

北京谱仪端盖TOF升级的MRPC 技术研究

李 澄

核探测与核电子学国家重点实验室
中国科学技术大学,近代物理系

报告提纲：

- 研究目标
- 研究内容
- 研究成果

R&D: BESIII端盖TOF升级计划

- BESIII建造于03~08年
- 端部TOF因为物质层多、粒子散射、径迹不确定性等原因，飞行时间分辨率仅~140ps
- 针对BESIII/ETOF 性能改进需求，开展MRPC/TOF实验原型研究。为BESIII端盖TOF升级及工程设计提供依据。

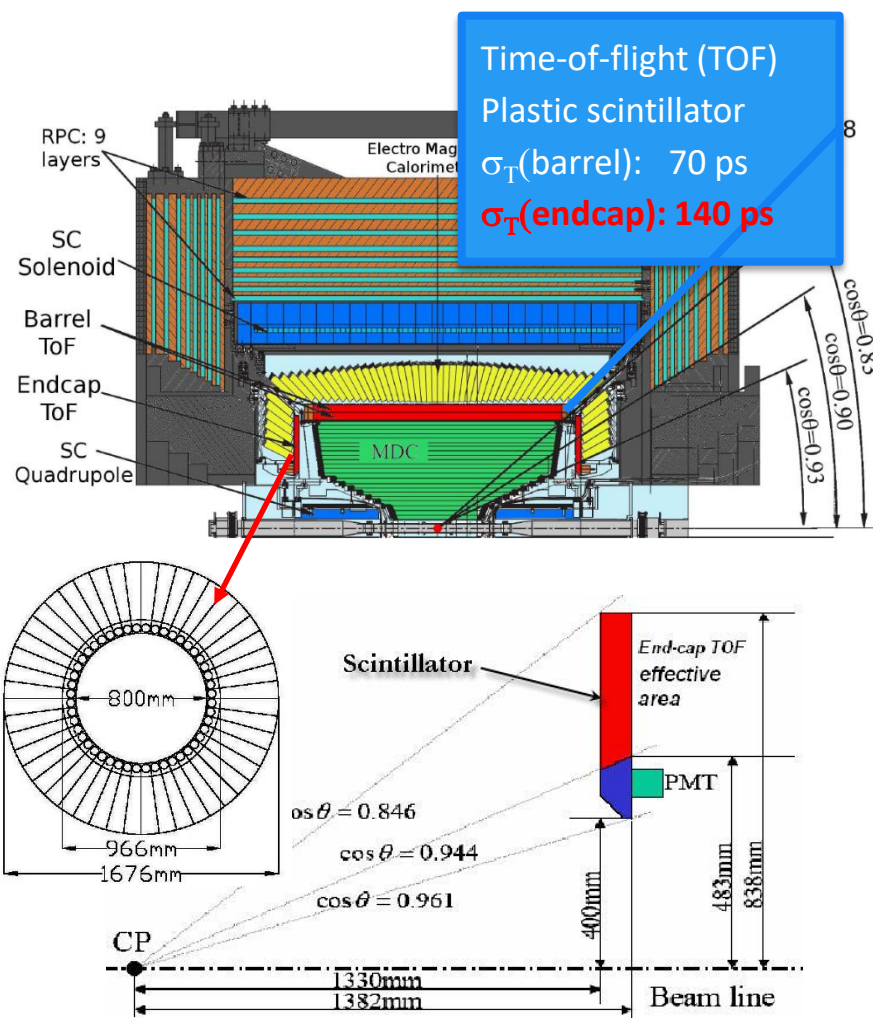
主要指标:

MRPC本征分辨(包含电子学) < 55ps + 非ToF贡献

→ 总分辨 < 80-100ps

π/K 分辨达到: 1.4 GeV/c (2σ)

国家自然科学基金联合基金重点项目 (2010-2013)



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CERN/ALICE/TOF实验组, 针对高时间分辨飞行时间探测器需求, 首先提出概念设计和实验方案.
- ✓ 高时间分辨: $<60\text{ps}$ (本征时间分辨)
- ✓ 高探测效率: $>95\%$ (MIPs)
- ✓ 抗强磁: $>1\text{T}$
- ✓ 小Pad读出: 适用于高粒子多重数探测
(ALICE-TOF探测面积达到 160m^2 , 8000末态粒子/单位快度)
- ✓ 大面积制作, 价格相对便宜
(塑料闪烁探测器1/3-1/5)

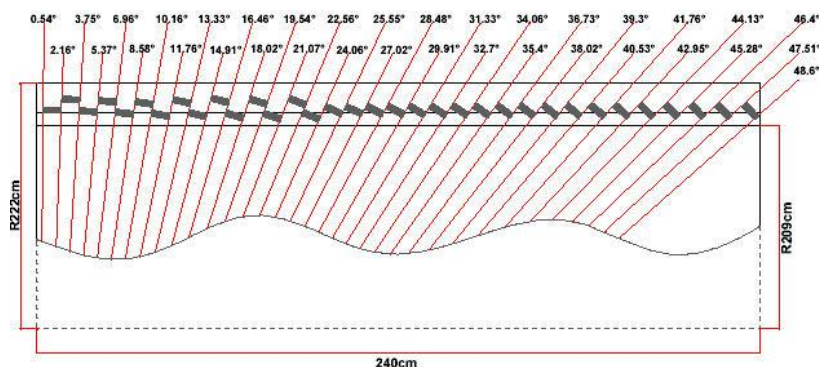
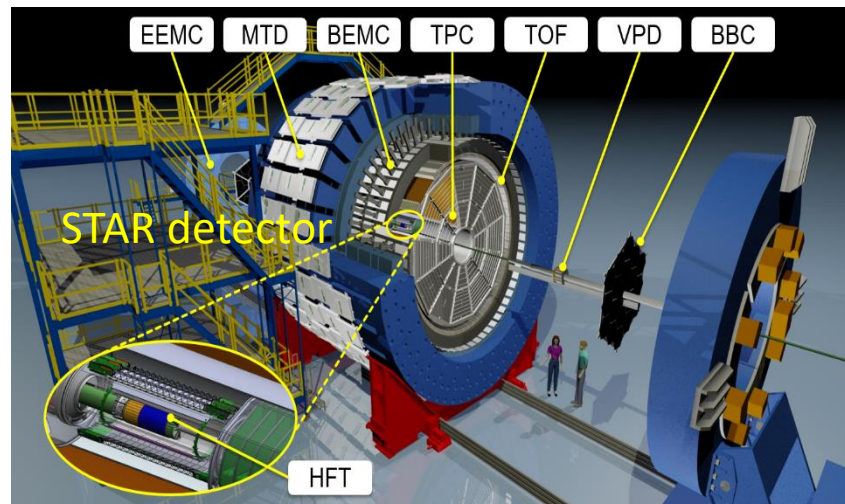


(The concept first published on Nucl. Instr.& Meth. A374 (1996) 132 by M.C.S.Williams et al.)

高能物理实验中新一代飞行时间探测器 (TOF)

高时间分辨MRPC : STAR/TOF

- 2000年开始, 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STAR/TOF MRPC原型研制的项目。
- 整个STAR-TOF由120个Tray(约3600个MRPC模块)构成, 全部中国合作组制作。第一个TOFtray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-TOF首次在高能物理实验上使用

BESIII/TOF 升级的设计指标

从2010年1月正式开始执行，至2013年 12月结题 。按计划完成研究内容. 综合实验结果显示: 研制TOF实验原型的探测效率>98%; 时间分辨(包含电子学): <50 ps. 整个系统的性能达到设计指标，完全满足BESIII端盖TOF升级的物理要求.

Non TOF ~60ps (~55ps)	Item	Present time reso.	Upgrade time reso.
	Intrinsic time resolution of one TOF layer for 1 GeV muon	80~90 ps	<50ps
	Uncertainty from electronics	25 ps	<25 ps
	Uncertainty from bunch length	15 mm, 35 ps	15 mm, 35 ps
	Uncertainty from bunch time	~20 ps	~20 ps
	Uncertainty from Z position	5 mm, 25 ps	~ 10 ps
	Resolution of expected time of flight	~30 ps	<30 ps
	Total time resolution	100~110 ps	<75ps

BESIII ETOF 升级的MRPC 技术研究

国家自然科学基金
(联合基金重点项目)

2010-2013

研究内容和解决的关键问题

- **课题1) 探测器原型研制**

研发高时间分辨 MRPC原型及相关测量技术。在BESIII 现有实验环境下，寻求最佳探测器构型，以减少死区，提高性价比。解决了探测器模块的结构设计，模拟,和测试方法问题。

- **课题2)前端读出电子学研制**

研发高速低噪声前端读出电路，输入与MRPC输出信号匹配，输出与HPTDC相配合，其性能达到实验要求。解决了NINO前端电路的设计与优化，以及MRPC输出信号与前端电子学的连接与匹配问题。

- **课题3) 高性能时间数字化模块研制**

研制高时间测量精度TDC模块 。确定了时间测量模块与NINO的连接与数字化方案，解决了前端电子学信号与HPTDC模块之间的信号传输, 信号数字化处理方法与在线实时修正问题。

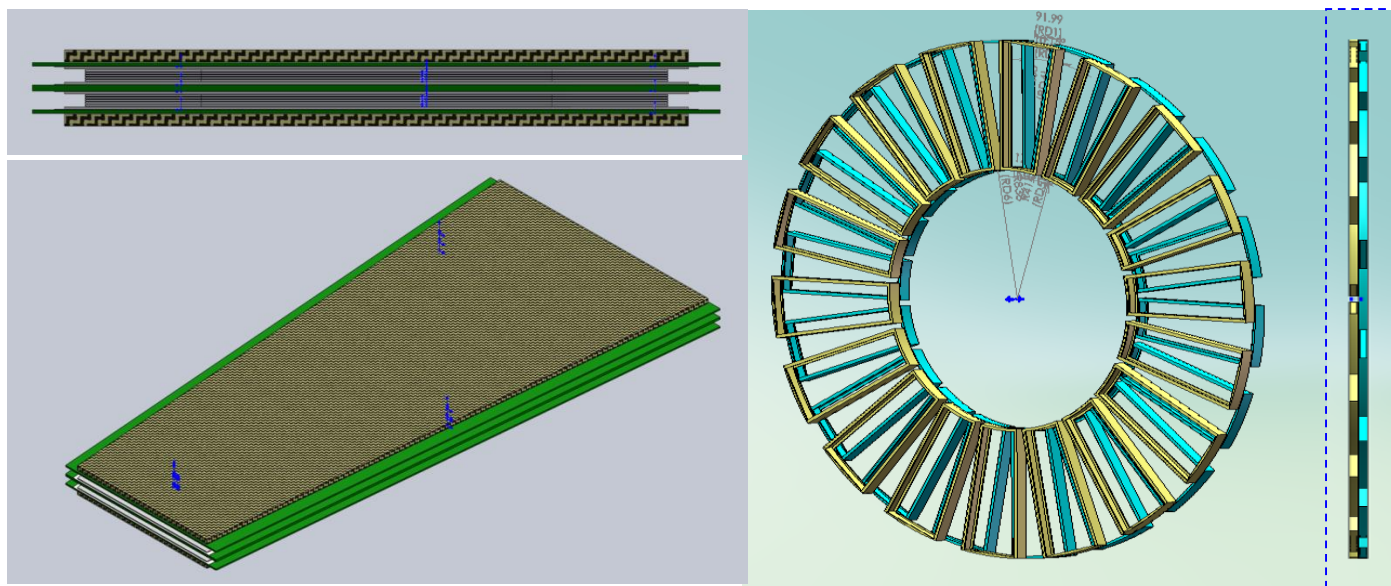
- **课题4) 探测器阵列方案设计和束流测试**

针对BESIII端盖TOF探测器结构和性能测量需求，完成了MRPC阵列的方案设计，并建立束流测试软硬件平台。建立高时间分辨和位置分辨的束流测试望远镜系统，解决MRPC/TOF束流测量中的技术和方法问题。

MRPC/ETOF : 探测器整体方案

针对BESIII 端盖飞行时间探测器结构和性能要求,完成了MRPC原型设计和结构定型,研究建立了模拟和测试方法.对最小电离粒子 (MIPs) 测试结果显示, MRPC探测器的本征时间 $<45\text{ps}$, 探测效率 $>98\%$, 达到设计指标.

课题组设计制作了多种结构的MRPC实验原型,经过反复多次测试和束流实验,详细研究了MRPC实验原型的各方面性能和信号读出方法.确定了双端读出的12气隙MRPC作为工程设计方案,以及相应的结构参数.



每个MRPC 模块采用2X6气隙结构, 气隙宽度为 $220\mu\text{m}$, 双端24路读出.
升级后的ETOF,将由2X36 MRPC模块构成

ETOF/MRPC 主要特性 (模拟)

ETOF 闪烁探测器 (升级前) :

- 电子在MDC和ETOF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 (升级后) :

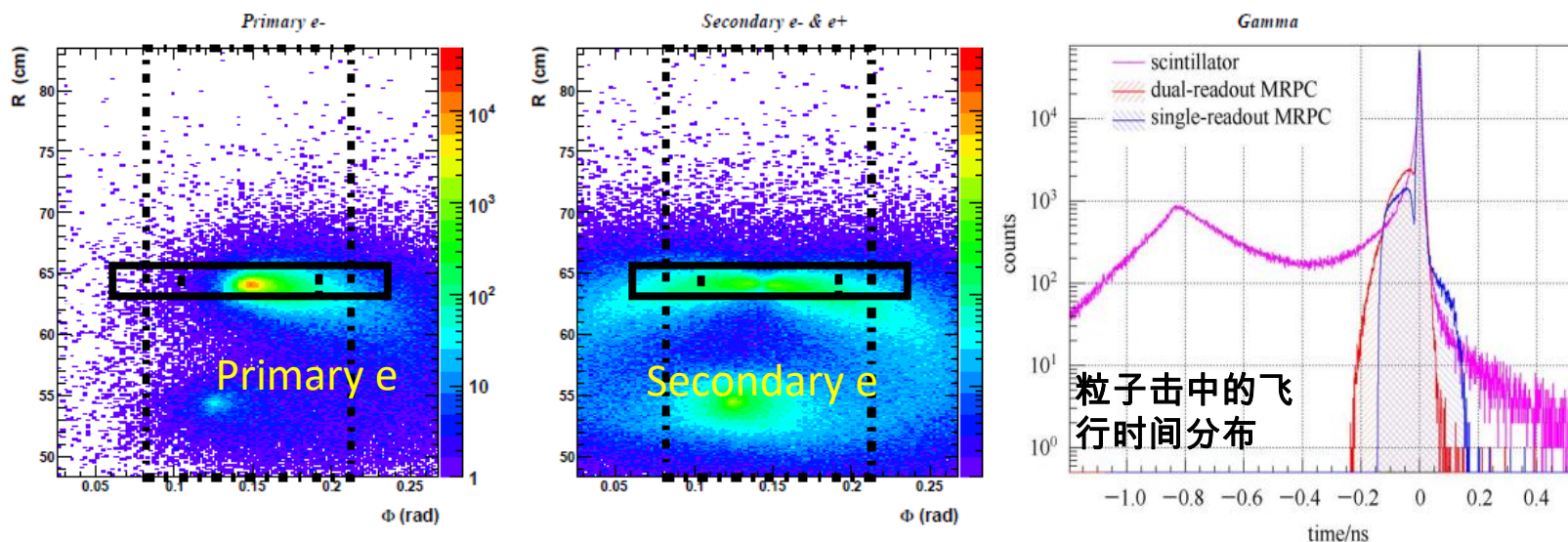
- 宽: 2.5 cm
 - 长: 8.6~14.1 cm
 - 每个模块12个读出条
- ➔ 电子学: $24 \times 36 \times 2 = 1728$ 路



MRPC更小的读出单元

$t_L + t_R$: 消除击中位置引起的时间晃动
 $t_L - t_R$: 提供击中位置的信息

Hit position distribution on one single EndCap TOF Module

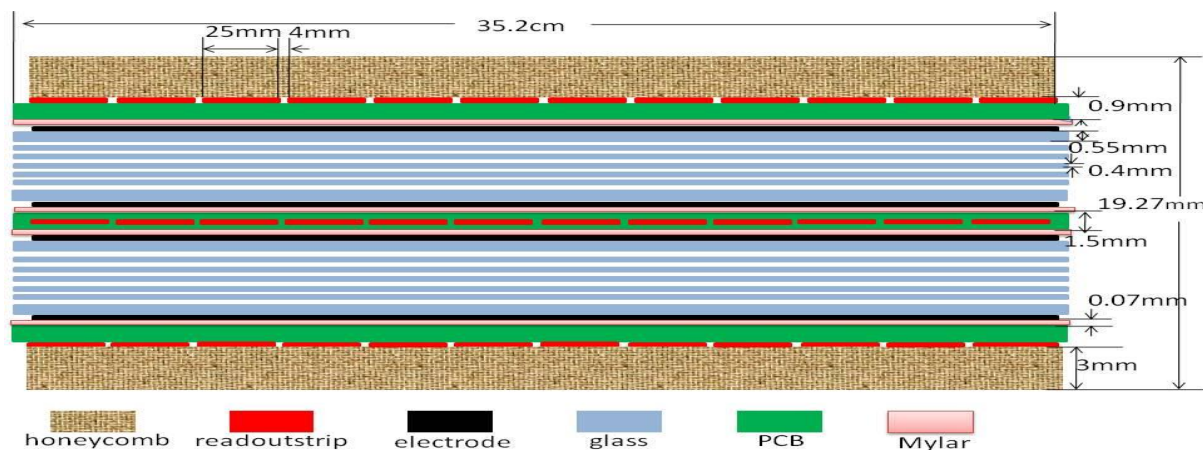
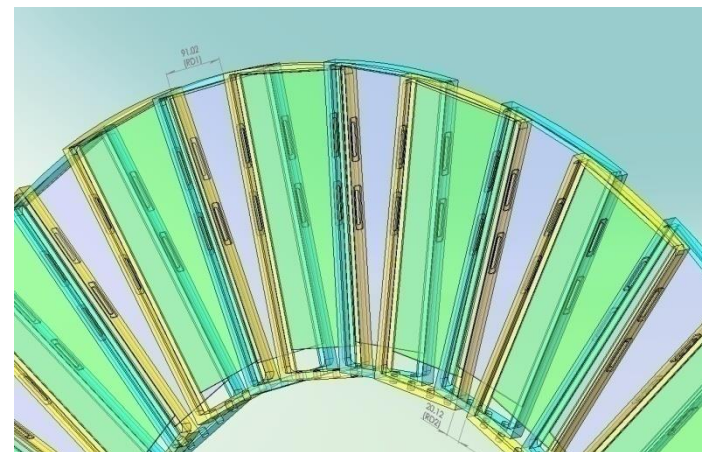


ZHANG Hui et.al., A GEANT4 simulation study of BESIII endcap TOF upgrade, Chinese Physics C Vol. 37, No. 9 (2013) 096002

(1) MRPC原型设计

首次设计完成梯形MRPC模块。在不增加总的读出电子学通道数的前提下，采用读出条的两端同时读取信号.利用MRPC高时间分辨的特点及信号传输时间差,确定粒子沿读出条方向击中位置。

每个MRPC模块均为双层12个气隙，气隙宽度为 $220\mu\text{m}$,为了减小探测器的总厚度，在设计中尽量减小所用材料的厚度，原型探测器的总厚度不超过20mm。

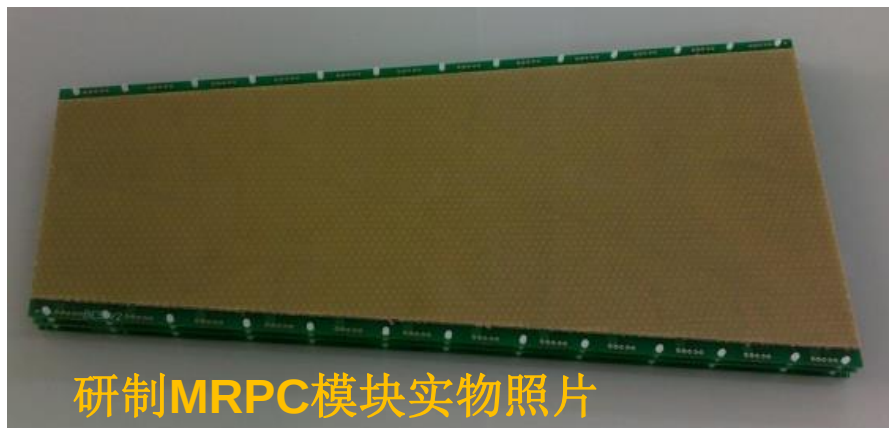


- Gas gap: 2×6
- Gap width: 0.22mm

Thin materials used to reduce the total thickness $\rightarrow \sim 19.3\text{mm}$

MRPC模块设计与定型参数

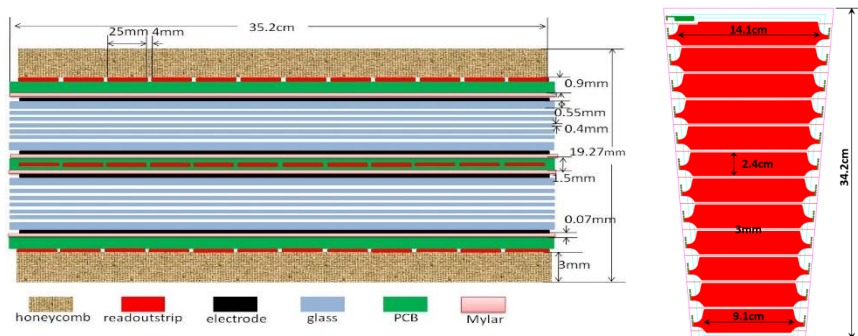
材料	总厚度 (mm)	辐射长度 (x_0)	
玻璃	10x0.4+4x0.55	0.62/12=0.052	
Pcb板材料	2x0.9+1.5	0.33/19.4=0.017	
Pcb敷铜	3x0.035	0.011/1.43=0.008	
蜂窝板表面材料	4x0.2	0.08/19.4=0.004	
气盒盖板	2x1	0.2/8.9=0.022	
总计		0.103	



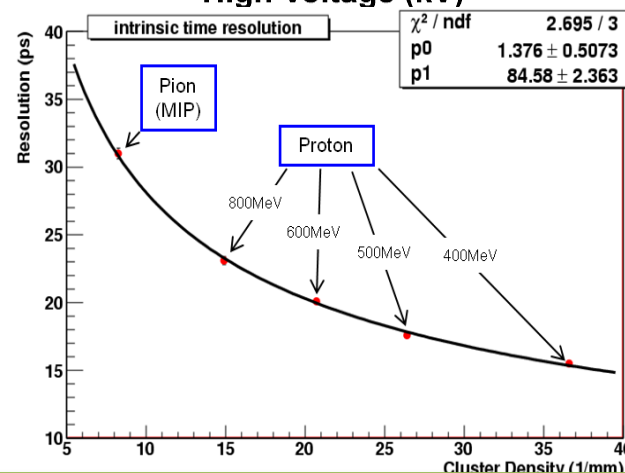
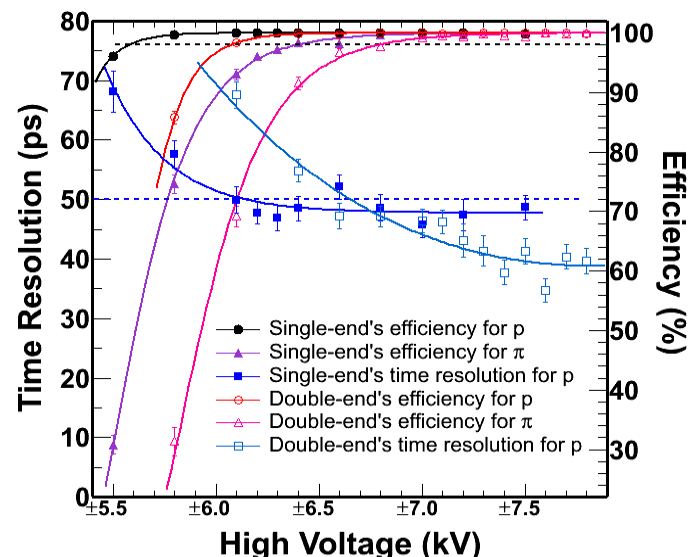
- 气隙: 2 x 6 x 0.22 mm
- 电极玻璃: 0.4mm , 0.55mm
- 总厚度: 19.2 mm
- 单层探测器 : $\sim 0.1X_0$
- 双层重叠区域 : $\sim 0.2X_0$
- 铝合金气盒侧壁位置 : $\sim 0.25X_0$

ETOF MRPC 性能参数

- 束流实验结果显示，探测器本征的时间分辨分别达到：单端读出 <50 ps，双端读出 <45 ps，探测效率超过98%。
- 对不同动量粒子的时间分辨. 其MRPC模块性能完全满足BESIII_ETOF升级的要求。



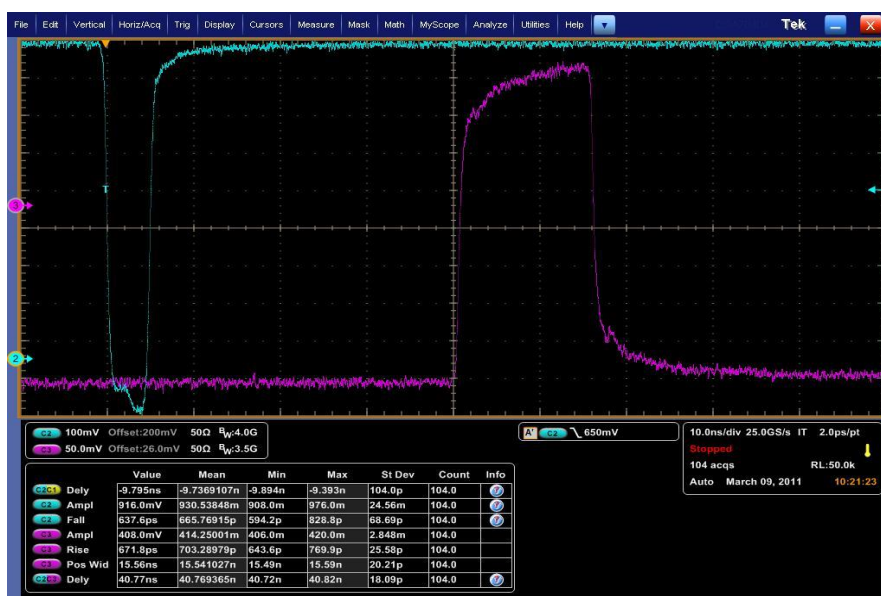
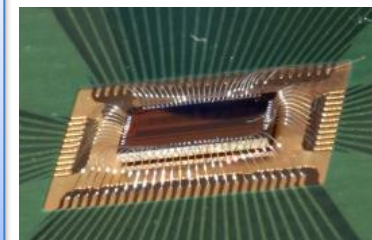
Momentum		500MeV	600MeV	600MeV(p2*)	800MeV
Pion sample	MRPC #1	56	47	47	45
	MRPC #2	51	48	51	40
	MRPC #3	46	48	53	45
Proton sample	MRPC #1	29	32	32	36
	MRPC #2	28	30	35	35
	MRPC #3	31	31	32	35



ETOF/MRPC采用2x6气隙，楔形结构：时间分辨 <50 ps.

(2) 前端电子学研制: NINO/ASIC

研制完成适用于多气隙阻性板室 (MRPC) 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 $< 15\text{ps}$, 单通道功耗小于 50mW , 达到设计和使用要求。

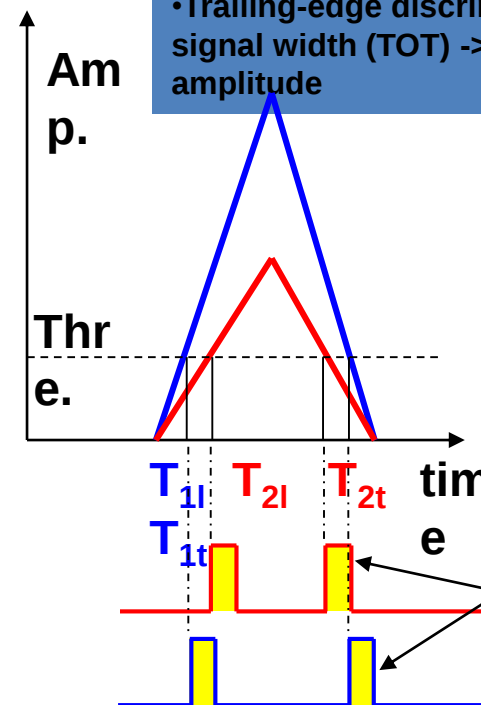


前沿时间抖动达到 10ps 左右, 对研制的5块前放(120通道)测试结果, 均值约 10.6ps

NINO: High performance amplifier/discriminator developed by CERN for ALICE/TOF, and Ideal to cooperate with MRPC and HPTDC

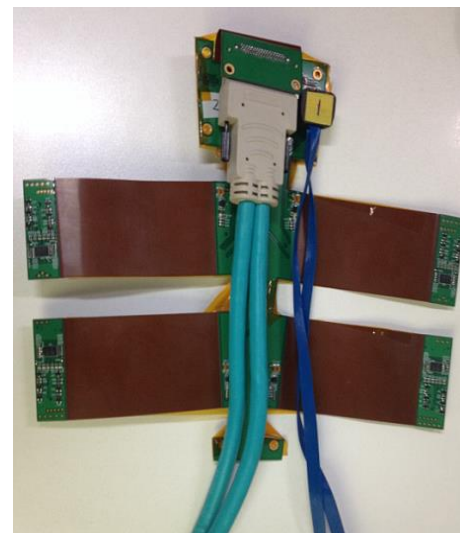
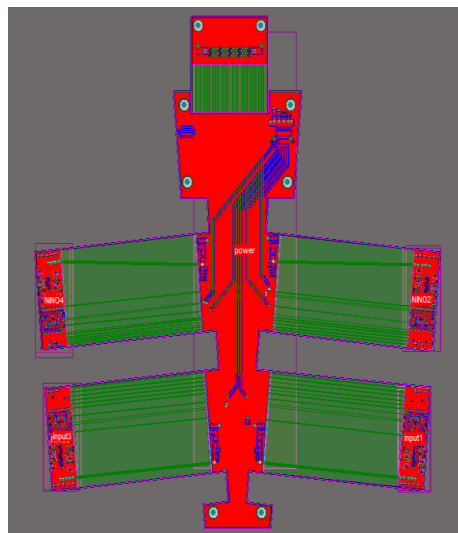
- Leading-edge discrimination :
-> timing signal

- Trailing-edge discrimination: signal width (TOT) -> Signal amplitude



研制定型的放大器与指标

- 前置放大成形电路
 - 24路信号差分LVDS输出
 - 关键信号电路全差分、全屏蔽
 - 4路击中,或信号差分输出
 - 测试信号检测功能
 - PCB+柔性板连接



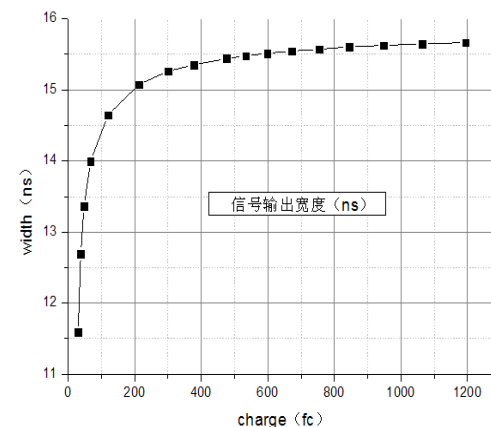
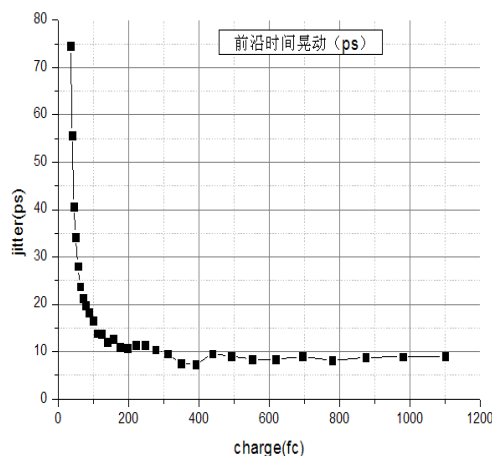
性能指标：

前沿时间晃动：

- $<20\text{ps}$ ($100\text{fc} > Q > 30\text{fc}$);
- $<15\text{ps}$ ($200\text{fc} > Q > 100\text{fc}$);
- $<10\text{ps}$ ($1200\text{fc} > Q > 200\text{fc}$)

输入电荷量量程：

30fC-1200fC(对应输出信号宽度
位于区间:11ns-16ns)

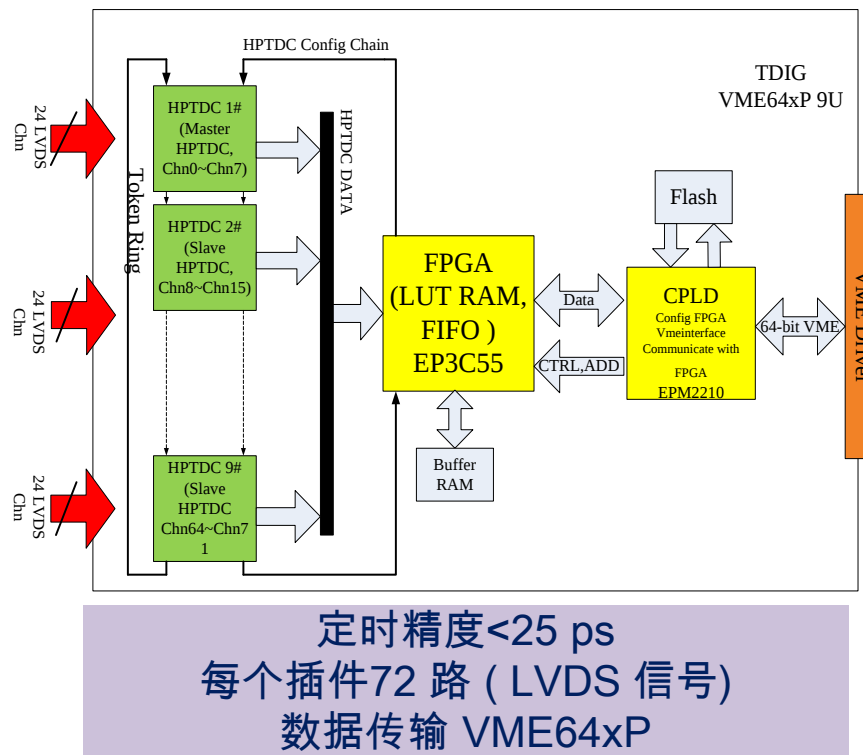


(3) TDIG 电路设计:HPTDC/ASIC

研发的高性能TDC模块，即MRPC/TOF升级的时间数字化插件（简称TDIG）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，并可通过在线实时对多插件的INL进行修正，实现了<20ps的时间测量精度。设计完成了Test模块、前端电子学控制插件等辅助电路及相关读出软件.实验验证了TDIG插件的性能达到设计要求.

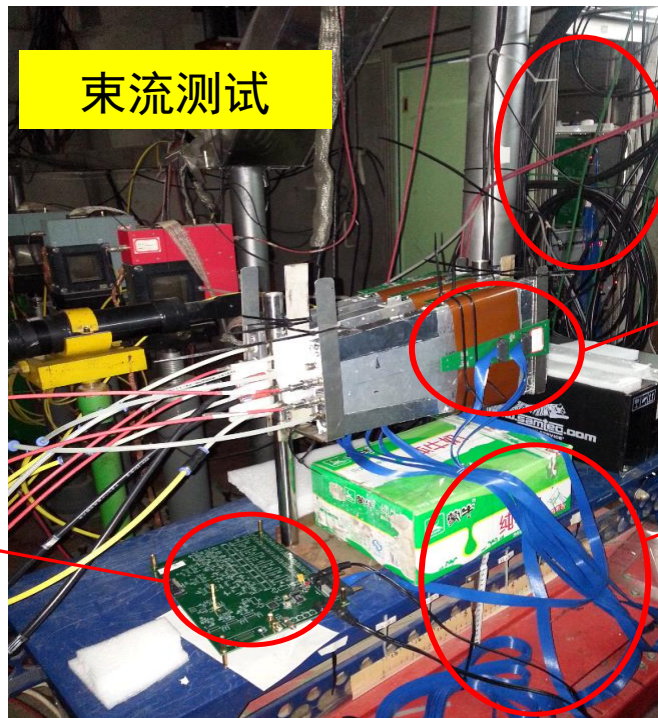
主要研究内容：

1. 分布式后端读出电子学系统架构研究;
2. 高精度、高集成度TDC模块研究
3. 基于FPGA的通用TDC插件研究



高精度、高集成度时间数字化插件 (TDIG)

- 时间测量精度: $< 20\text{ps}$
- 单板电子学通道数: 72
- 非线性在线修正能力
- VME数据读出能力



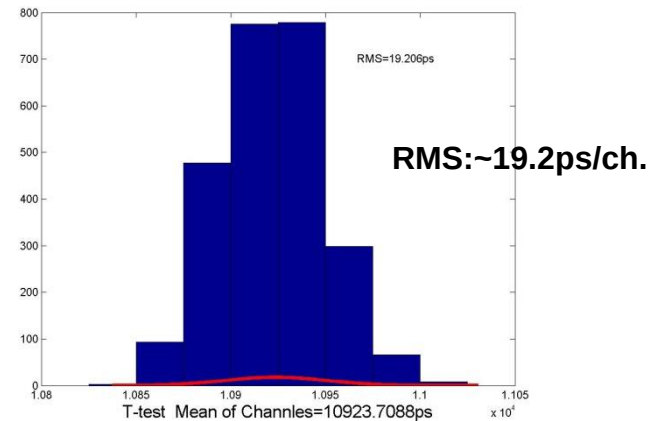
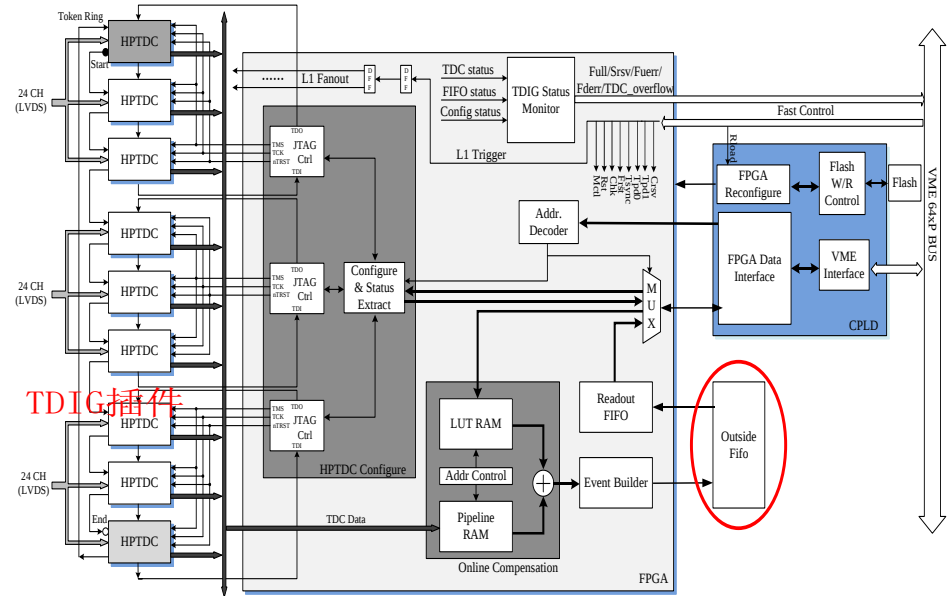
束流测试

TDIG插件

前端电子学板

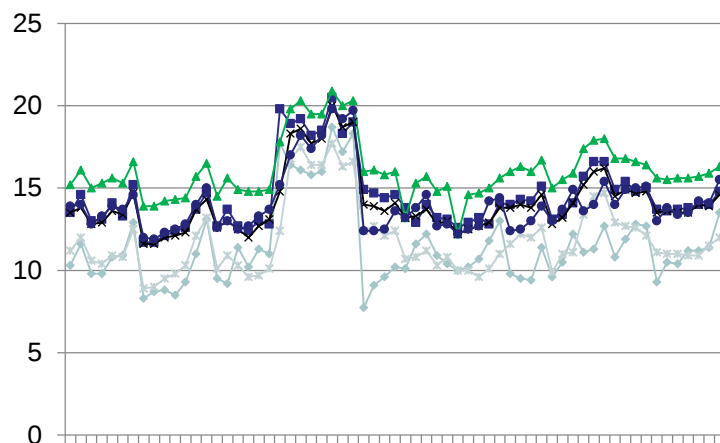
电缆

测试板

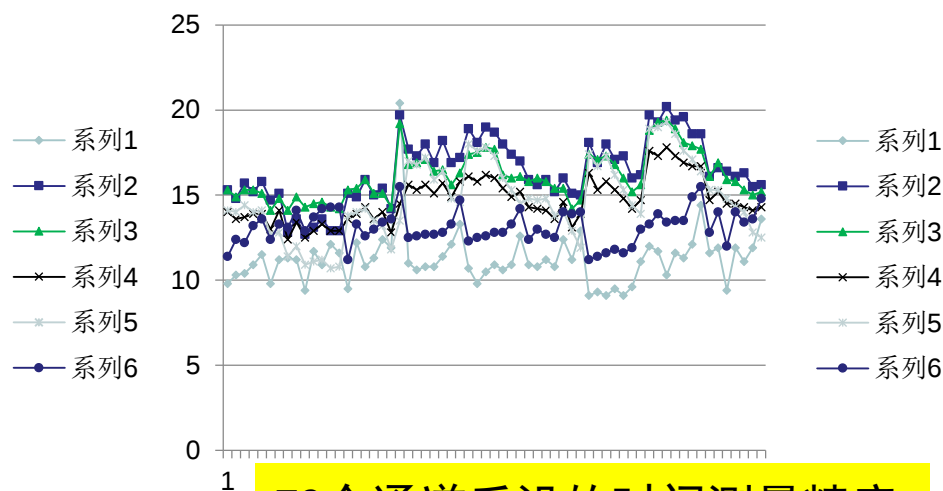


TDIG时间分辨性能测试结果

电子学时间测量精度 $\sim 20\text{ps}$ ，好于设计指标 25ps



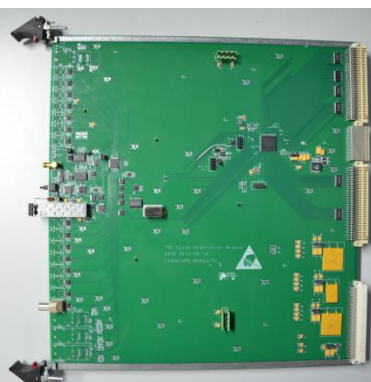
72个通道前沿的时间测量精度



72个通道后沿的时间测量精度



TDIG插件



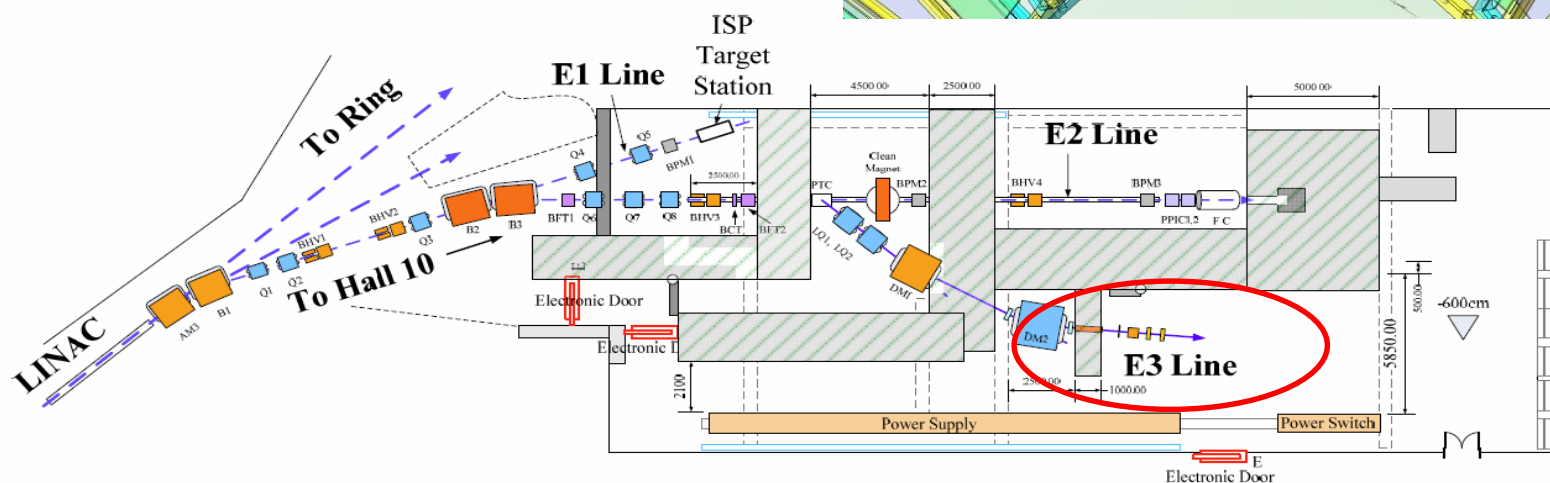
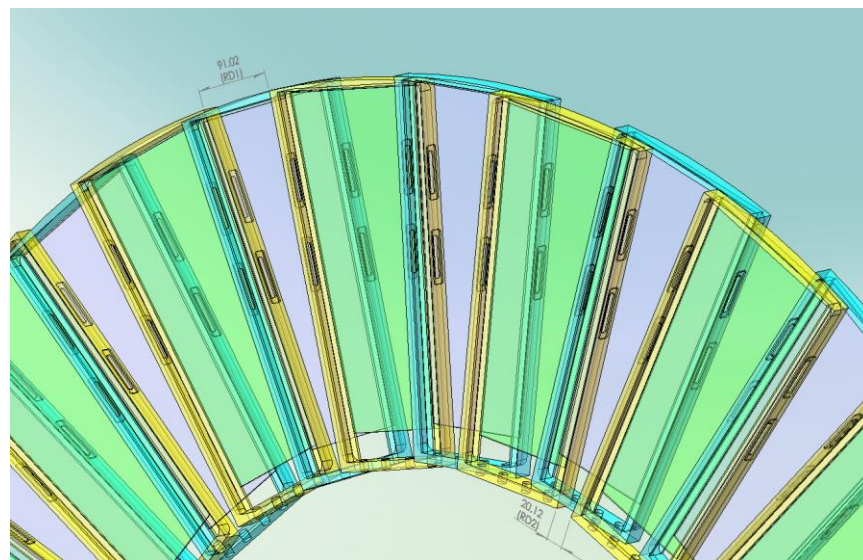
时钟插件



快控制插件

(4) 探测器阵列方案设计和束流测试

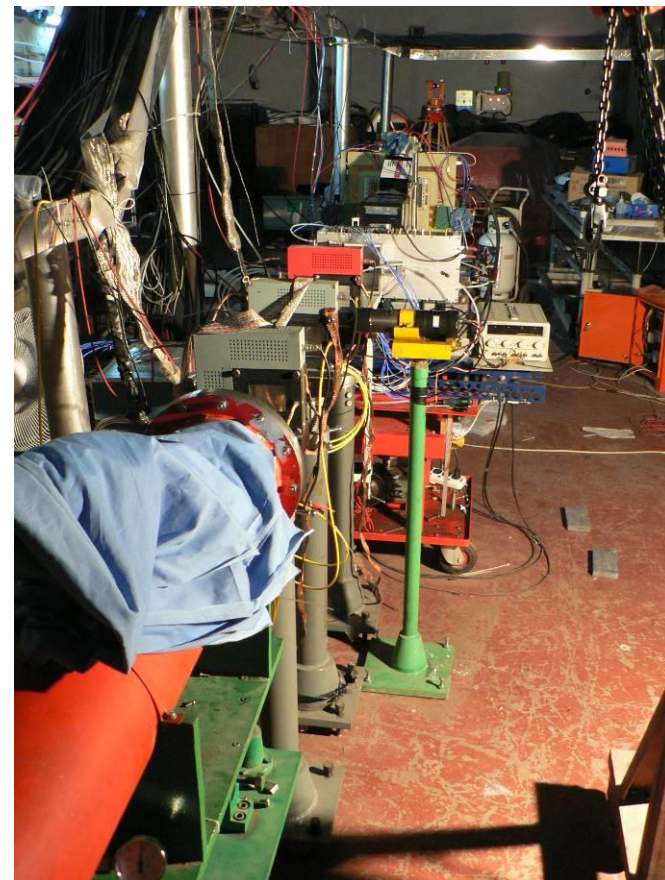
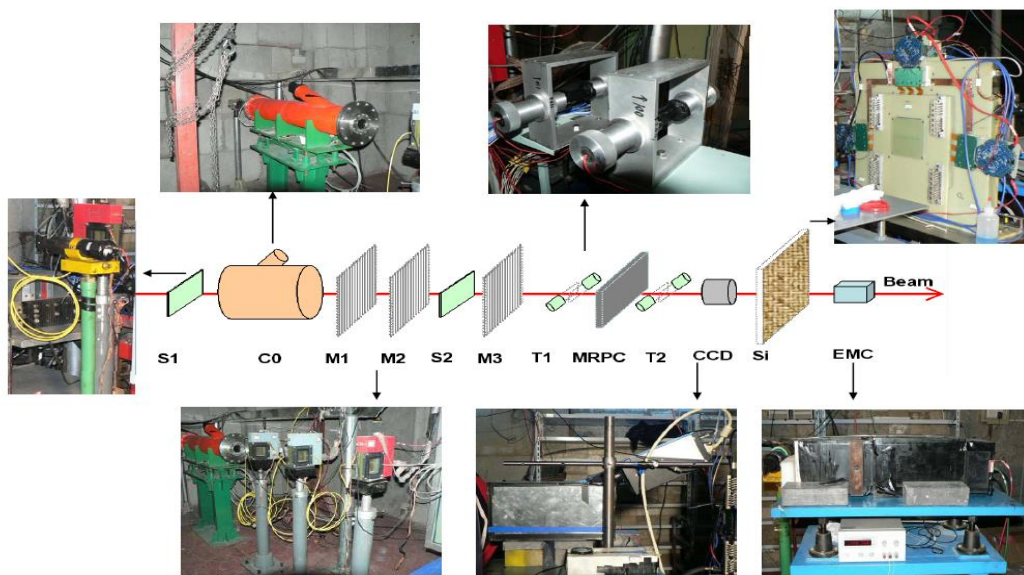
针对BESIII/TOF探测器结构和性能测量需求，完成MRPC阵列的方案设计. 建立束流测试软硬件平台，解决了MRPC/TOF测量中的技术和方法问题. 为工程设计提供了大量的实验数据.



The BEPC - Hall 10 for Beijing-BTF

建立专用MRPC束流测试系统

- 课题组利用国内现有的BEPC / E 3 试验束，建立时间分辨接近40ps的束流测试系统和测试平台用于MRPC模型性能测试。该测试平台包括：气体系统、高压系统、扫描系统、径迹系统、触发系统（T0系统）、数据获取系统在内共6个子系统。

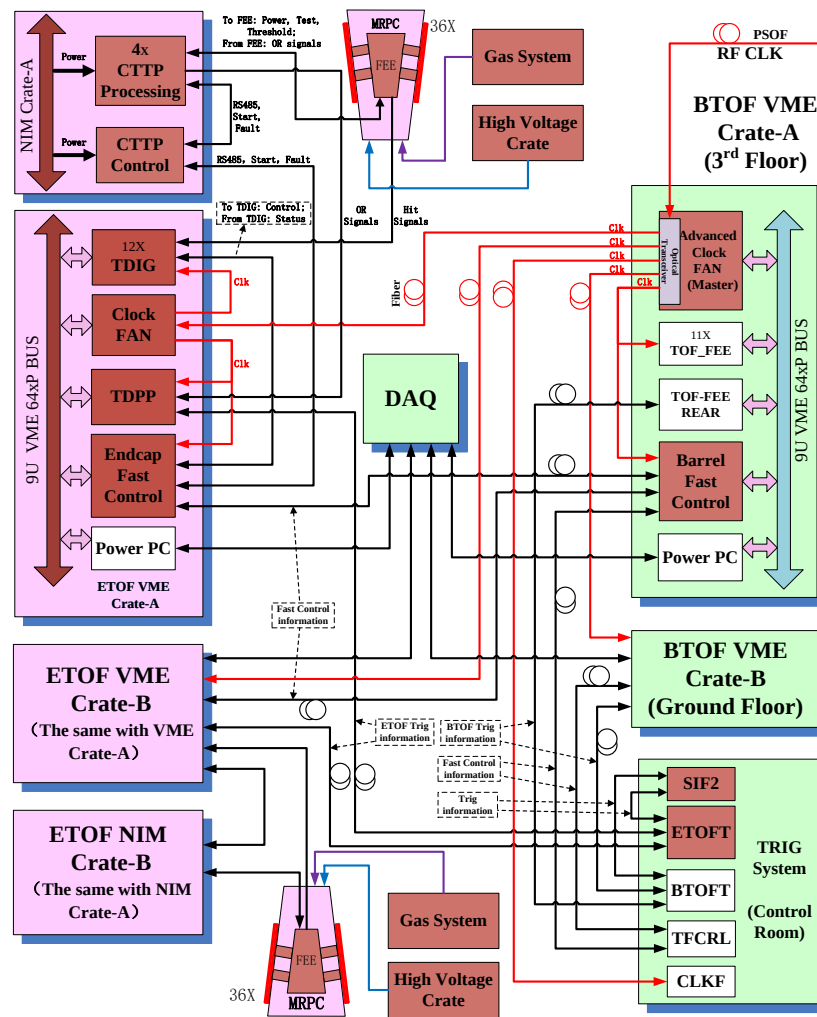


BEPC/E3束流测试系统及子探测器位置分布示意图

BESIII ETOF 升级总体方案

在上述研究基础上,针对工程设计定型要求,2013年10月,项目组对研制的MRPC模块和电子学系统进行了进一步的束流实验和验证. 进一步验证的研制的探测器与电子学系统的性能和可靠性。

以此为依据,优化设计,确定工程研制方案。

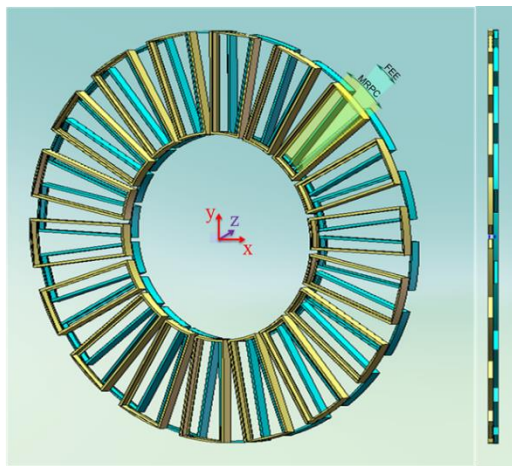


ETOOF升级改造工程：

中科院重大基础设施维修改造项目
北京谱仪端部飞行时间探测器
及主漂移室内室改造

（2013-2016）

BESIII ETOF 升级方案



探测器:

谱仪东西端部共72个模块
每个模块12 pads, 双端读出

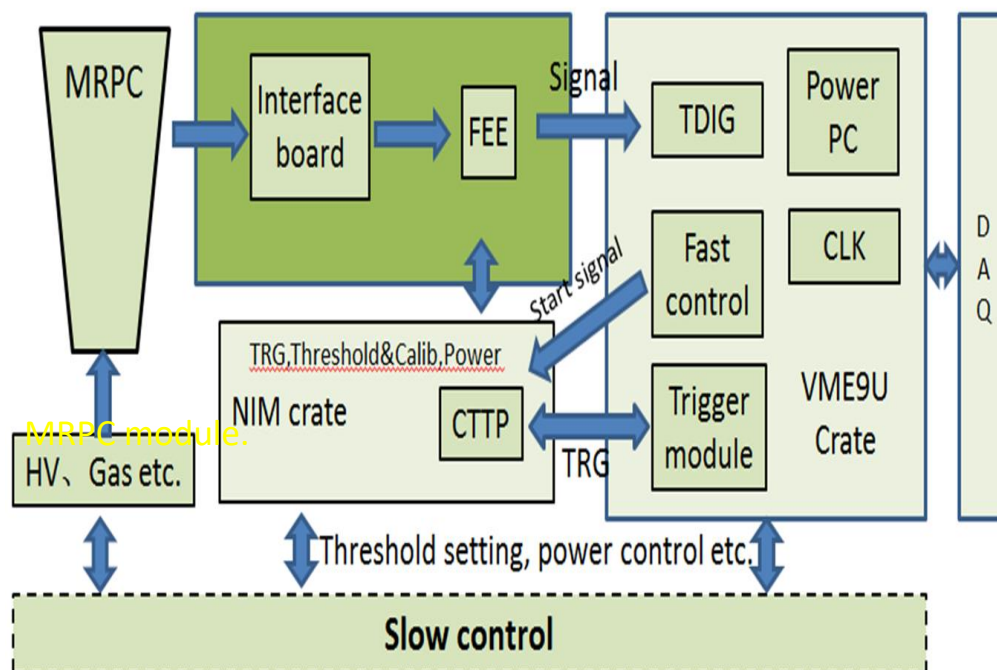
电子学:

1728路

前端电子学: 72 块

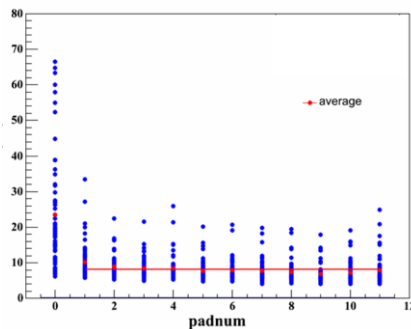
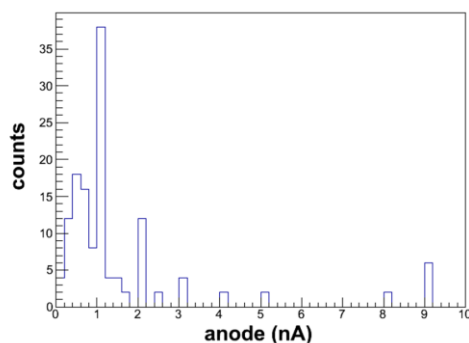
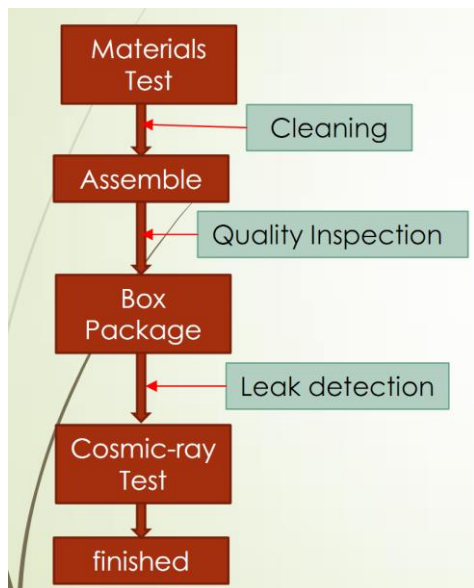
后端电子学: 24 TDIG插件

另有CTTP和快控制插件: 提供触发和控制



2013年5月, 获得中国科学院大科学装置维修改造项目支持。同年9月经量产评审, 其模块设计和性能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。

MRPC 批量制作与测试

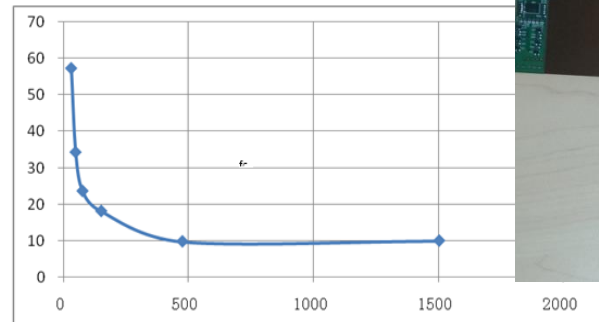


80个MRPC漏电流 $<10\text{nA}$, 平均噪声计数 $<10\text{Hz}$

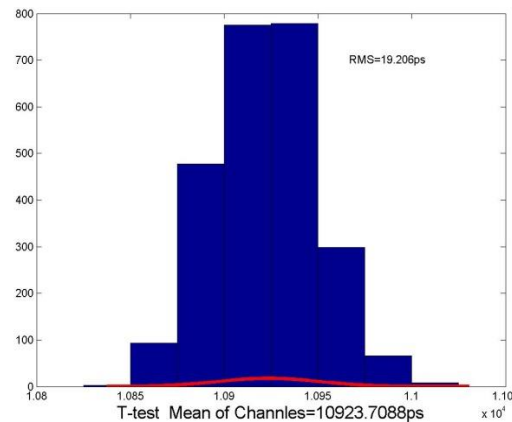
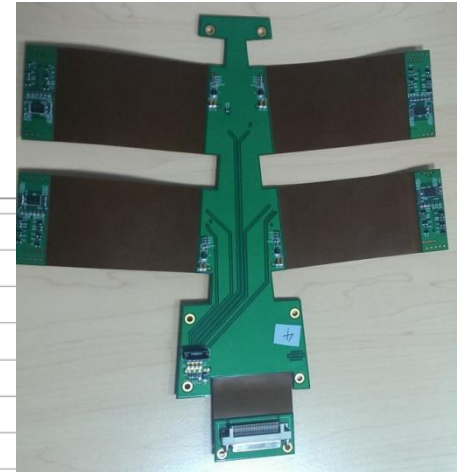
读出电子学

- 采用ASIC/NINO研制前端放大器：差分信号输入，实现对MRPC输出的信号进行放大甄别和时间过阈（Time Over Threshold）功能。
- 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。
- 定时精度好于15ps，单通道功耗小于50mW。
- 基于ASIC/HPTDC芯片，采用锁相环和内插技术，实现高精度脉冲前后沿时间精确测量。
- 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！



NINO前放, 高能所电子学组研制

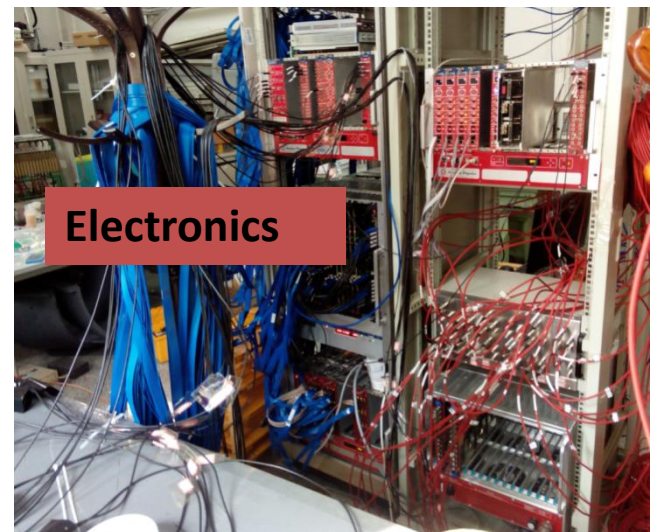
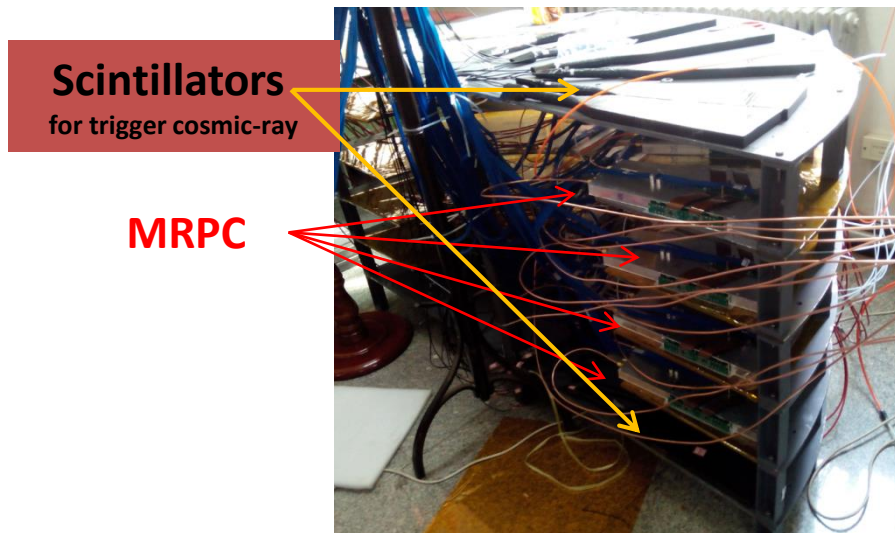


TDIC, 科大物理电子学组研制



宇宙线批量检测

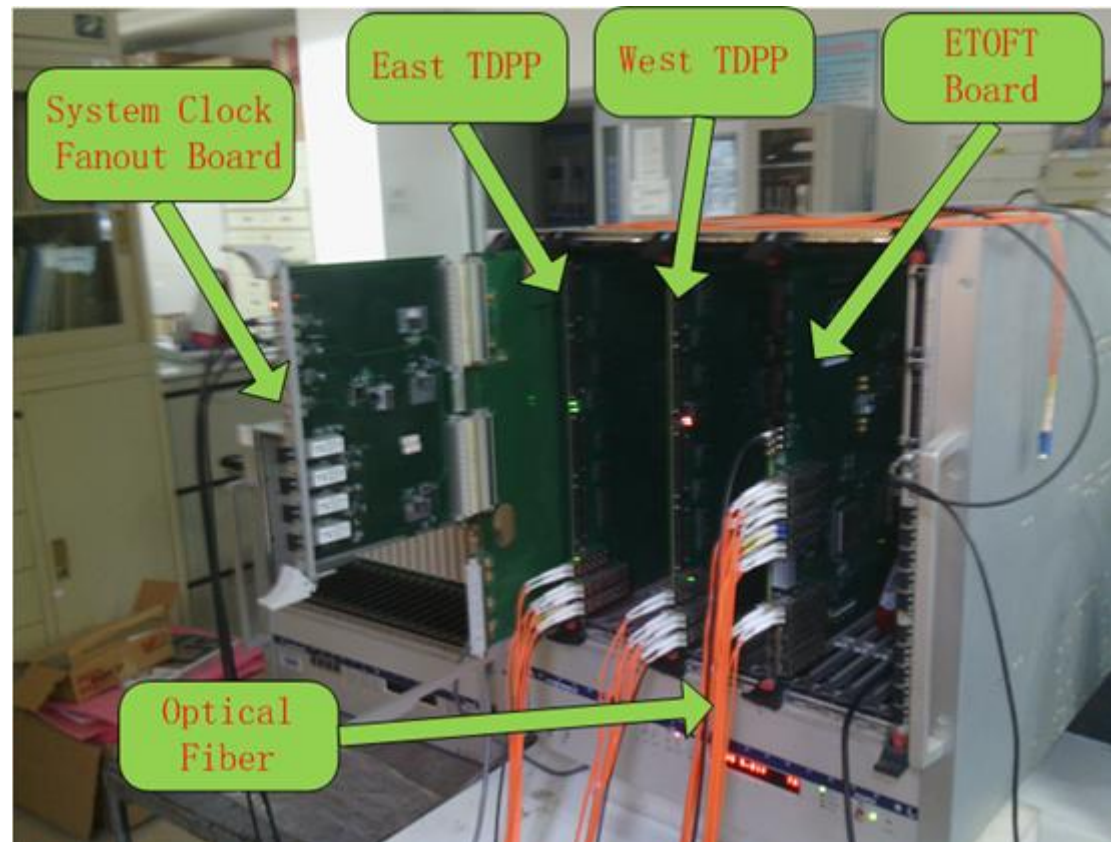
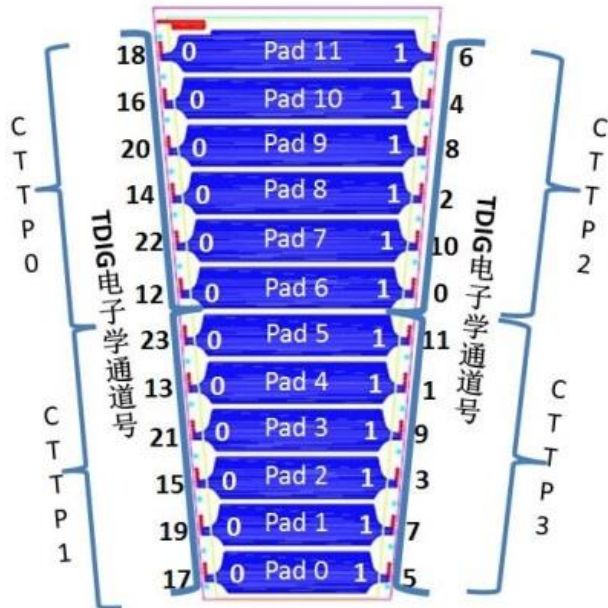
- The production of the whole system
 - Sep. 2014 ~ Mar. 2015
- Combined all the systems together
- 3 months cosmic-ray test
- Details in Xiaozhuang Wang's poster



触发系统

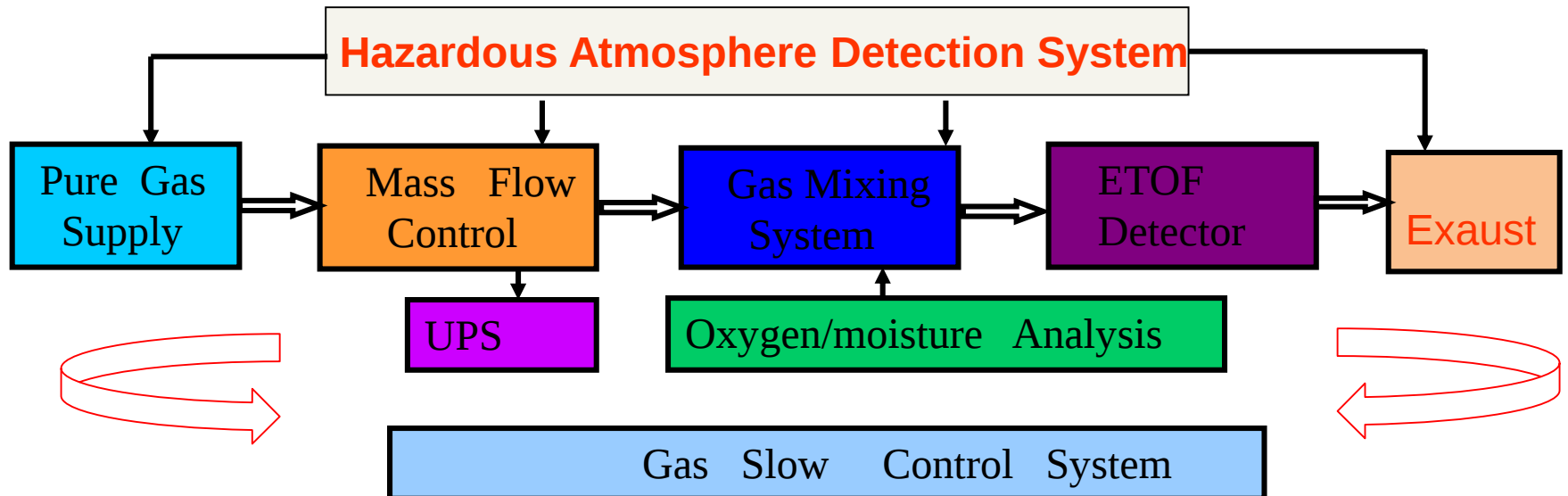
- ETOF Trigger system consist of TDPP(Trigger Data Pre-Processor), ETOFT(ETOF Trigger Board),SIF2(Signal Integration and Fanout) and FPGA firmware.
- Trigger conditions: $NETOF \geq 1$, $NETOF \geq 2$, Back to Back

Or signal from four NINO chips as one output

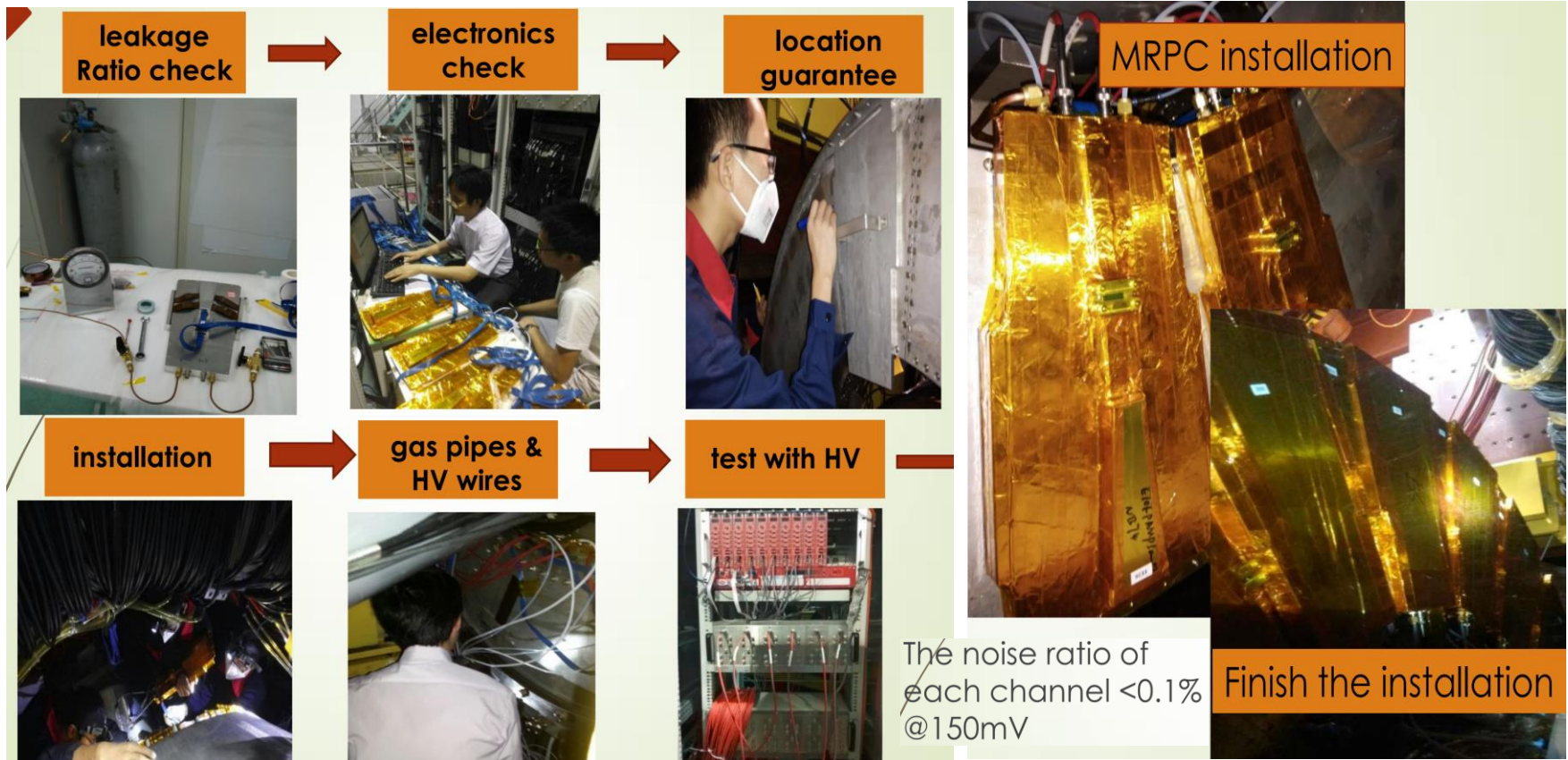


气体系统

- Gas ratio: 90%R134a+5%C4H10+5%SF6.
- Operated by gas slow control system
 - the status of gas mixture
 - automatic responses
 - Status monitors and interlocks



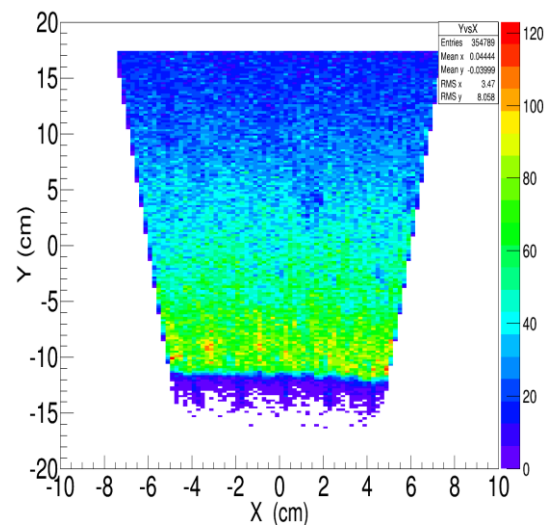
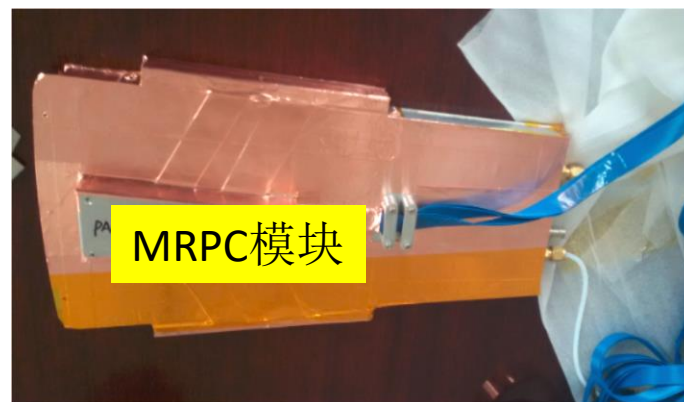
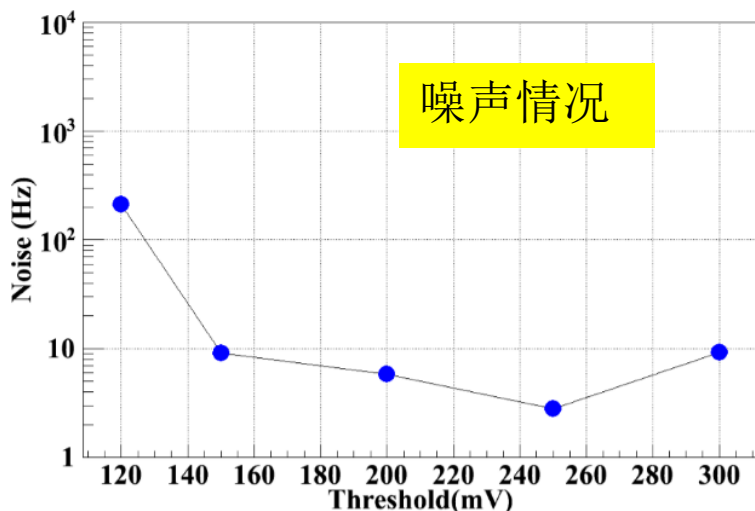
BESIII/ETOF 安装



2015. 9月ETOF/MRPC全部完成，开始运行和物理取数

ETOF/MRPC噪声水平

◆ 噪声计数率 $<10\text{Hz/ch}$, 噪声占有效率 $<0.1\%$



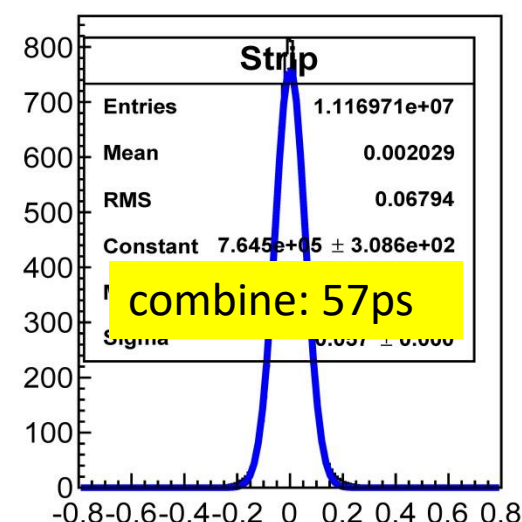
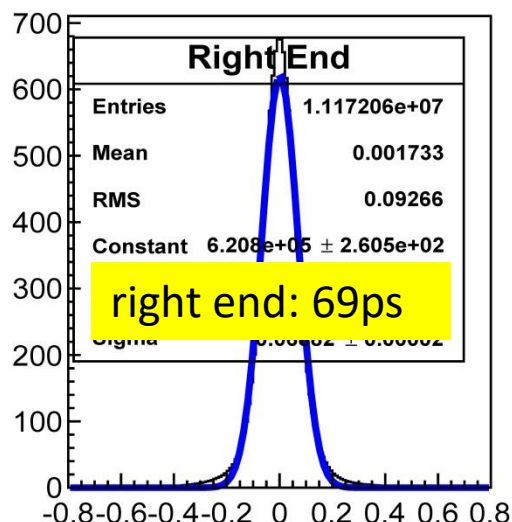
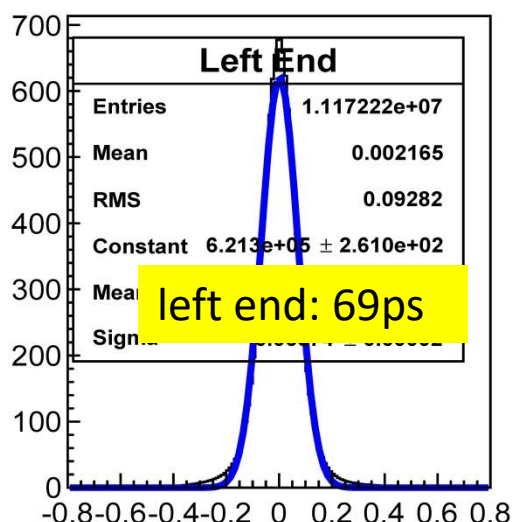
端盖飞行时间探测器的离线数据刻度

- 选择Bhabha事例作为刻度样本。

(引自孙盛森 研究员报告)

- 带电径迹在EMC的沉积能量 $E > 0.7 \cdot E_{beam}$
- 主漂移室径迹背对背

$$t_{corr}^{combine} = \frac{1}{2} (t_{corr}^{left} + t_{corr}^{right})$$



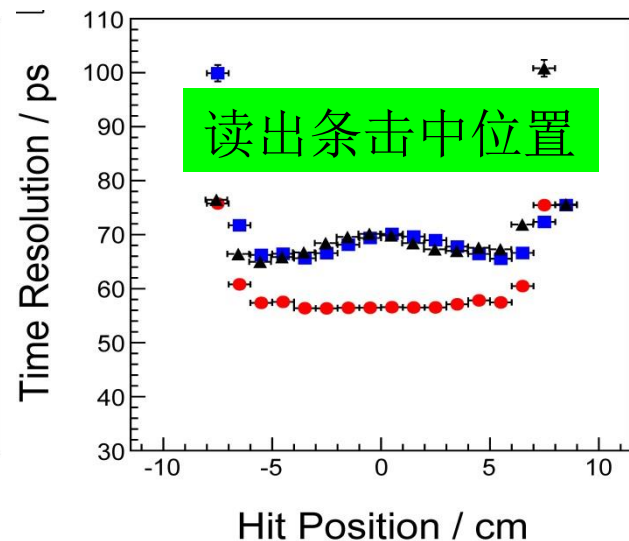
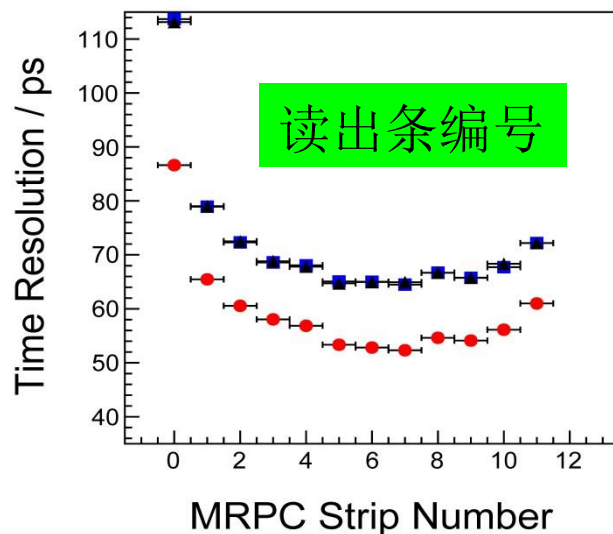
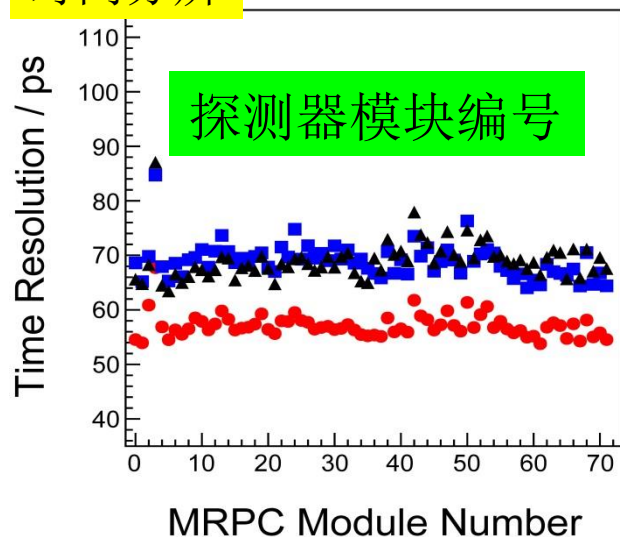
刻度经验公式:

$$t_{corr} = p_0 + \frac{p_1 + p_2 \cdot z}{\sqrt{Q}} + \frac{p_3 + p_4 \cdot z}{Q} + (p_5 + p_6 \cdot z) \cdot Q + p_7 \cdot Q^2 + p_8 \cdot Q^3 + p_9 \cdot Q^4 + p_{10} \cdot z + p_{11} \cdot z^2 + p_{12} \cdot z^3$$

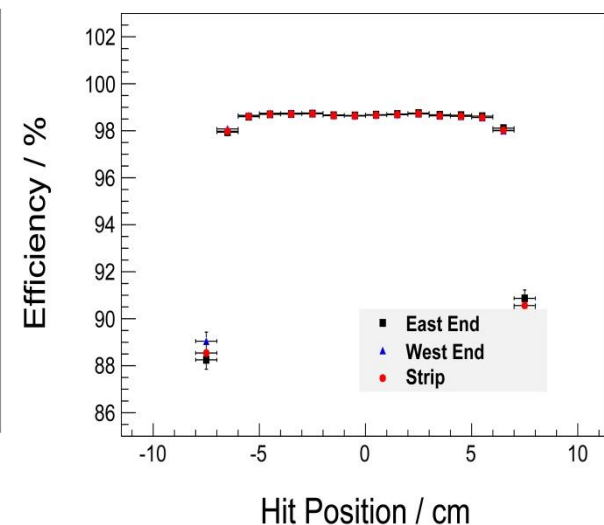
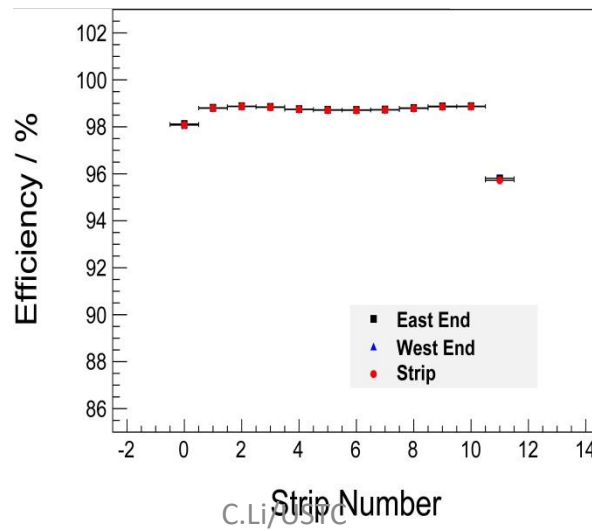
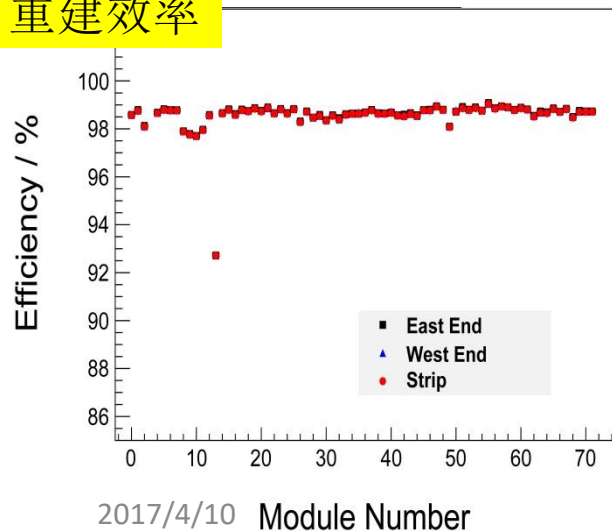
端盖飞行时间探测器的离线数据刻度

(引自孙盛森 研究员报告)

时间分辨



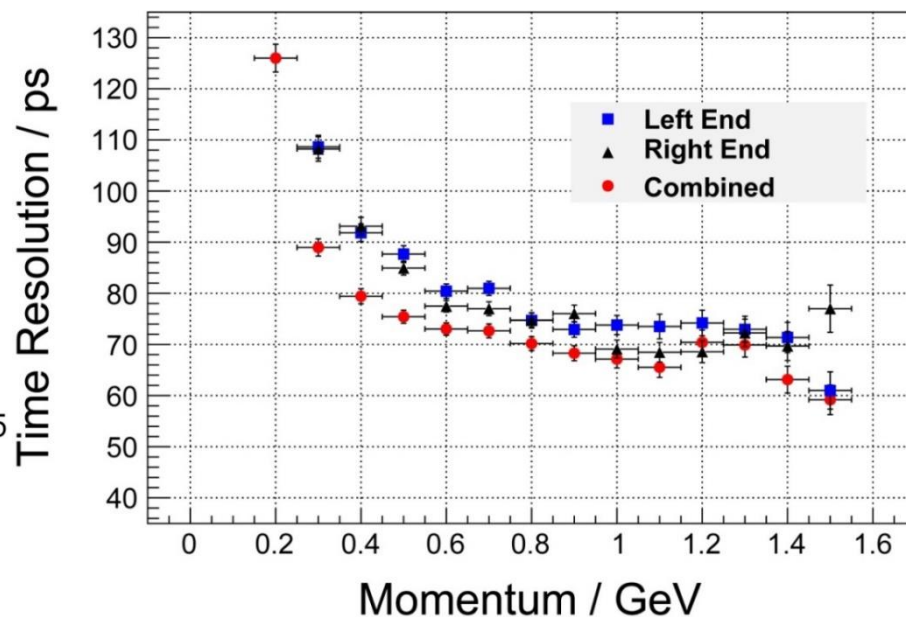
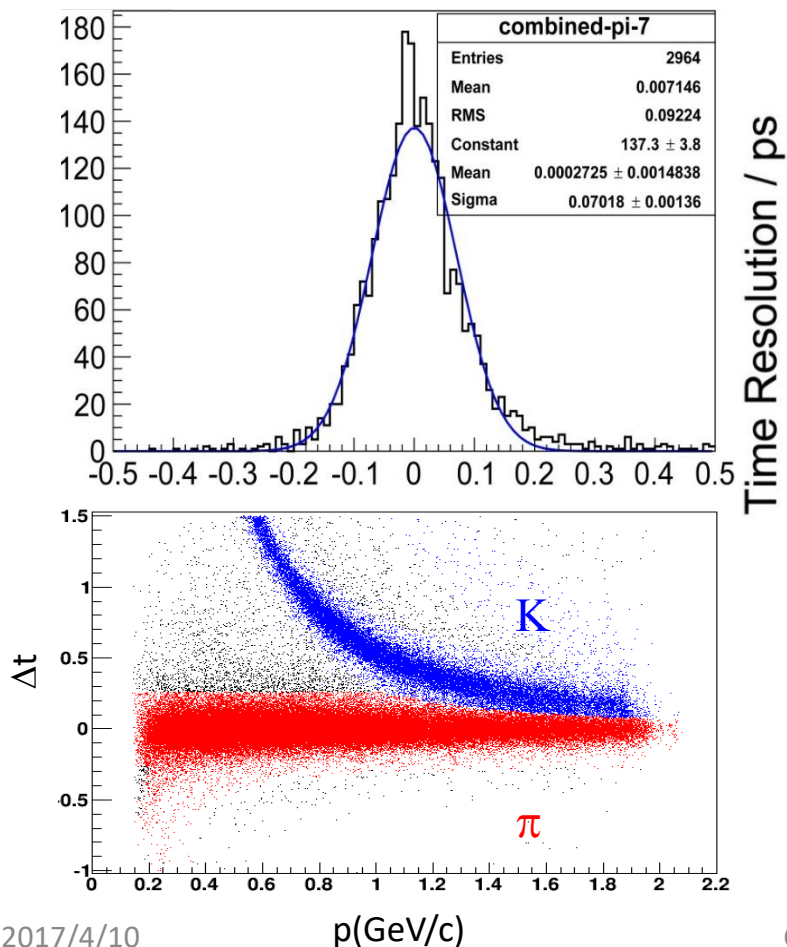
重建效率



强子样本和 π 介子的时间分辨

- 利用获得的 π 介子的真实数据样本得到端盖飞行时间探测器的时间分辨指标。

(引自孙盛森 研究员报告)



设计指标：动量0.8GeV的 π 介子80ps
BESIII改造后端盖TOF：70ps

验收结论：处于国际领先水平

一、测试方法

二、测试结果

1. 端盖飞行时间探测器：各系统包括探测器、电子学、高压、气体、慢控制、触发、数据获取等已经全部安装就位，在北京正负电子对撞机和北京谱仪实验取数中稳定运行，实时数据监测正常。
2. 主漂移室新内室：其探测器和前端电子学系统已经研制完成，在实验室宇宙线测试模式下，工作稳定，数据监测正常。
3. 测试指标如下表：

探测器	验收指标	测试结果	完成情况
端盖飞行时间探测器	800MeV pion 时间分辨小于 100 ps	70 ps	好于验收指标
主漂移室内室	空间分辨 < 150 μ m	129 μ m	好于验收指标
	单丝漏电流 < 0.01 μ A	< 0.01 μ A	好于验收指标

三、工艺测试专家组形成如下意见：

改造后的北京谱仪端盖飞行时间探测器已经安装就位并运行6个月，其间端盖飞行时间探测器工作稳定，工艺测试结果表明其时间分辨率优于设计指标，处于国际领先水平。

北京谱仪漂移室新内室已经研制完成，实验室宇宙线实验运行稳定，空间分辨率和单丝漏电流都优于设计指标，并且进行了拆装的初步试验。该新内室可满足漂移室内室更换需求。

工艺测试组组长 签名：

王乃彦

2016年6月22日

中国科学院重大科技基础设施维修改造项目“北京谱仪端盖飞行时间探测器及主漂移室内室改造” 设备组验收意见

2016 年 12 月 28 日，中国科学院条件保障与财务局组织专家在高能物理研究所对院重大科技基础设施维修改造项目——“北京谱仪端盖飞行时间探测器及主漂移室内室改造”进行设备验收。

设备专家组听取了项目工作汇报，核对了设备资产账，现场抽查了设备使用情况，形成如下意见：

一、验收依据

2013 年 2 月，中国科学院条件保障与财务局批复《中国科学院重大科技基础设施维修改造项目任务书——“北京谱仪端盖飞行时间探测器及主漂移室内室改造”》。

二、验收核查意见

完成了设备建设任务，合计 109 台/套（其中高能所 93 台/套，中科大 16 台/套），形成设备资产总额 435.81 万元（其中高能所 323.92 万元，中科大 111.89 万元）。设备运行正常。做到了设备账实相符，管理规范。

设备专家组认为，维修改造项目“北京谱仪端盖飞行时间探测器及主漂移室内室改造”具备了设备验收条件，同意通过设备验收。

设备组专家（签字）：
徐能
申亚芝

2016 年 12 月 28 日

“北京谱仪端盖飞行时间探测器及主漂移室内室改造”项目档案分类方案

本项目档案分综合卷、研制卷、照片卷、验收卷**四部分**，形成档案**39卷+1卷**（验收卷）。

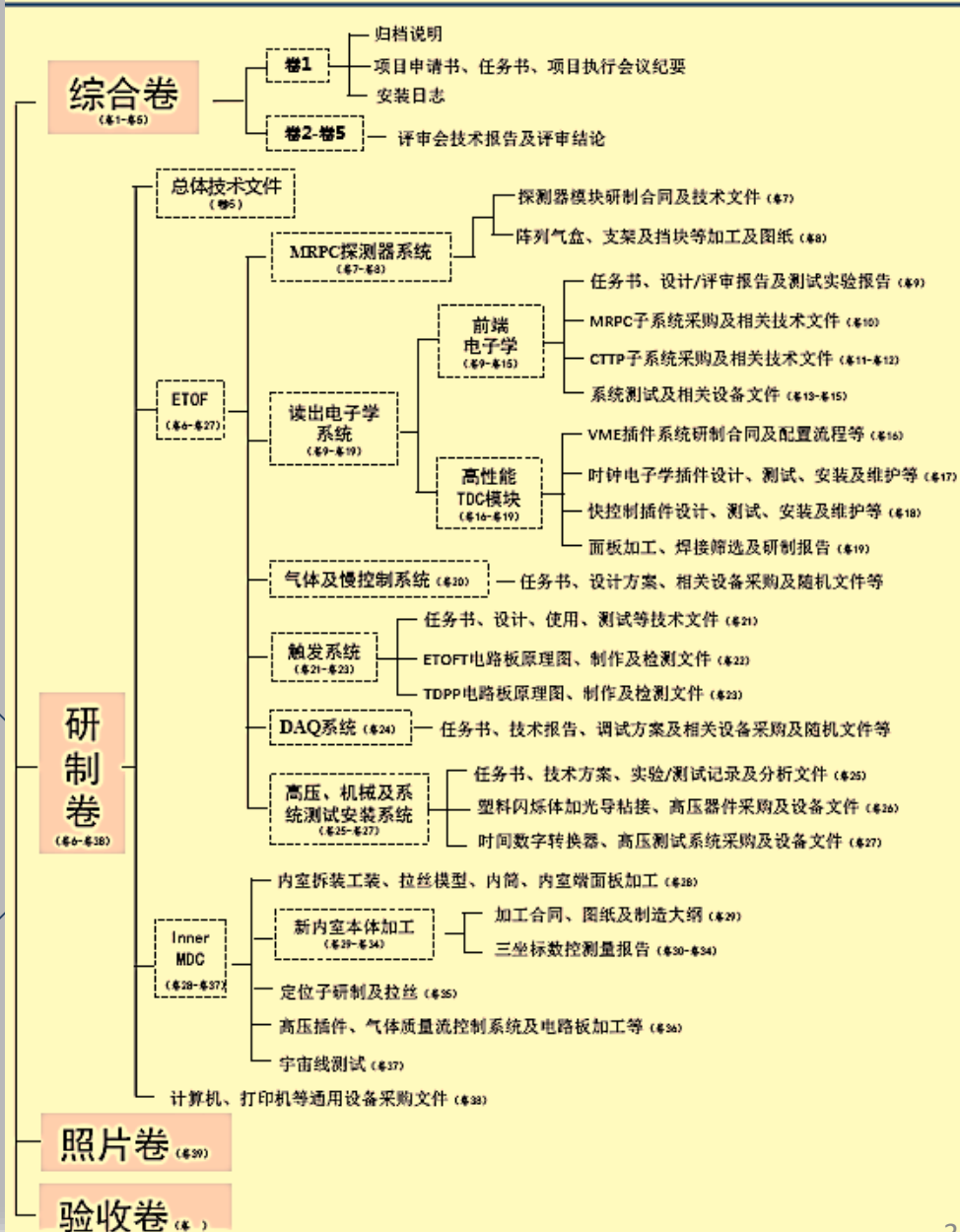
□ 文字材料227件
/5268页

□ 电路原理图267张

□ 图纸134张

□ 照片档案**28**张

□ 光盘**2**张。



总结

技术亮点:

首次采用12气隙,双端读出模式, MRPC时间分辨获得较大提高.

优化NINO+HPTDC读出电子学系统性能进一步提高.

高水平探测系统设计,使得噪声水平大大减少.

BESIII/MRPC/EToF研制成功, 关键性能指标达到国际领先水平。标志我们已全面掌握MRPC/ToF技术。

Experiment	Module Size	Pad Size	Pad Number	gap number	gap/um	Readout mode	Resolution(p s)
STAR TOF [1][2]	6.3×20 cm ²	6.3×3.1cm ²	6	5	220	Single-end	~80(π)
STAR MTD [3][4]	93×58 cm ² 90×58 cm ²	87×3.8 cm ² 87×3.8 cm ²	10 12	2×5 6	250	Double-end	~90(μ)
ALICE TOF[5][6]	13×120cm ²	3.4×2.5 cm ²	96	2×5	250	Single-end	86 (π)
BESIII ETOF	L1:13.7 cm L2:20.2 cm H:38.2 cm	L:9.1-14.1 cm W:2.4 cm	12	2×6	220	Double-End	60* (e) - 70* (π)

主要参加人员

- 工程任务分解
 - 总体：衡月昆

探测器研制:

- MRPC：李澄 孙勇杰 王小壮 刘圳 陈天翔 杨荣星 曾晖 等 (科大)
- 前端电子学 (preamp、CTTP)：代洪亮 江晓山 盛华义 张捷 李捷 (高能所)
- 后端电子学 (TDIG、时钟、快控制)：刘树斌 曹平 孙维佳 王昀 等(科大)
- 实验 (宇宙线、谱仪、束流, 高压)：吴智 王小壮 刘圳 雷翔翠 徐美航等(高能所，科大)

谱仪部分:

- DAQ：季晓璐 朱科军
- 触发：赵京周 龚文煊 黄杰 刘振安
- 气体：罗小兰 张银鸿 于福光
- 慢控：叶梅
- 机械：陈明明 马骁妍
- 软件：孙盛森 王小壮 杨荣星 等

工程管理:

- 任务书、工作联系单、档案、进度

---谢谢!