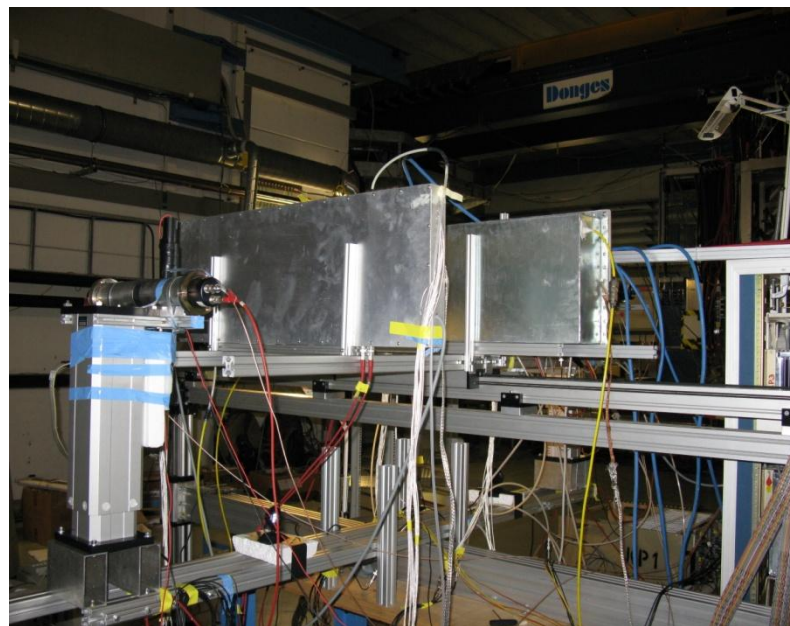
研究结果作为CBM-TOF整体设计的重要依据，提交到GSI研究报告中 (Y. Sun, C. Li, Z. Tang, and L. Xu, Performance of Long-strip MRPC for CBM-TOF, GSI Scientific report 2010)。

超薄浮法玻璃MRPC原型

- 研究超薄浮法玻璃电极MRPC的计数率能力性能，结合CBM-TOF墙的设计方案，研制一种新的实验原型。
- 已在CERN T2/H2束流上的进行了测试，获得了大量实验数据。



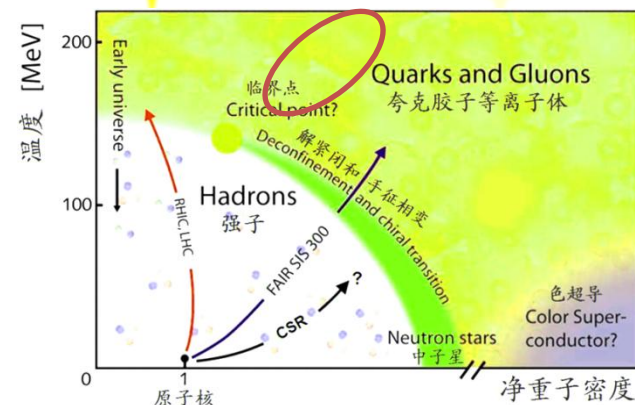
超薄浮法玻璃MRPC原型示意图



2014年, CBM-TOF国际合作项目通过科技部“高压缩重子物质的物理实验研究”973项目立项和国家自然科学基金委国际合作重点项目“CBM实验高计数率飞行时间探测器研制及相关物理研究”立项。

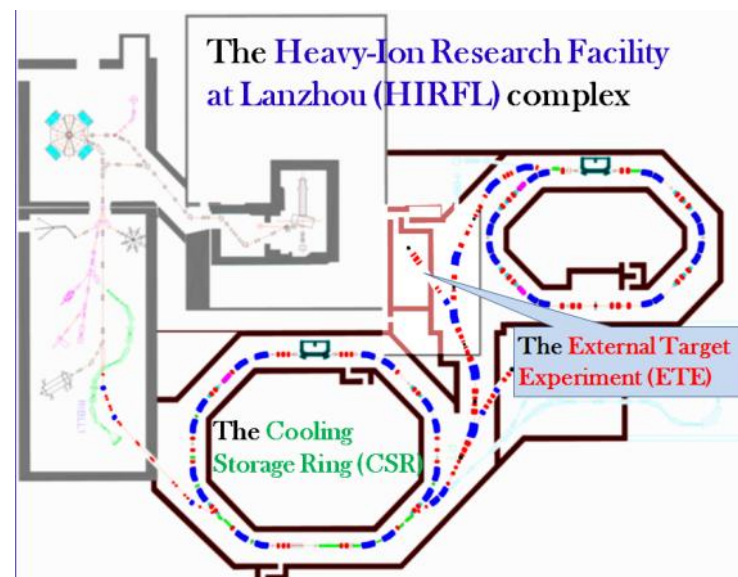
CSR外靶实验装置及触发探测器

- 兰州重离子加速器（HIRFL）冷却储存环（CSR）能够提供（1GeV以下直至铀核）的高质量重离子束，开展QCD相图的低温高重子密度区核物质状态方程（EOS）的研究，是CSR外靶实验的主要目标。根据输运模型的计算，HIRFL-CSR能区重离子碰撞中 π^-/π^+ 产额比信息可以作为核物质状态方程的灵敏探针。

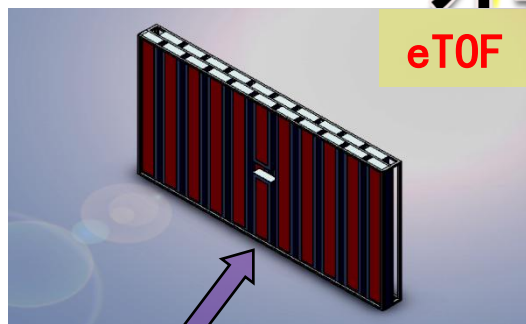


适用于CSR-T0的MRPC

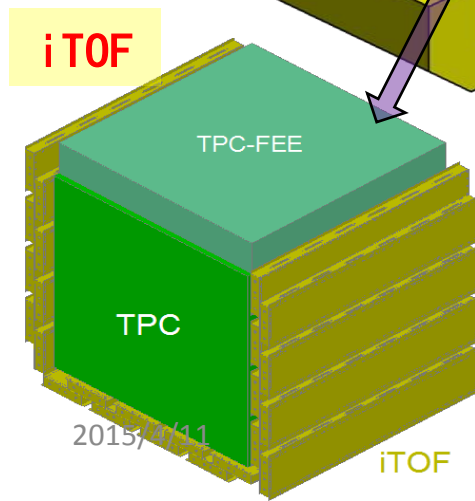
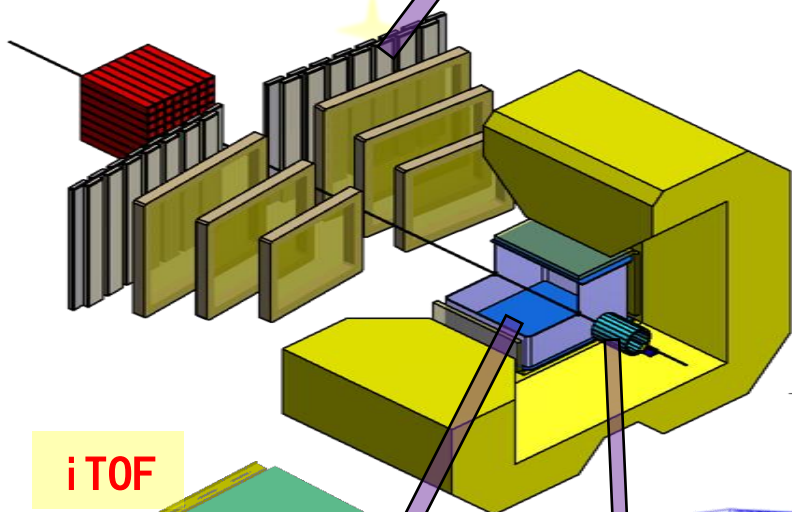
- CSR-T0分内、外两层，内、外模块灵敏面积分别为140、470cm²，覆盖靶区约50-130度（实验室系）范围；
- 计划由16个MRPC模块构成，共计224个读出单元，320路读出通道。
- 本征时间分辨要求好于50ps
- 高颗粒度，抗磁场，适用于工作在CSR重离子碰撞靶区。
- 低噪声率，正常工作条件下小于0.1Hz/cm²。
- 2016年将安装完成1/4并开始物理运行。



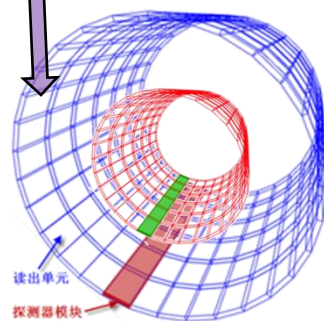
外靶实验装置



由于CSR实验能量较低，末态带电粒子具有较宽的速度分布，因此设计采用两层桶状结构的MRPC模块构成TO探测器，利用同一带点径迹的两次时间测量修正，以减少粒子动量展宽带来的定时晃动。



- CEE-TOF分iTOF、eTOF两部分，iTOF覆盖实验室系约30—60度范围，eTOF覆盖前向0—30度范围。
- 总面积约12m²，3000—3500读出通道数。
- 高颗粒度，抗磁场，适用于CSR重离子碰撞实验。
- 先进读出电子学，单通道数字化<10ps时间精度



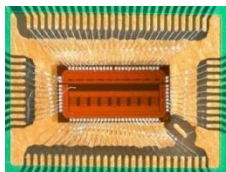
TO

C.Li/USTC

获国家自然科学基金重点基金资助（2013年）

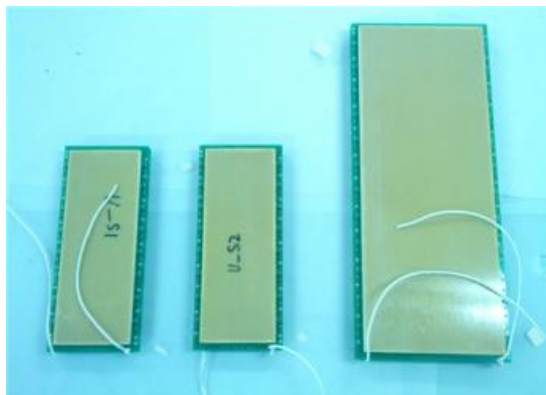
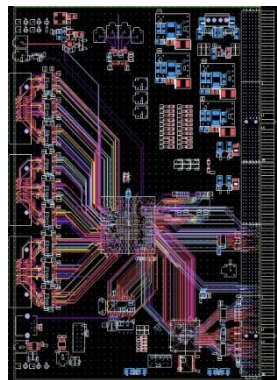
MRPC-T0 for CSR-ETE -II

- 建立基于GEANT4的完整模拟框架，优化探测器设计.
- 采用类似BESIII / ETOF MRPC结构设计.
- 高集成度NINO前置放大器和FPGA-TDC后端数字化模块

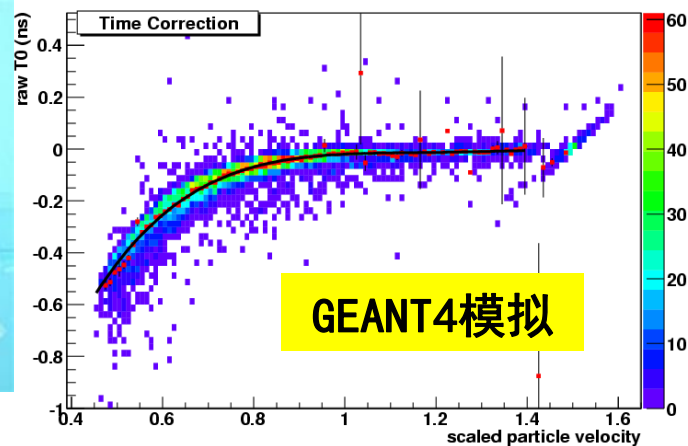


FPGA-TDC INO

MRPC裸室



宇宙线测试



高分辨宇宙线测试平台及应用研究

提供<50ps的参考时间, 宇宙线径迹定位精度<1cm. 在实验室条件下, 满足大面积, 高分辨的粒子探测器性能测试要求.



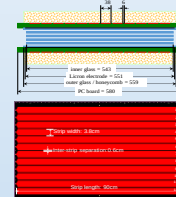
A cosmic ray platform based on Multi-gap Resistive Plate Chambers

Tianxiang Chen, Cheng Li, Hongfang Chen, Yongjie Sun, Zebo Tang
State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics
University of Science and Technology of China



As the Multi-gap Resistive Plate Chamber (MRPC) has a very good time resolution and high detector efficiency, we are trying to build a large area cosmic ray platform based on MRPC technology, the position resolution of which is around 1cm along and perpendicular to the stripe. With the cosmic ray track determined by the hit point positions on each MRPC, we can measure the position resolution of an under test detector mounted at the middle of the four MRPCs.

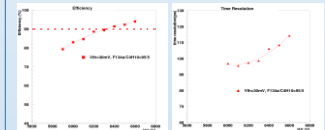
Principle and Design



The prototype of MRPC used here has five 0.25 mm gas gaps and works with an active area of $87.0 \times 52.2 \text{ cm}^2$. The signals can be generated on twelve 3.8 cm wide 87cm long copper pickup strips.

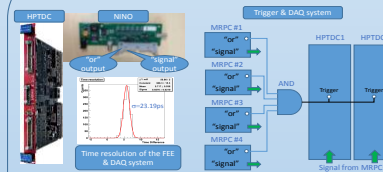
As the signals are readout from both ends of the strip, we use the time difference of the signal from each end to measure the position of the hit point, while use the average time of them to measure the time.

Performance of the MRPCs



The MRPC modules used here are selected to work at 6300V. In condition of this, the efficiency of this MRPC module is higher than 90% while the time resolution is around 100ps.

Electronics

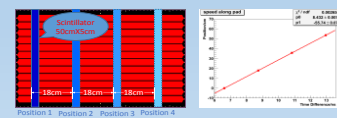


The front-end electronics(FEE) are 6-channel amplifier/discriminator cards based on the NINO chip supported by Institute of High Energy Physics Chinese Academy of Sciences. The front-end NINO card also produces a signal that is the OR of all 6 channels. The time resolution of the Front-end electronics and the DAQ system totally is no more than 30ps. The muon trigger for HPTDCs is generated by the 16-fold coincidence of the ORs from the sixteen front-end cards.

Cosmic ray platform

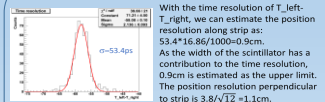


Signal propagation velocity



By using scintillator to trigger the system at different position and compare it with the time difference of the signals from each end(T_{left}-T_{right}), we can calculate the velocity of the signal travelling along the strip as: $v = 2 \times 10^8 \text{ m/s}$.

Spatial resolution



With the time resolution of T_{left}-T_{right}, we can estimate the position resolution along strip as: $5.2 \times 1.6 \text{ mm} / 1000 = 0.9 \text{ cm}$. As the width of the scintillator has a contribution to the time resolution, 0.9cm is estimated as the upper limit. The position resolution perpendicular to strip is $3.8 / \sqrt{12} = 1.1 \text{ cm}$. We are now trying to use the top and bottom chambers to predict the position of the track in the middle two chambers. By comparing the measured position (obtained from the time difference) with the predicted position, the position resolution along the strip can be determined accurately. After this we will try to build a similar platform using a property of MRPC with 0.7cm wide copper pickup strips to get better position resolution perpendicular to strip.

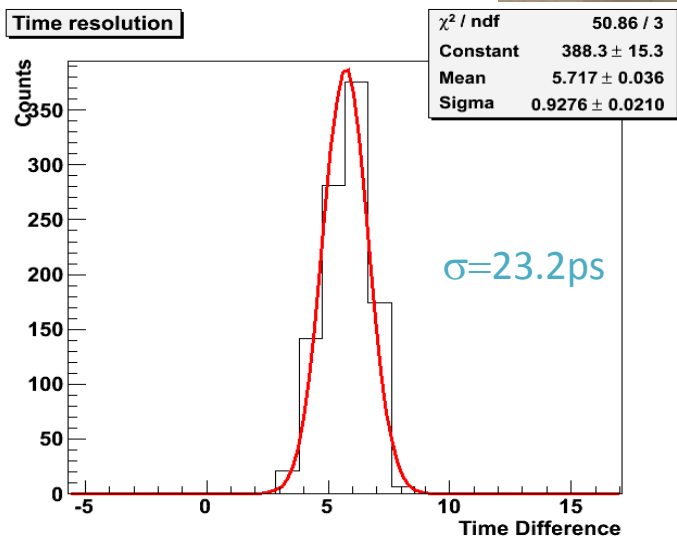
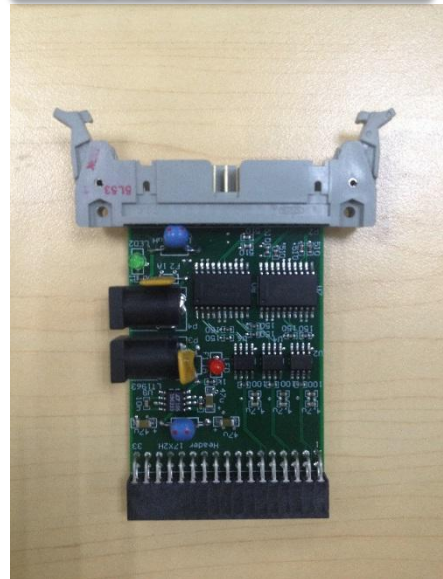
读出电子学

采用新的NINO放大器配合
CAEN 1290A 32路TDC，实现
T+TOT读出和多路在线“或”
触发模式。改进后的宇宙线
测试平台性能进一步提高。

NINO



LVDS to ECL

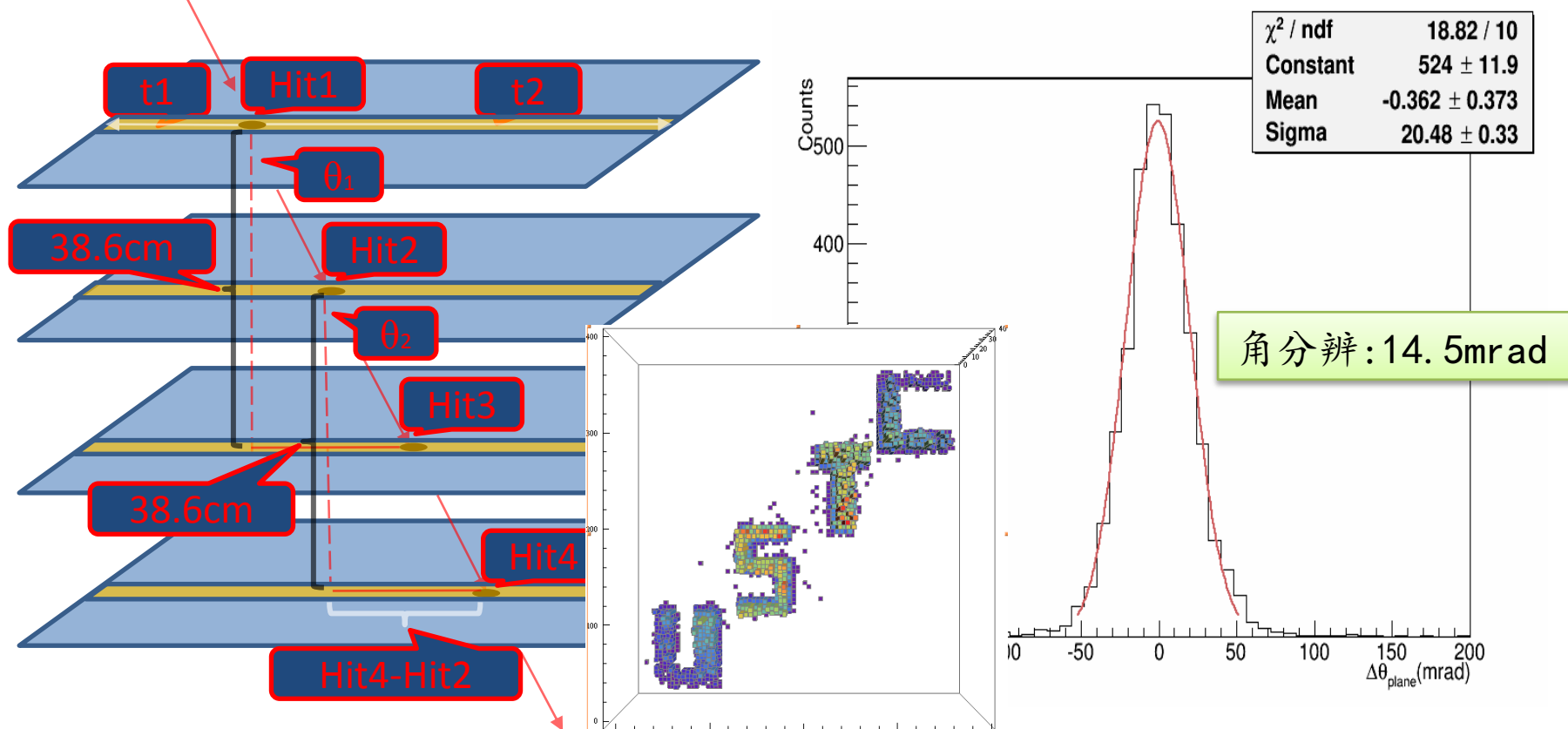


Time resolution
of the FEE & DAQ system

每个NINO芯片可以处理6路MRPC信号，
同时给出6路信号的“或”触发。整个
电子学系统的时间分辨 $<35\text{ps}$ 。

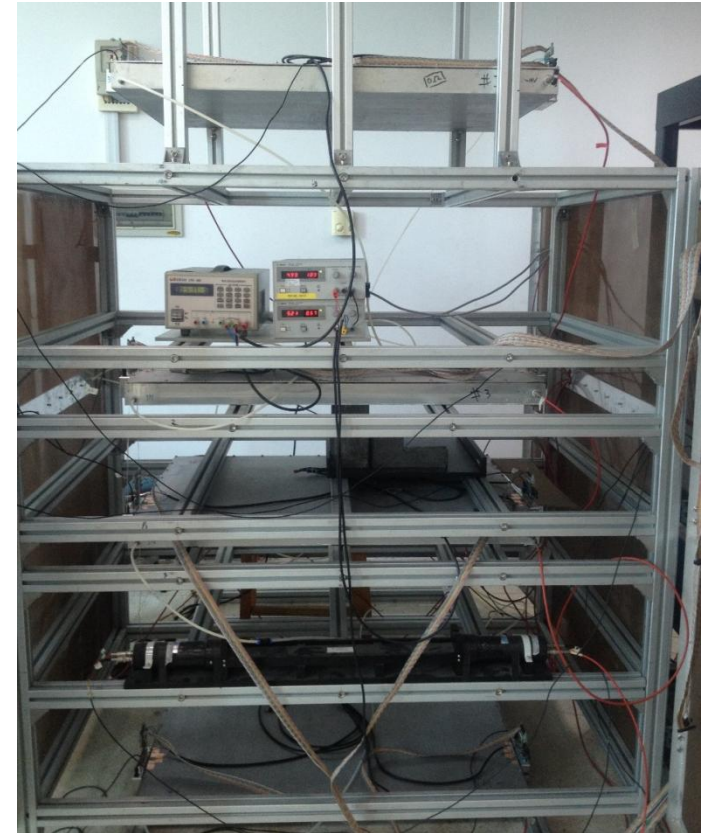
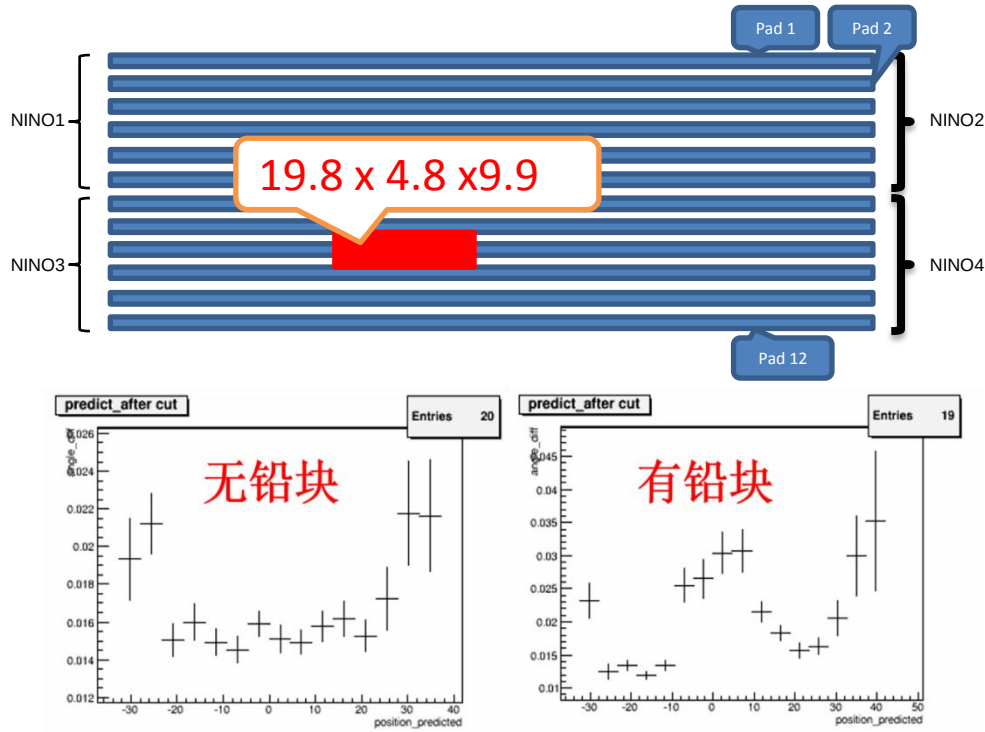
NINO放大板和转接板，由中科院高能物
理研究所电子学组代洪亮老师研制。

宇宙线Muon成像模拟与实验



在2h时间内，对非边缘分布的样品至少具有10mm单位像素的成像能力，并随着时间延长、数据量不断累积可以得到更高精度的图像

宇宙线散射初步结果



有铅块的地方，实验探测的角度分布变化明显

宇宙线测试平台

用于ETOFP MRPC 模块性能测试



总结

深入研究了解:

- 悬浮电场中气体放大机制
- 不同结构MRPC设计和制作工艺
- 多通道/高速读出电子学获得重要进展
- 建立数据处理与刻度方法
- 掌握高时间分辨测量技术

有待进一步研究:

- 半绝缘材料电学特性
- 信号传输特性
- 计数率能力的提高
- 长期稳定性

进一步应用:

- 中子飞行时间谱仪
- Muon成像技术,
- 宇宙线望远镜... 等

