

科技部重点研发计划  
高能环形正负电子对撞机相关的物理  
和关键技术预研究中期进展汇报

课题四：探测器关键技术预研

杨海军

(代表探测器预研团队)

2018年8月7日



# 报告提纲

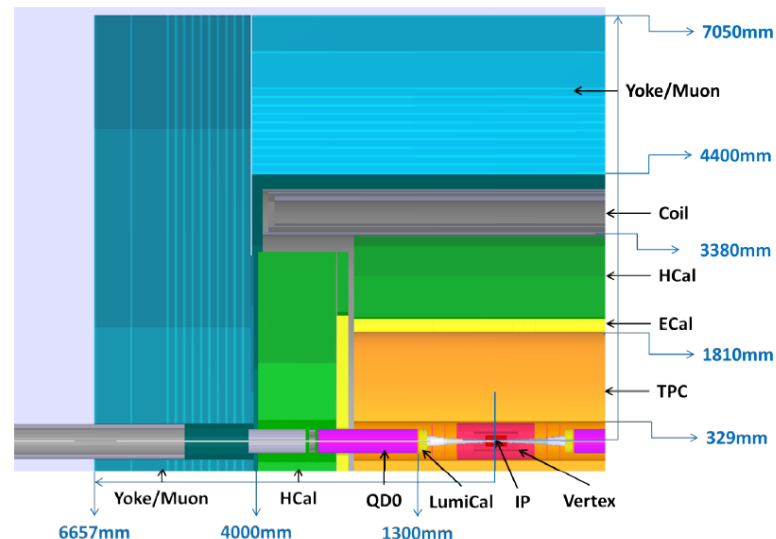
---

- 一、课题中期考核指标
- 二、重要研究进展和成果
- 三、人员投入和经费执行情况
- 四、国际专家评估情况
- 五、下一步研究计划和目标

# 探测器关键技术预研课题简介

本课题为研究和解决环形对撞机实验中主要探测器的关键技术难点，分为四个探测技术研究方向：

- (1) 硅探测器ASIC芯片设计
- (2) 时间投影室关键问题研究
- (3) 电磁和强子量能器关键技术研究
- (4) 大动量范围粒子鉴别技术研究



课题经费：1528万 (间接经费179.4万)

到账经费1098.2万，执行507.7万，执行率46%

课题负责人：杨海军（上海交通大学）

参加单位5家：高能所、科大、清华、华师、上海交大

参加骨干14人：4正高、8副高、2中级

团队成员：4职工、5博士后、22研究生

# 探测器课题任务分解

各子课题有多个单位参与研制，分工合作，密切配合

	高能所	科大	清华	华师	交大
硅探测器	芯片设计			流片测试	
时间投影室	样机研制、 测试		读出芯片 设计测试		
电磁量能器	样机研制、 散热研究、 测试	样机研制 电子学设计、 测试			
强子量能器	THGEM单元 研制测试	GEM单元 研制测试			RPC单元 研制测试
契伦科夫探测器		样机研制、 测试			

# 子课题一：硅像素探测器研究目标

**项目研究内容：**设计高分辨、快读出、低功耗CMOS像素探测器芯片

**最终芯片指标：**空间分辨3-5 $\mu\text{m}$ ；积分时间10-100 $\mu\text{s}$ ；功耗 $<100\text{mW}/\text{cm}^2$ 。

## 技术路线：

- 采用高阻、厚外延层CMOS工艺（TowerJazz CIS 0.18 $\mu\text{m}$ ） $\rightarrow$ 提高信噪比；
- 像素内甄别，实现小像素耗尽型CPS设计 $\rightarrow$ 降低功耗；
- 新的读出电路架构（编码）设计和零压缩方法，降低功耗，提高读出速度；
- 优点：空间分辨和功耗。

## 年度计划：

**第一年：**通过调研和比较，确定设计芯片工艺、电荷收集二极管设计方案、前置放大器参数和结构，探索像素阵列新读出结构。 ✓

**第二年：**在所选的工艺上进行MPW流片，测试所选用的工艺，主要测试电荷收集二极管的性能。 ✓

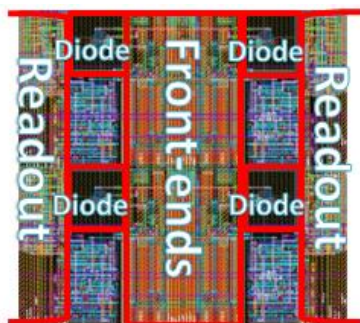
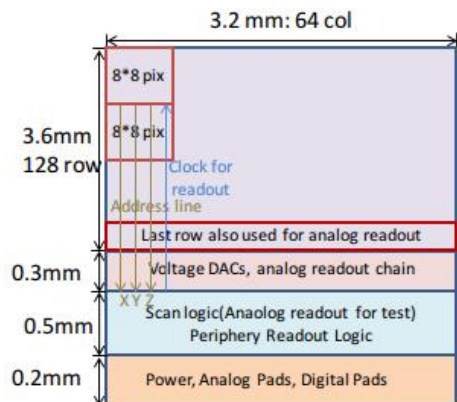
**中期考核指标：**完成第一次芯片设计及流片，提供初步测试报告。 ✓

# 子课题一：主要研究进展

- 确认硅像素芯片研发采用TowerJazz CiS 0.18  $\mu\text{m}$ 四阱工艺，高阻晶圆。
- 2017年5月完成第一版两个不同像素前端及读出电路芯片（JadePix2和MIC4）设计并提交MPW流片，
  - JadePix2探索小像素、高偏置电压以提高信号强度
  - MIC4主要是探索快速、低功耗读出方式
- 每个芯片都有两种像素前端设计作为技术方案比较。
- 2017年底完成芯片生产，目前已完成基本性能测试，初步结果验证了设计目标；设计和测试报告在2018年6月提交给国际评审委员会。
- 整体进度基本符合任务书计划。

# 子课题一：芯片设计

## MIC4 (华师/高能所)



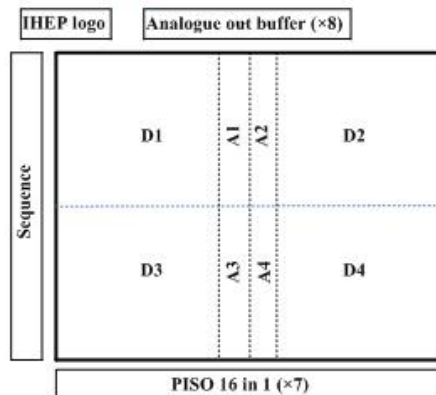
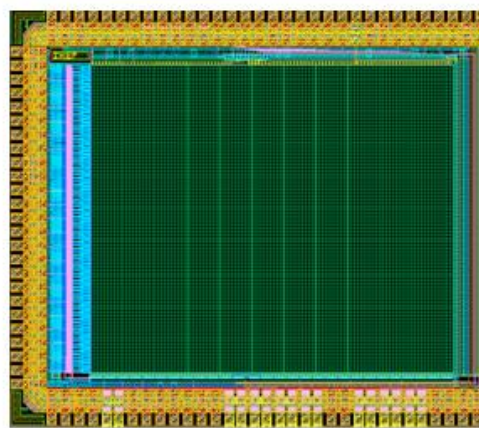
- Design MIC4 (Maps In CCNU)芯片面积: about 14 mm<sup>2</sup>
- 阵列大小: 128 row x 64 col
- 前端电路: 电流比较器
- 触发读出, 非零压缩, 仅读出击位置
- DACs, 偏置
- 衬底可加负偏压至 -8 V

## JadePix2 (高能所)

2<sup>nd</sup> Submission: joint 0.18 um CMOS process MPW submission

with IPHC in May, 2017

- 3 × 3.3 mm<sup>2</sup>;
- 96 × 112 pixels with 8 sub-matrix
- Processing speed: 11.2 μs/frame for 100 ns/row;
- Output data speed: 160 MHz;
- Power: 3.7 μA/pixel;



- 像素尺寸: 25μm\*25μm
- 两种像素前端设计
- 异步读出方式 (data driven) : 快速、低功耗

- 像素尺寸: 22μm\*22μm
- 高偏置电压: 提高信号幅度
- 同步读出方式: 积分时间~11μs

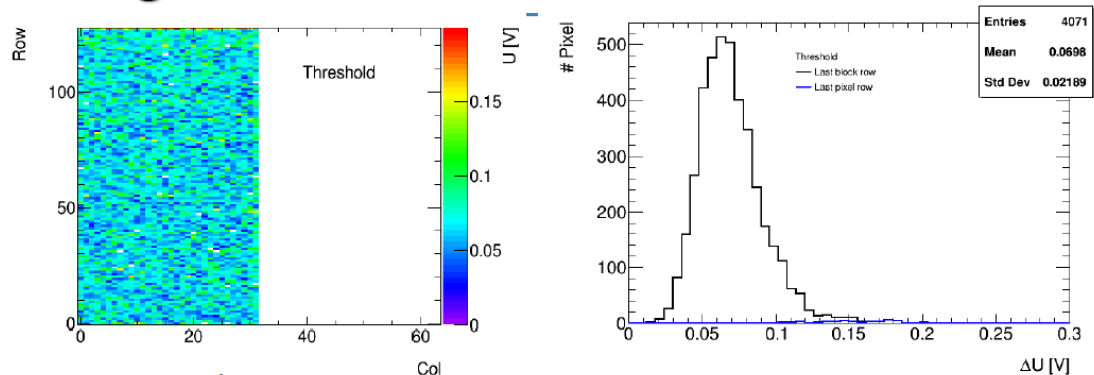
## 亮点:

- 1、首次数字型像素芯片设计;
- 2、MIC4和JadePix2均为目前国际上像素尺寸最小的设计之一。

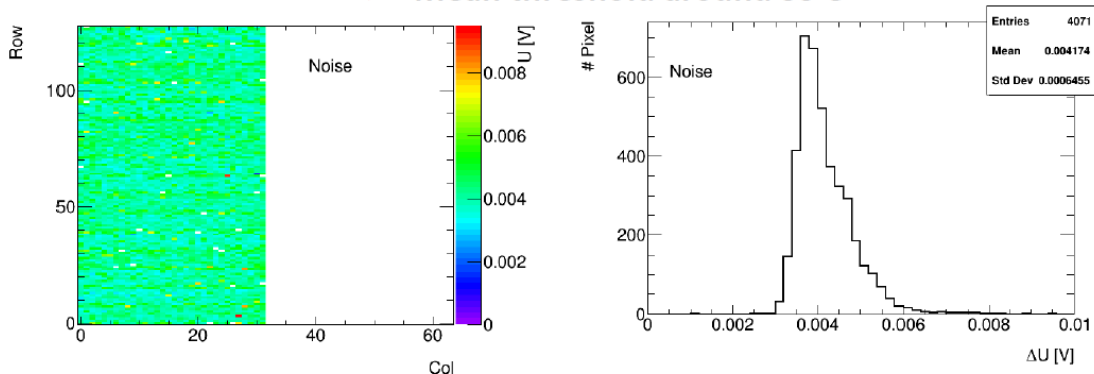
# 子课题一：MIC4测试

- MIC4 芯片包含128行×64列的像素阵列及外围偏置电路和阵列底部实时读出电路模块。
- 各个模块均能正常工作，大部分测试结果符合预期，其通过阵列数字读出进行的S-curve测试结果如图所示。
- 得到阵列的Fix Pattern Noise (FPN)约为31个电子，Temporal Noise(TN)噪声约为6个电子，总的等效电荷噪声约为32个电子。阈值约为100个电子。
- 阈值和噪声水平与预期基本符合。
- 功耗水平可以进一步优化。

## Digital readout test: threshold and noise



- Use 1e- equal 0.7 mV ➤ Mean threshold around 99 e-



- Mean FPN ~ 31 e-, TN around 6 e-

MIC4 阈值和噪声测试结果

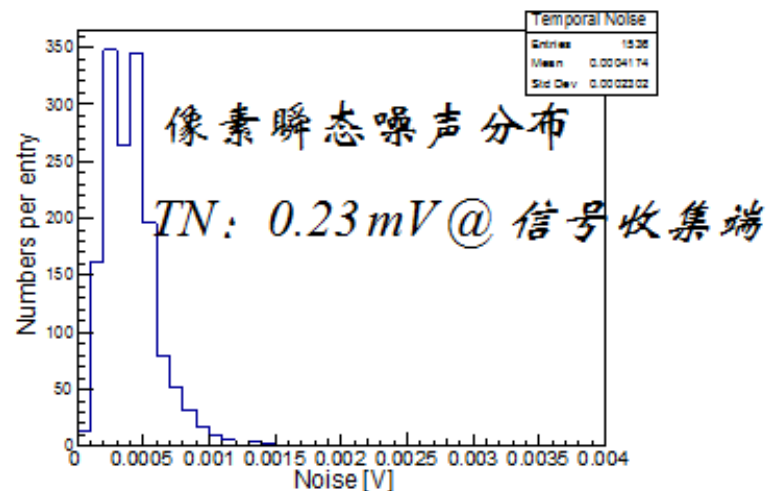
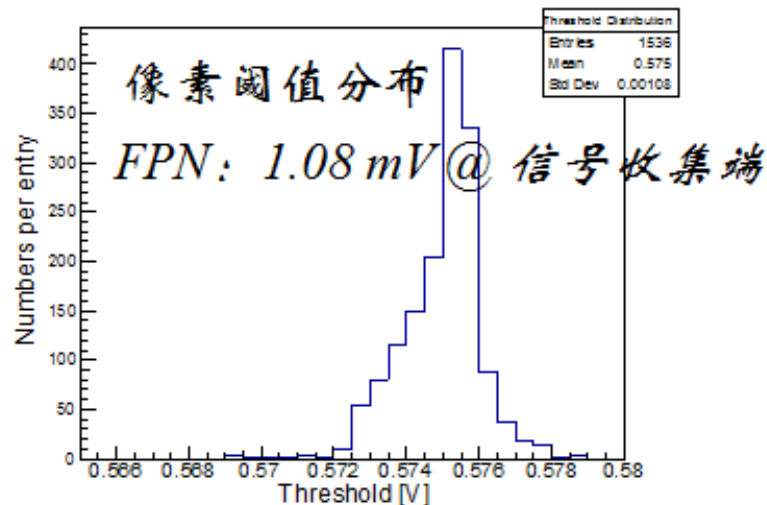


# 子课题一： JadePix2测试

JadePix2测试板



- JadePix2 芯片包含96行×112列像素阵列。
- 两种像素前端：差分放大器和两级单端放大器
- 差分阵列电子学增益和噪声初步测试验证。
- 锁存器响应特性、噪声初步验证。
- 差分阵列的Fix Pattern Noise (FPN)约为29.1个电子，Temporal Noise(TN)噪声约为10.8个电子，总的等效电荷噪声约为31个电子。
- 阈值分布和噪声水平与预期基本符合。
- 测试条件需进一步优化。



# 子课题一：研究团队和成果

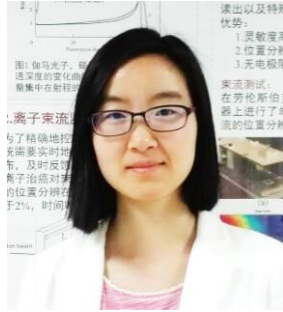
华中师范大学：

高能物理研究所：

专用实验室（软硬件条件）



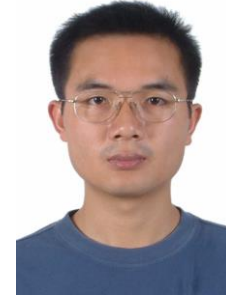
孙向明（教授）



杨华（讲师）



欧阳群（研究员）



卢云鹏（副研究员）



魏微（副研究员）

华中师大：教师3人，研究生4人；高能所：职工6人，博士后1人，研究生1人

人才培养：2018年6月1名博士生、3名硕士生毕业（华中师大）

论文发表、国际会议报告等：

1) 发表一篇SCI论文，An asynchronous data-driven readout prototype for CEPC vertex detector, INT J MOD PHYS A DOI:10.1142/S0217751X17460125

2) A Monolithic Active Pixel Sensor prototype for the CEPC vertex detector, HSTD11& SOIPIX2017, 日本冲绳，即将在 NIMA发表

3) Development of highly compact digital pixels for the vertex detector of the future e+e-collider, HSTD11& SOIPIX2017, 日本冲绳，即将在 NIMA发表

4) Development of the Silicon Tracker for CEPC, ICHEP 2018, 韩国首尔，分会口头报告

# 子课题一：国际评审

2018年6月16日

评审专家：M.Winter, Ch. Hu (法国Strasbourg), W.Snoeys (CERN),  
F.Tang (Chicago), M.Wang (山大), Y.Zheng (国科大)

送审材料：5份书面报告（设计和测试文档）

现场报告：

1. Brief introduction of silicon pixel R&D for MOST-CEPC project, 欧阳群
2. MIC4 design and test report, 杨苹
3. JadePix2 design and test report, 周扬

**评审报告结论：** MIC4和JadePix2是两种指标互补的设计，都采用了当前最先进的技术。项目组原型芯片研究目标与项目要求保持一致，并取得良好的进展。

The requirements of a vertex detector at CEPC are addressed with an appropriate pixel technology (CMOS pixel sensors), relying on a well suited CMOS foundry and undertaken by designers which have built up a comprehensive expertise of low power and low noise CMOS micro-circuits. The two architectures developed via the MIC4 and JadePix2 prototypes are complementary and exploit achievements from state-of-the-art operational devices. The teams involved have progressed well and are on good track to produce a sensor prototype complying with the present project requirements. The project looks therefore secured enough but a global view providing milestones and hierarchised objectives is still missing.

# 子课题一：下一步研究计划和目标

**2018年年中 – 2019年年初：**

- 完成对目前两块芯片MIC4和JadePix2的测试，包括信号收集级的响应特性，各部分电子学的性能和功耗，以及放射源测试。
- 结合MIC4和JadePix2芯片的特点，设计第二版芯片并流片；设计目标是保证较低功耗的前提下，同时实现芯片空间分辨和积分时间两方面的进一步优化。

**措施：加强两单位设计队伍之间的协调，集中力量完成一个芯片设计。**

**2019年初 – 2019年底：**确立整体芯片的设计方案，在综合各项指标的前提下，重点保证空间分辨及芯片全功能，完成工程批流片。

完善和优化当前使用的测试系统，目标是缩短芯片测试周期。

**措施：利用合作单位力量，增加电子学方面专业人员。**

**2020年初 – 2021年中：**完成最终的芯片详细测试，验证各项设计指标，形成完整的设计和测试文档。

# 子课题一：下一步研究计划和目标（续）

\*国际评审专家建议，下一次芯片设计需要整合为一个。

方案考虑：

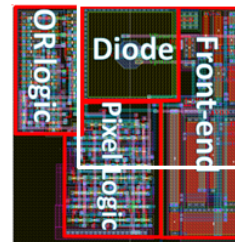
1、ALPIDE前端+Token-ring读出

2、ALPIDE前端+Rolling-shutter读出

目标：结合MIC4和JadePix2芯片的各自优势特点，像素尺寸大约为20-25  $\mu\text{m}$ 范围，实现单一芯片设计达到本项目的综合指标。

## Proposal for next submission

- Plan A: Alpide front-end + Token-ring
  - CSA design by Ying Zhang
  - MIC4的Diode+FE+OR logic是个很好的估计
  - Readout time limited by the token-ring delay



- Plan B: Alpide front-end + Rolling-shutter
  - Simplified readout sequence
  - In parallel with 3D integration study that will hopefully enable data-driven readout on the second tier for digital parts.

# 子课题二：时间投影室研究目标

## 研究目标：

针对CEPC物理要求，研发低功耗读出电子学、连续正离子抑制型读出模块，及高分辨时间投影室TPC原型机并进行磁场测试。

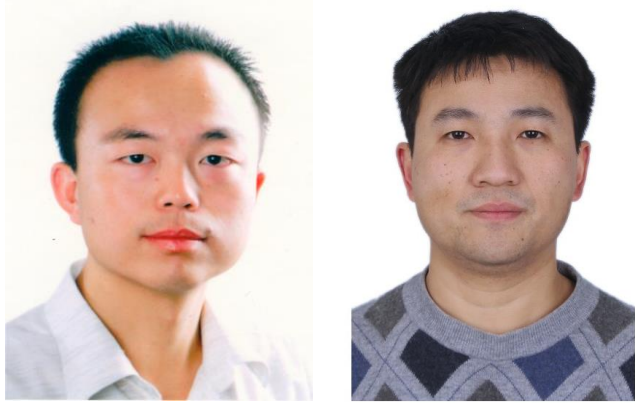
## 考核指标：

- 研制一套连续正离子反馈抑制读出模块的TPC原型机
- 位置分辨率:  $100\mu\text{m}$
- 连续正离子抑制:  $\sim 0.1\%$
- 单颗芯片集成16通道，功耗:  $5\text{mW}/\text{通道}$

## 研究内容：

采用先进工艺研发波形采样的低功耗读出电子学芯片，面向环形对撞束特有的连续束流时间结构特点，研制连续正离子抑制型读出模块。重点是采用该模块在1.0T磁场中实现位置分辨率 $100\mu\text{m}$ 的设计指标。

# 子课题二：研究团队和进度安排



高能所祁辉荣（副研）：高分辨正离子抑制型TPC研制

清华大学邓智（副教授）：TPC低功耗读出电子学研究

已经投入人员：

探测器博士生2人：张余炼，王海云

电子学博士生2人：刘丰，赵馨远

## 进度安排

第一年：模拟研究主要涉设计参量，探测器整体设计，低功耗电子学模拟、设计，完成主要设备器件采购。

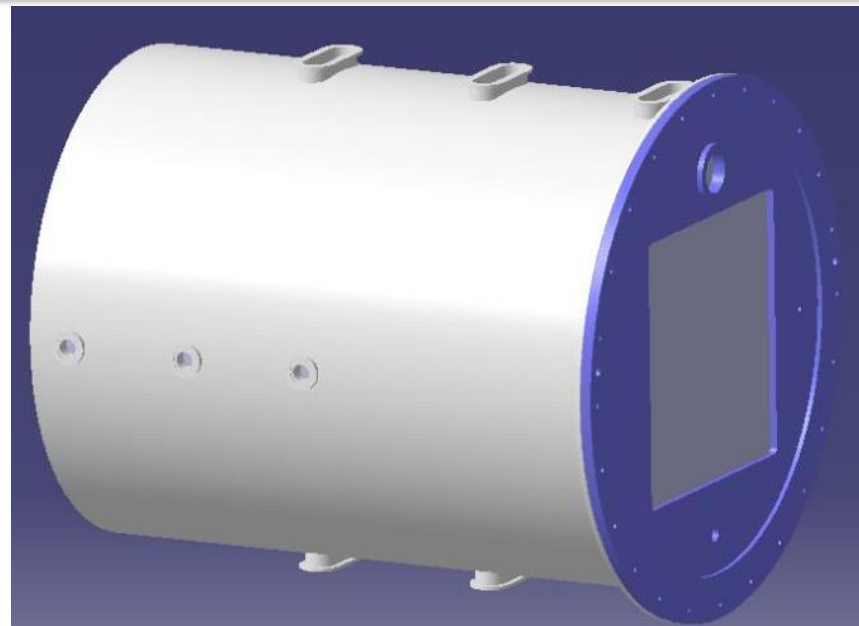
第二年：电子学芯片设计定型，开始制作和流片。

**中期目标：确定芯片电路设计方案，测试读出模块，完成项目方案评估。**

# 子课题二：原型机进展

## TPC原型机研制进展:

- 面向 $100\mu\text{m}$ 高位置分辨的探测需求，实现模块对位、增益、漂移速度等随时间的变化的标定刻度，解决环形对撞机中探测难点
- 266nm激光实现正离子反馈时径迹畸变测量分束42束激光  
@ $0.85\text{mm} \times 0.85\text{mm}$
- 漂移长度: **510mm**
- 读出面积:  $200\text{mm} \times 200\text{mm}$
- 完成了TPC原型机关键设计，部件正在加工
- 完成分光器件加工及验收
- 创新实现UV灯照射产生均匀电子团，结合紫外激光共同实现径迹畸变测量



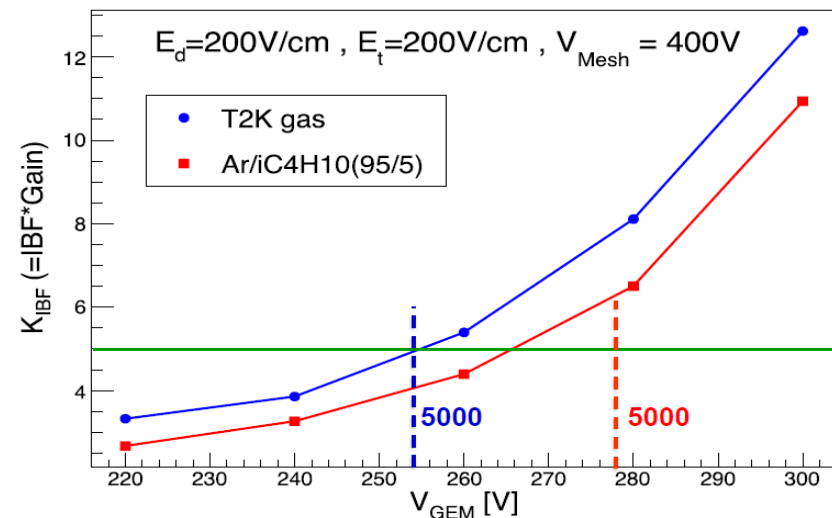
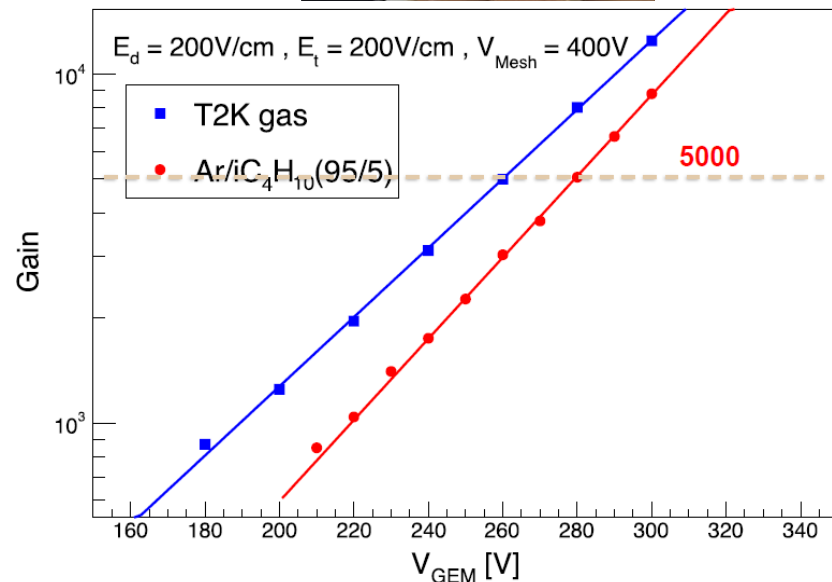


# 子课题二： 测试进展



## 主要难点和解决的问题：（已完成）

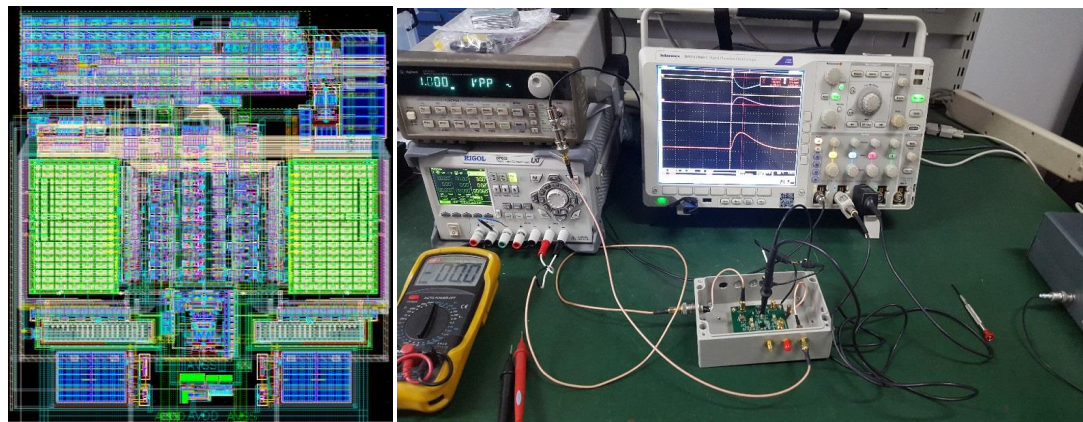
- 实现连续正离子有效抑制，长时间无打火的稳定工作
- 设计制作100mm的探测器，利用X光机进行高剂量下的正离子反馈测试，**实现 ~ 0.01% 的IBF @ Gain = 5000**
- 优化测量了漂移电场下的反馈电流以及电子透过率，优化微网（完成）
- 与ALICE TPC进行了对比研究，本IBF测试电流值未达到空间电荷积累阈值，确认了空间电荷效应未对IBF值产生影响。
- 设计了满足LCTPC束流测量的探测器模块和原型机，准备束流测试



# 子课题二：课题执行情况-读出芯片

## 电子学芯片研制进展：

- 工艺选择：TSMC-65nm
- 单通道芯片的基本结构
- 关键电路单元的结构
  - 模拟前端：CSA+CR-RC
  - SAR-ADC, 两级缓存
- ADC的线性和精度基本达到设计要求：
  - 在采样率为50MS/s时积分非线性小于0.6LSB
  - 有效比特数约为9.17bit
  - 核心电路功耗为1mW/ch
  - 其他电路的功耗是固定的，不随通道数增加而增加。

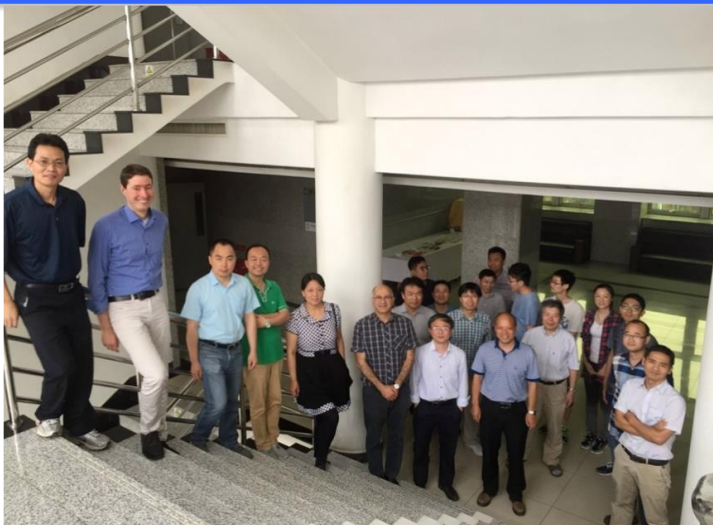


	Specifications	Test Results
Sampling rate	40 MSPS	50 MSPS
Resolution	10 bit	10 bit
INL	<0.65 LSB	<0.5 LSB
DNL	<0.6 LSB	<0.5 LSB
ENOB	>9 bit	9.18 bit
Power consumption	<2.5 mW/ch	1 mW/ch

# 子课题二：课题执行情况-总体情况

- 探测器与芯片研制两方面均按照计划执行，全部实现了中期目标
  - TPC模块实现了正离子反馈测试目标
  - 基于模块设计和研制了TPC测试原型机
  - 完成低功耗ASIC 芯片的设计与测试
  - 发表SCI文章3篇（中期目标：2篇论文）
- Y.L. Zhang; H.R. Qi; Z.W. Wen, Spatial resolution measurement of TripleGEM detector and diffraction imaging test at synchrotron radiation, JINST\_024P\_0217
- Y.L. Zhang; H.R. Qi; Gain measurement and simulation of GEM with a hybrid structure Acta Phys. Sin. CPC, 2017.04,1609.0801
- Zhang Yu-Lian; Qi Hui-Rong; Hu Bi-Tao, Measurement and simulation of the hybrid structure gaseous detector gain, Acta Physica Sinica, 66, 142901 (2017)

# 子课题二： 国际专家评估报告



## 国际评估专家 列表 (4+3)

### Members of the International Review Committee:

Ron Settles (MPI, Germany).  
Roy Aleksan (Saclay, France)  
Akira Sugiyama (SAGAU, Japan)  
Ye Jingbo (SMU, USA).  
Li Yulan (THU, China).  
Li Xiaomei (CIAE, China)  
Zhu Chengguang (SDU, China).

### Signature of International Review Committee:

### Item 4: Overall detector R&D performance in the past two years ?

Answer: ⑤ ✓

- 国际评估结果对于过去的工作正面肯定
- 对于模块和原型机提出尽快完成束流测试验证的建议

The past two years of R&D have been impressive and the test results are very promising. Prototype chamber and prototype electronics have been built and are under test. One should study the use of the laser system to correct for distortions. It will be necessary to measure the point resolution with the GEM-MM concept, without and with magnetic field. For this, particle tracks are needed, from test beam if available, or from cosmic rays.

In the first two years of study, the group has designed and verified the main principles of the techniques used in the TPC of the CEPC. In summary, project is progressing well. A further study of the position resolution, radiation test of electronics, larger scale prototype should be approved in the future. The organization of the man power sounds reasonable for carrying out the whole project for future studies.

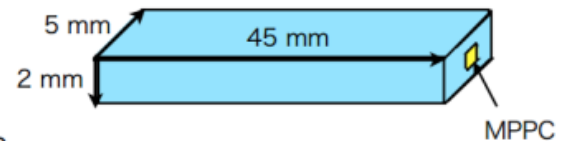
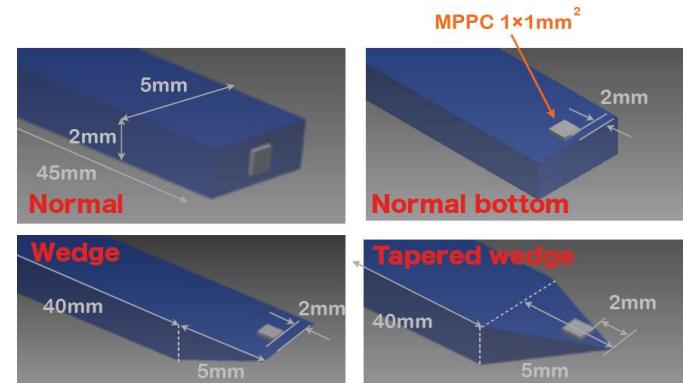
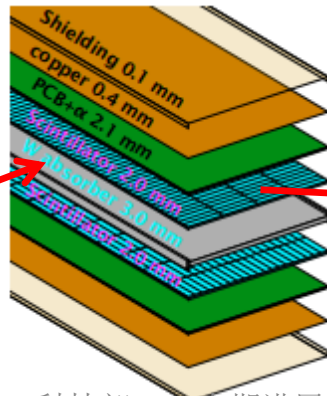
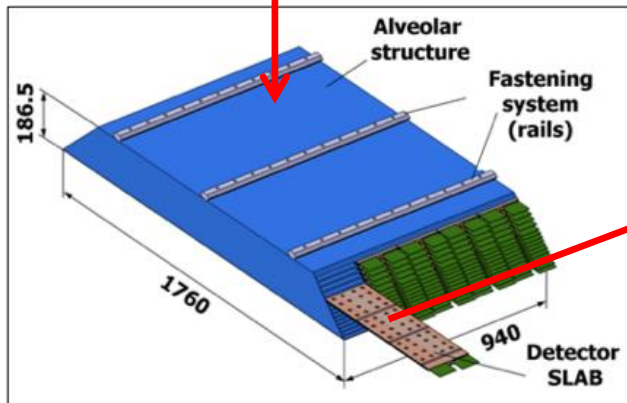
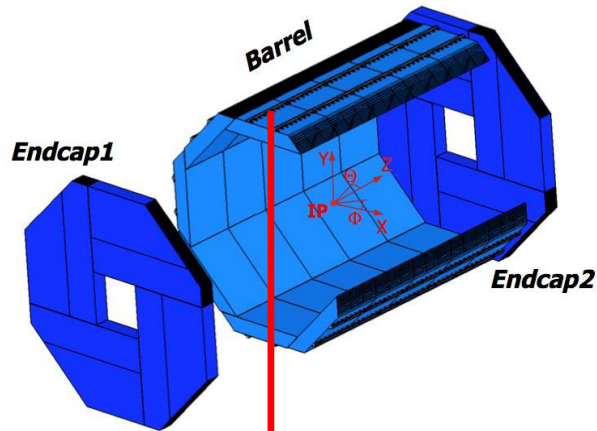
## 子课题二：下一步研究计划

- 面向连续正离子反馈的TPC模块 研制达到预期目标 ( $\sim 0.1\% \text{IBF}$ )，下一步将开展探测器模块和原型机的工作电场和工作电压优化测试
- TPC原型机设计已经完成，下一步将进入集成模块安装和调试阶段。根据国际评估专家组建议：尽快开展探测器原型机的束流测试性能实验研究
- TPC ASIC芯片的研制达到预期 ( $\sim 1\text{mW/ch}$ )，还缺少数字信号处理和压缩的电路模块，下一步将开展该研究工作。根据国际评估专家组建议：积极与国际相关ASIC芯片研究组开展交流与合作

# 子课题三：电磁量能器研究目标

## 研究目标和考核指标：

- (1) 解决基于SiPM读出电磁量能器的技术选型问题；
- (2) 实现电磁量能器读出单元颗粒度达到  $5 \times 5 \text{ mm}^2$ ；
- (3) 研制小型电磁量能器原理样机；
- (4) 针对CEPC的特点，研制一套基于两相二氧化碳制冷的主动散热系统，在  $-20^\circ\text{C}$  下，导热量大于  $30 \text{ mW/cm}^2$ ；
- (5) 发表2-3篇论文。



基于塑料闪烁体和  
硅光电探测器

# 子课题三：中期进度安排

- 2016.7 – 2018.6期间的科研任务

任务 3- 量 能 器	<p>在完成ECAL技术选型的基础上，开展原理样机研制，研制部分样机读出单元。进行样机支撑结构设计；研制散热系统。</p>	完成设计选型；探测器初步设计报告
	<p>对RPC的单元模块设计进行数值模拟和参数优化，提供初步的模拟和优化结果；</p> <p>完成 THGEM 的研制设备采购，测试完成结构改造后的 20cm×20cm THGEM 探测器的各项性能；</p> <p>大面积 GEM 探测器制作工艺研究，高颗粒度 GEM 读出电子学的设计。基本确定大面积 GEM 探测器制作的各项具体工艺以及读出电子学的设计方案。</p>	完成设计选型；探测器初步测试报告
任务 4-契伦科夫探测器：	试制不同结构的 THGEM+Micromegas 混合型微结构气体探测器，并测试探测器主要性能，得到能够独立工作的单光子灵敏探测器。	完成设计选型；探测器初步测试报告

# 子课题三：中期课题完成情况

## 电磁量能器预研完成情况：√

- ✓ ECAL技术选型基本完成，改进塑料闪烁体与SiPM耦合方式；
- ✓ 单层样机的电路板已经投板，调试完毕供宇宙线测试；
- ✓ 灵敏单元（闪烁体，SiPM）与读出电路板的联合调试已经完毕；
- ✓ 基本完成单层样机所需的SiPM及电源模块器件采购；
- ✓ 散热系统开展了结构与散热片设计。

## 主要进展：

- ✓ 改进塑闪与SiPM耦合方式，显著降低光输出不均匀性30% → ~15%，MIP光电子数>15
- ✓ 开展了ScW-ECAL探测器整体性能模拟

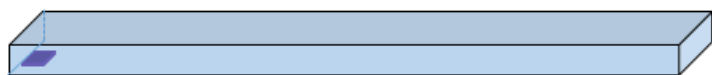
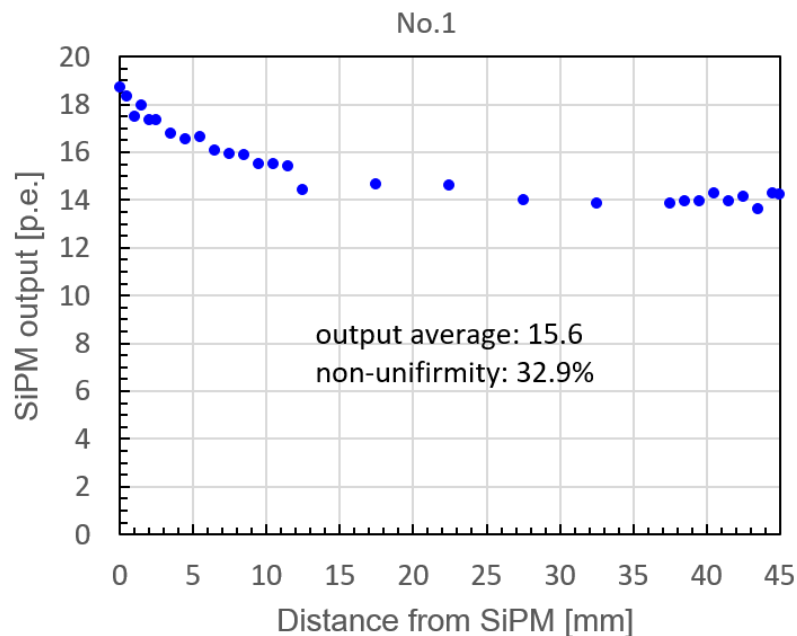
**技术难点：**闪烁体的加工工艺问题，已与上海硅酸盐所开展合作；制冷系统耐压要求极高，国内技术力量薄弱，学生已毕业

**解决途径：**加强与协作厂家合作，共同攻关



# 亮点：塑闪与SiPM耦合方式改进

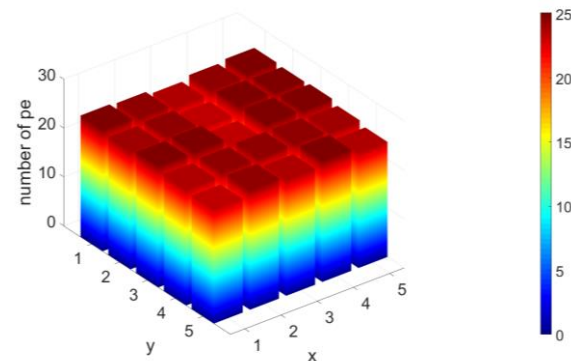
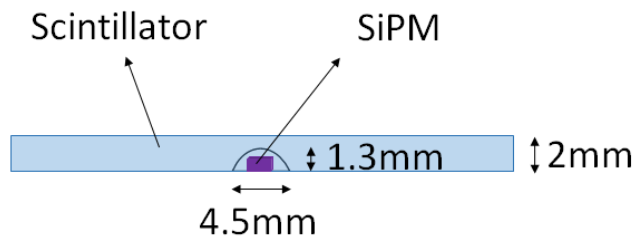
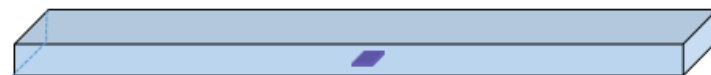
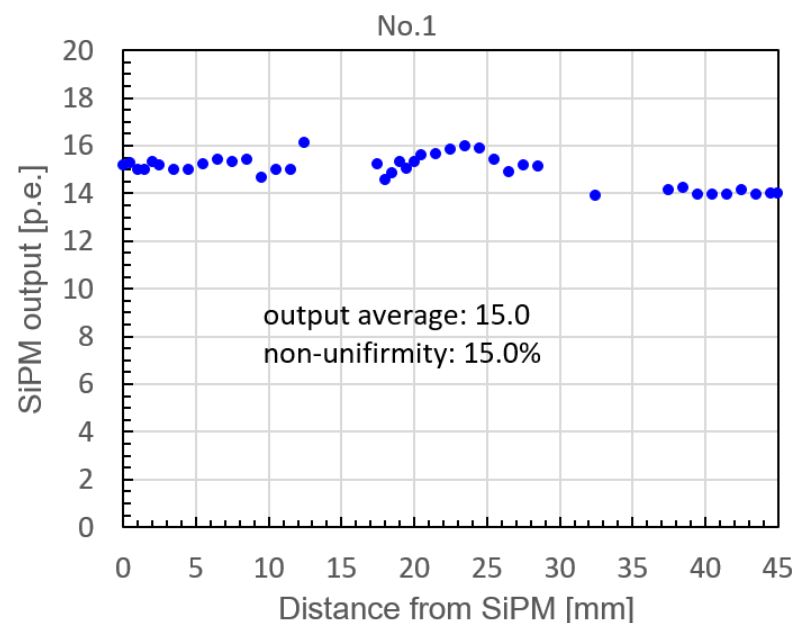
## ➤ 塑料闪烁体性能测试和结构优化（高能所）



10  $\mu\text{m}$  pitch SiPM

- Output:  $\sim 16$  p.e.
- Non-uniformity:  $\sim 30\% \rightarrow 15\%$

2018/8/7



# 子课题三：电子学板设计和测试平台

科大电子学读出板设计和制作；  
LED测试系统搭建用于SiPM动态范围测试

FEB



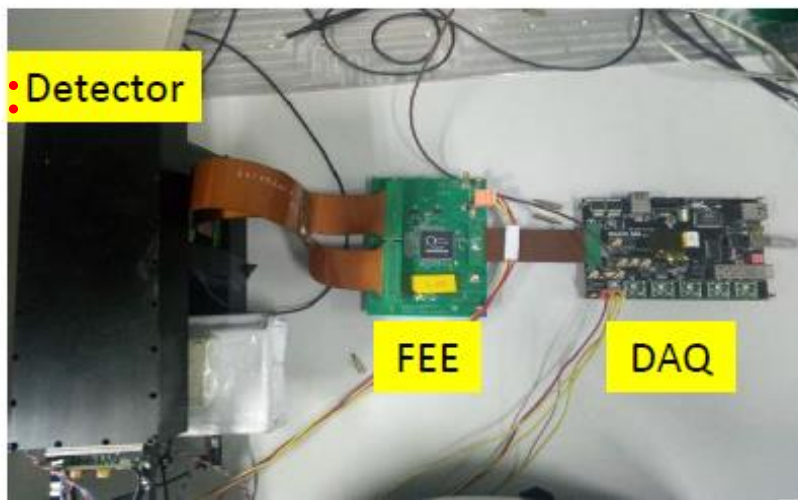
DIF



Test Platform

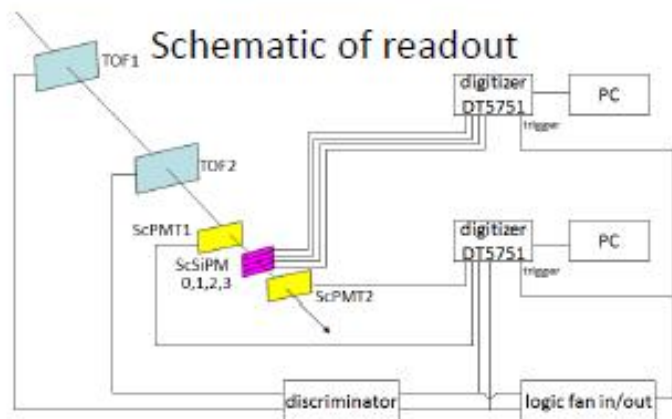


宇宙线测试平台  
- 电子学刻度  
- SiPM与不同闪烁体耦合，和SPIROC联调测量宇宙线



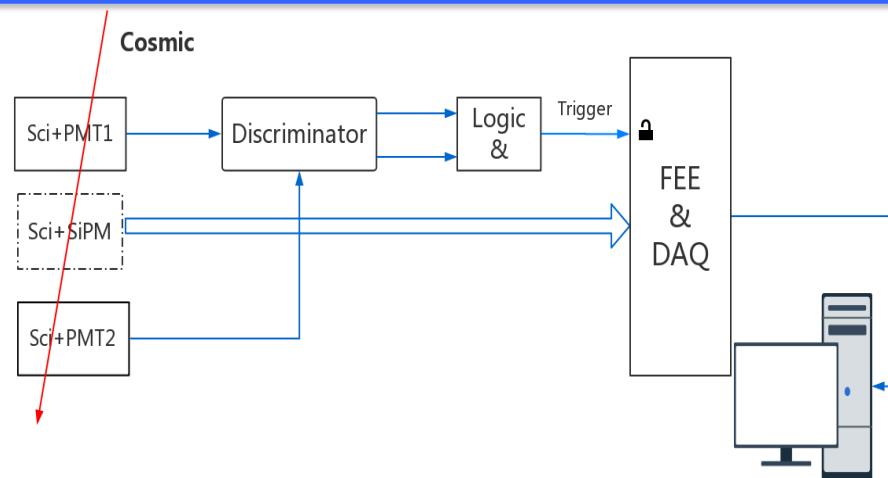
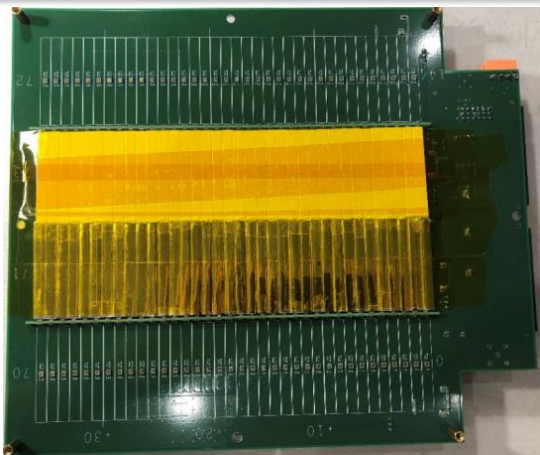
# 子课题三：塑闪+SiPM单元模块束流测试

## ➤ Proton/Pion beam test of a mini Prototype (IHEP)



- To study the layout and the coupling mode of the scintillator and SiPM, a mini prototype was constructed and tested by test beam
- Carried out at E3 beam at IHEP in June 2017, Proton and pion mixed irradiation, the momentum of the particles are from 400MeV to 1.1GeV

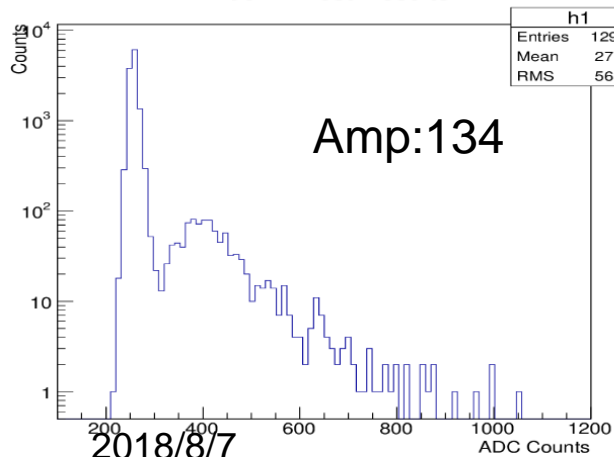
# 子课题三：宇宙线测试结果



研制了**ECAL**读出电子学并进行了详细测试，结果表明**MIP**信号可以与本底清晰的分开，对读出电子学的性能进行了验证。

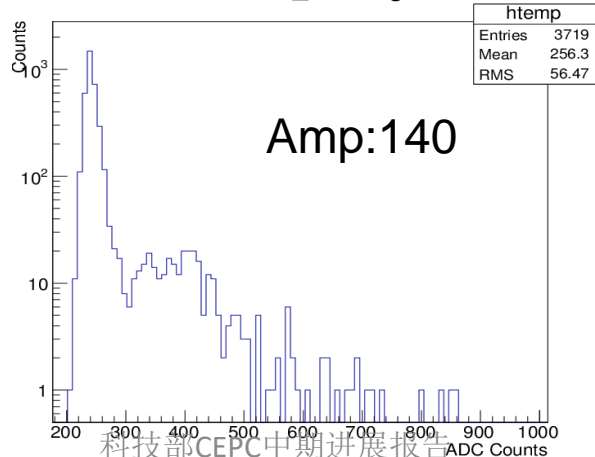
## EJ200

Johnm Test Results



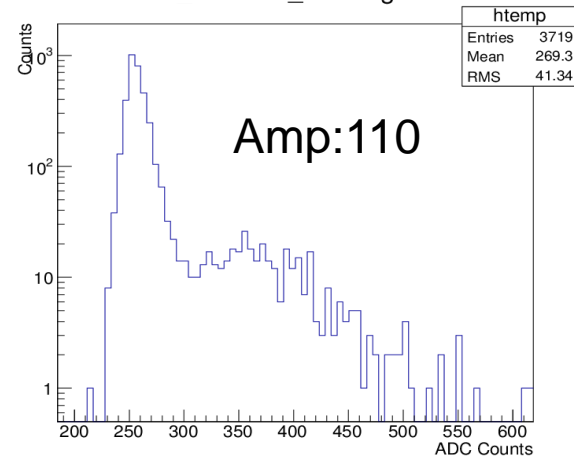
## BC408

annel\_9.Chargers



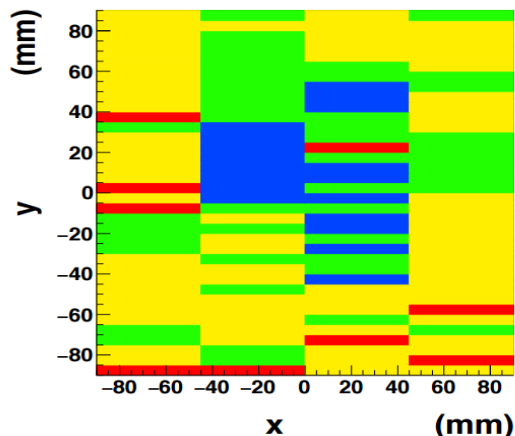
## BGO

hannel\_7.Chargers

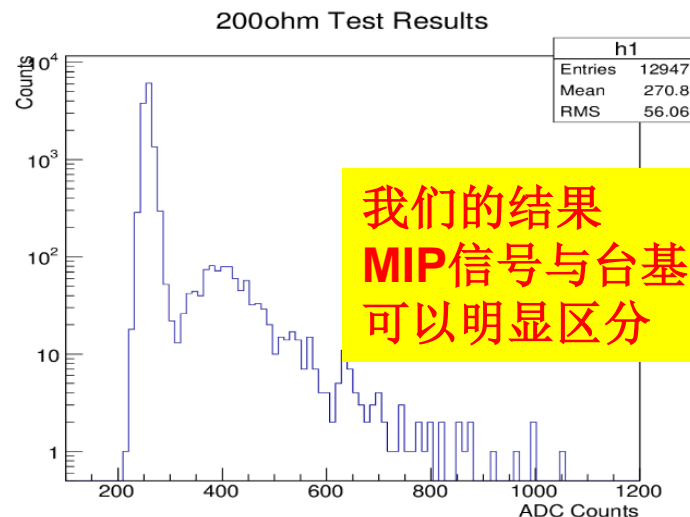


# 亮点工作：宇宙线测试结果

- CEPC ECAL 读出电子学可以有效的将MIP信号与台阶分开。
- 相比于CALICE-EBU ECAL效果更好!

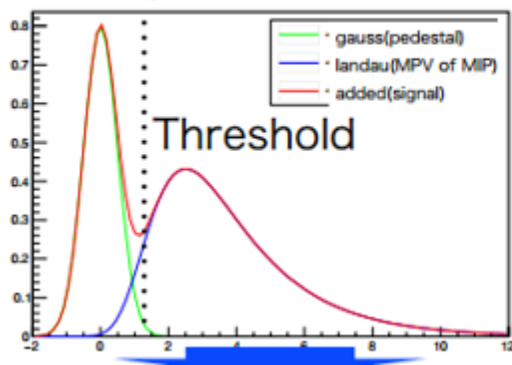


- MIP peak identified
  - 18 ch (12.5%)
- Shoulder found
  - 45 ch (31.25%)
- Tale only
  - 72 ch (50.00%)
- Dead or noisy channel
  - 9 ch (6.25%)

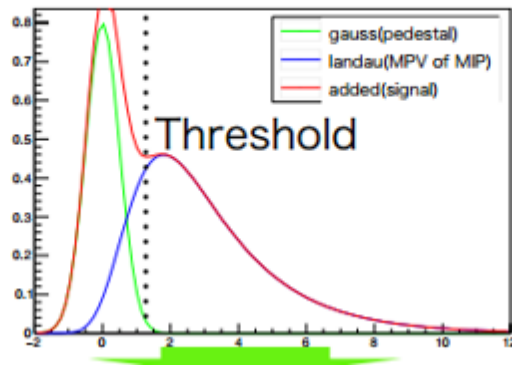


- Peak identified channels are only 12.5%.  
MIP peak identification with 10k pixel MPPC is not easy.

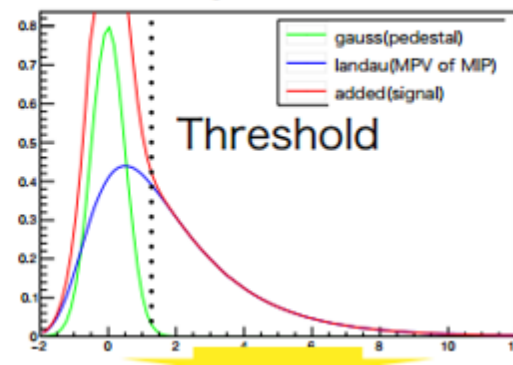
MIP peak identified



MIP shoulder found



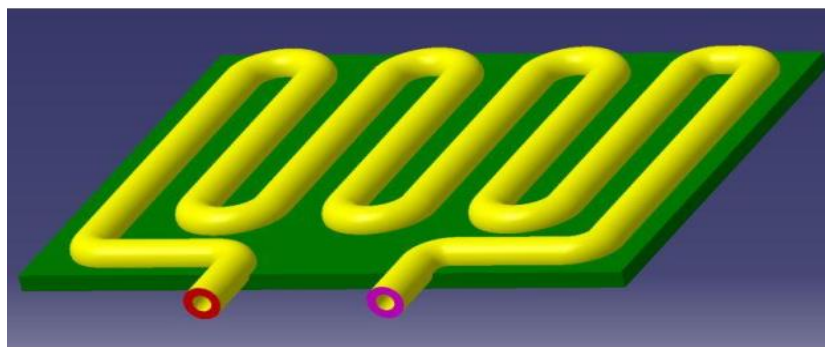
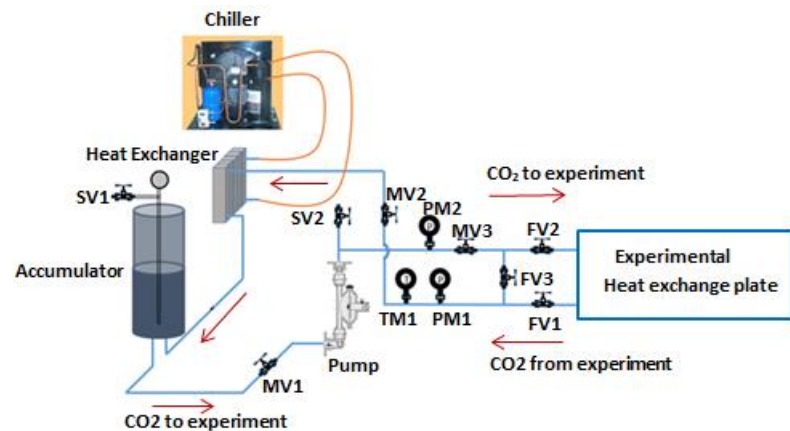
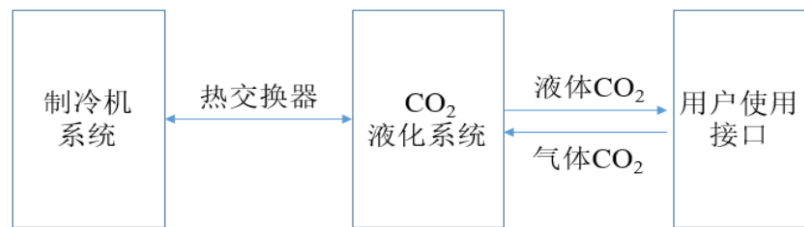
Only MIP tale



# 主动散热系统：初步设计方案

→ 制冷系统主要分为三部分，分别是制冷机系统、CO<sub>2</sub>液化系统和用户使用接口。

→ 完成了制冷系统以及散热片的设计与研制，进行了初步性能测试，表明系统可以正常工作。



CO<sub>2</sub>制冷循环系统的结构设计

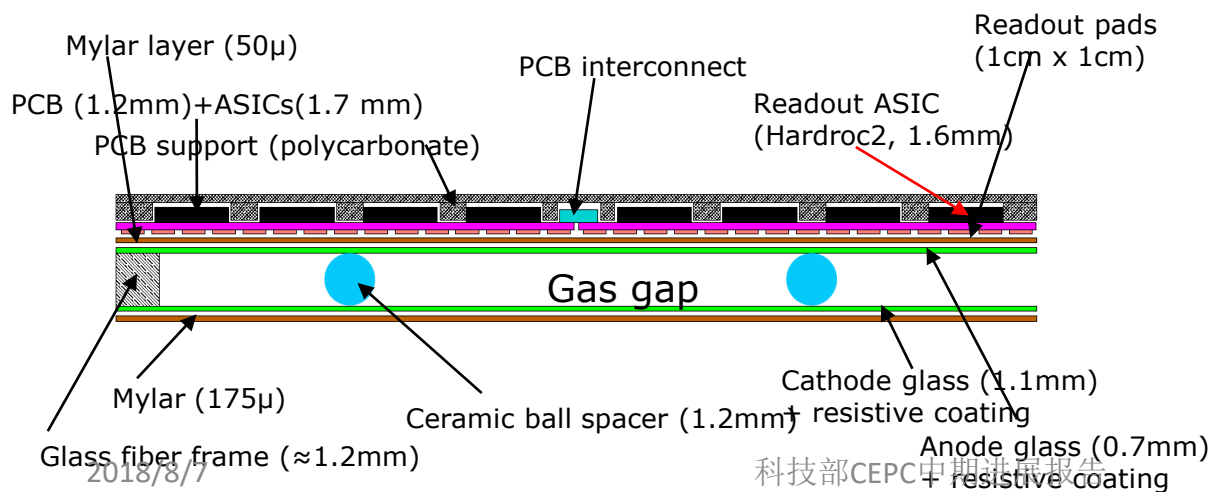
直径2-3mm的毛细铜管弯曲成Z字形，铜管嵌入到3mm厚的铜片，实现大面积散热片制作。

# 子课题三：强子量能器研究目标

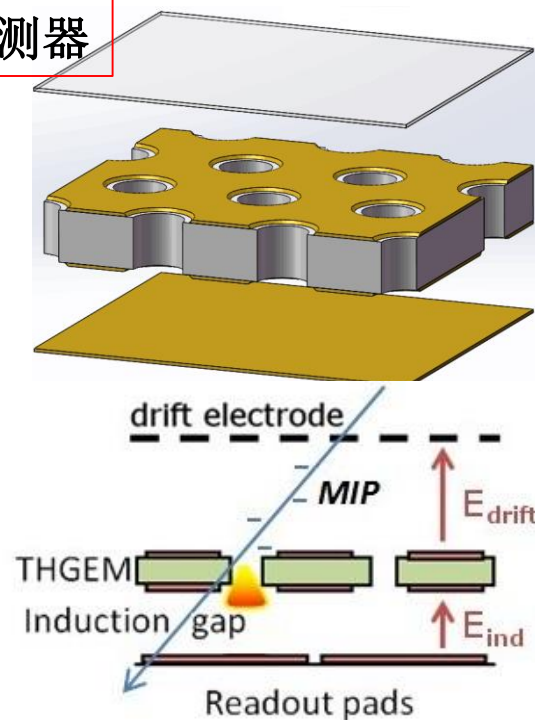
## 研究目标和考核指标：

1. 得到数字强子量能器的技术选型；
2. 在颗粒度达到 $1 \times 1 \text{cm}^2$ 条件下，掌握厚度小于6mm的气体探测器制作工艺；
3. 制作面积达到 $1 \text{m} \times 0.5 \text{m}$ 的微孔型探测器单元模型，探测器的整体增益均匀性好于20%，计数率达到 $1 \text{MHz/s}$ ，探测效率好于95%；
4. 制作面积 $1 \text{m} \times 1 \text{m}$ 的平板型探测器单元模型，探测效率好于95%；
5. 发表2-3篇论文。

RPC平板型探测器

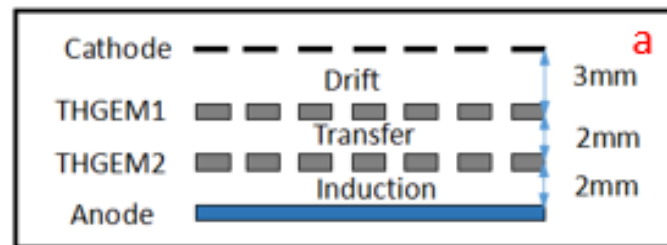


微孔型探测器

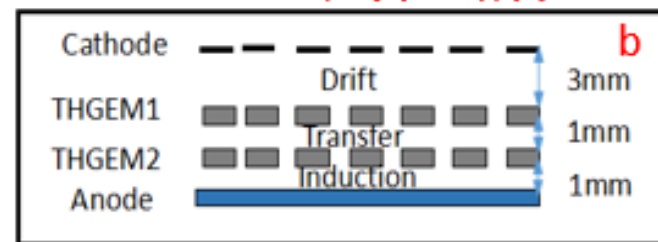


# 子课题三：强子量能器进展-THGEM

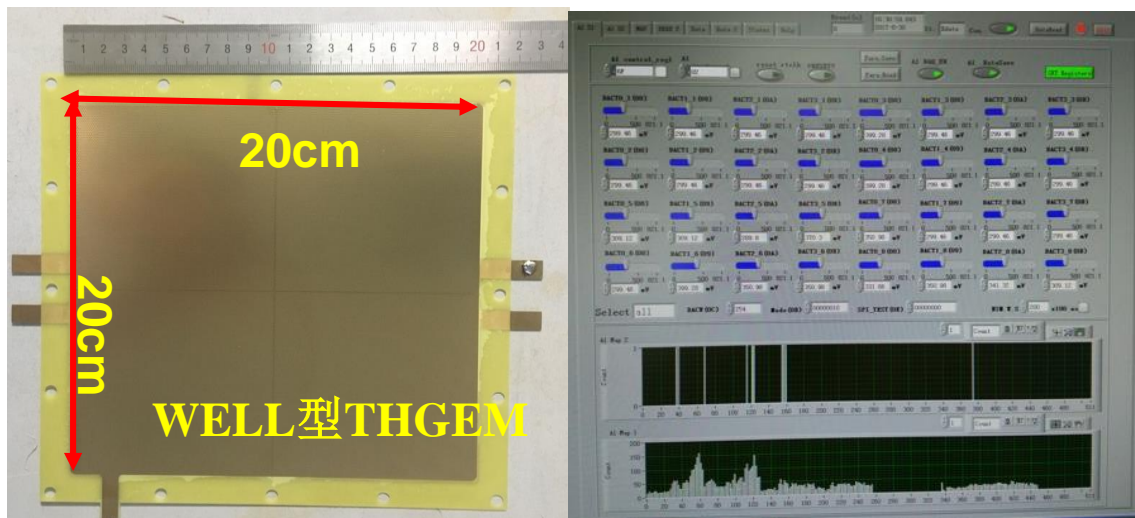
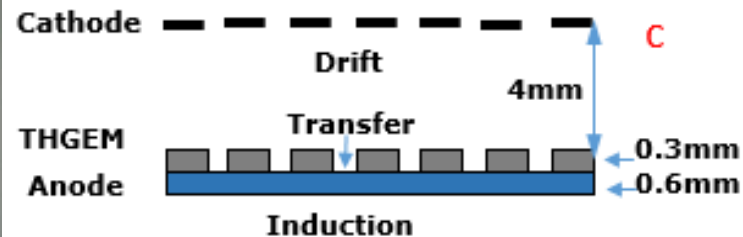
- 为了减少THGEM探测器厚度，结构改进两次；
- 采用WELL-THGEM结构，厚度达到6mm的要求；
- 完成第一个WELL-THGEM探测器的制作和测试。
- 完成ASIC (Gastone) 电子学模块制作和测试
- 软件多路读出，能获取WELL-THGEM探测器信号，需要进一步调试。



原THGEM探测器结构

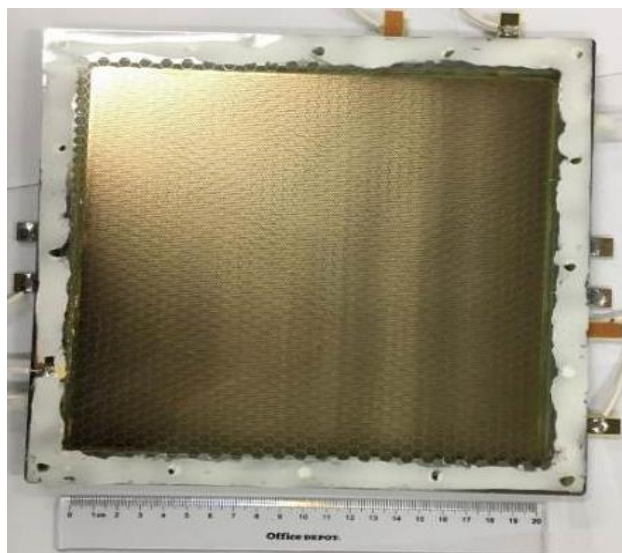


改进型THGEM探测器结构

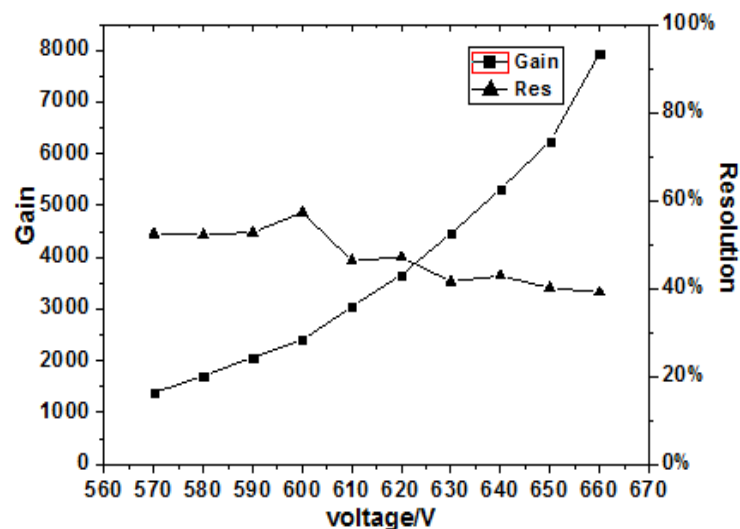




# 子课题三：强子量能器进展-THGEM



WELL型20cm x 20cm-THGEM的结构  
总体厚度小于6mm



Ne+iC<sub>4</sub>H<sub>10</sub>混合气体  
WELL-THGEM Gain 曲线

- 通过对两种混合气体在WELL-THGEM探测器的对比，发现采用(Ne+iC<sub>4</sub>H<sub>10</sub>)混合气的性能明显好于97(Ar):3(iC<sub>4</sub>H<sub>10</sub>)混合气的性能；
- 采用(Ne+iC<sub>4</sub>H<sub>10</sub>)混合气作为工作气体，WELL-THGEM探测器的增益能达到8000倍，明显好于97(Ar):3(iC<sub>4</sub>H<sub>10</sub>)混合气的1700倍；

# 子课题三：强子量能器进展-RPC

- 采用玻璃RPC结构，气体间隙1.2mm，加玻璃板后厚度为3mm。如果把电子学读出板和PCB都封装，探测器总厚度为6mm；

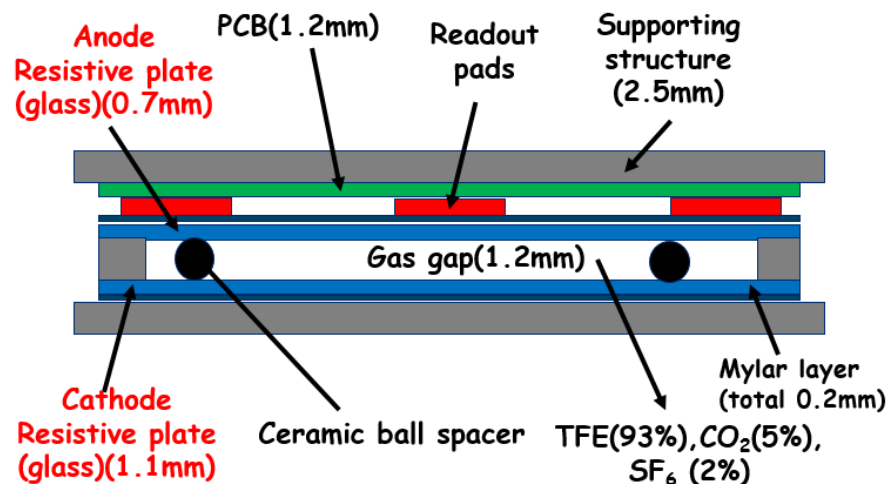
( $0.12\lambda_I, 1.14X_0$ )

Stainless steel Absorber(15mm)

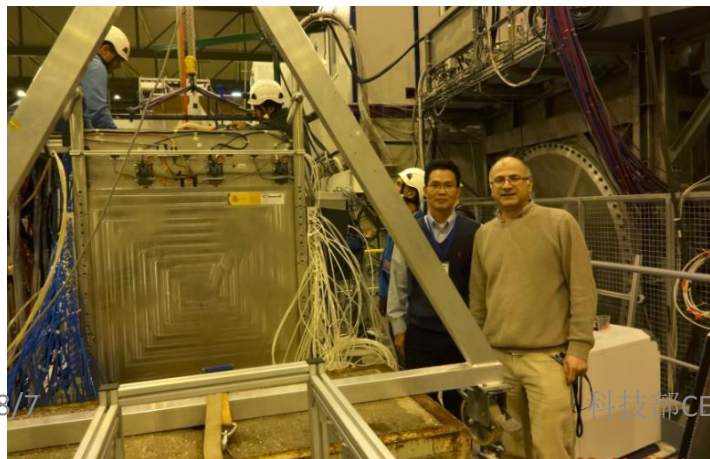
Stainless steel wall(2.5mm)

GRPC(6mm  $\approx 0.12\lambda_I, X_0$ )

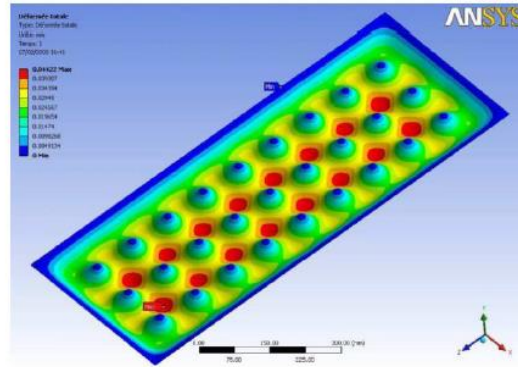
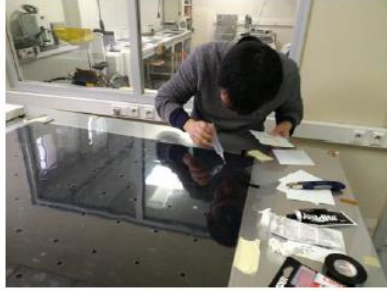
Stainless steel wall(2.5mm)



ASIC HARDROC(64ch), three-threshold

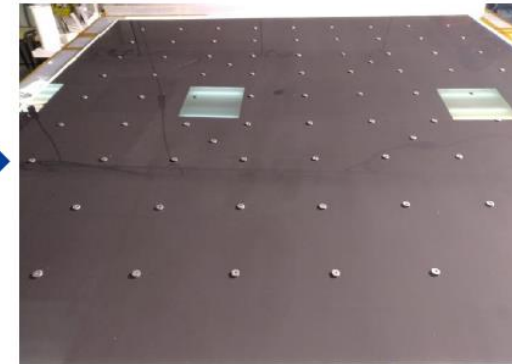
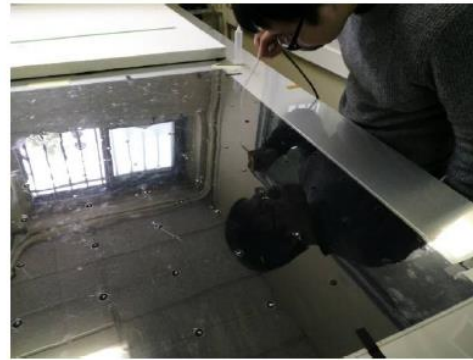


# 子课题三：强子量能器进展-RPC制作

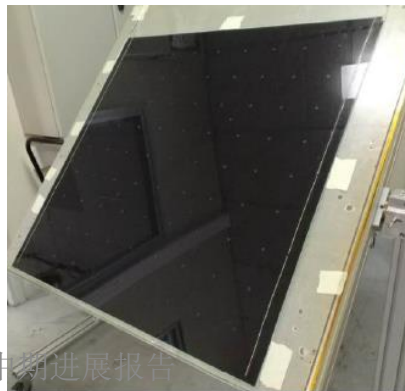
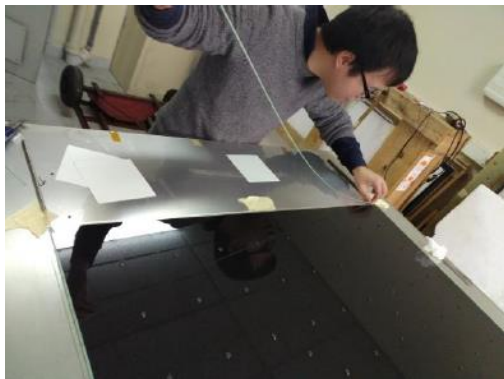


The maximum deformation is about 44 microns

Place spacers



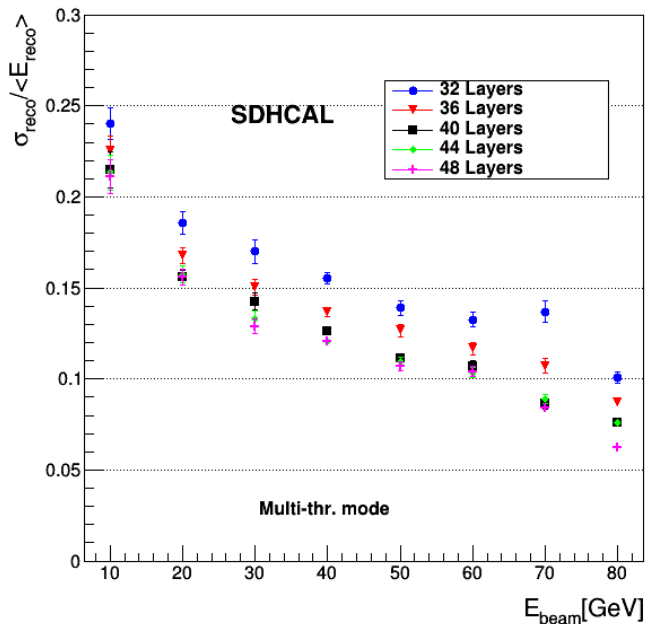
Sealing chambers



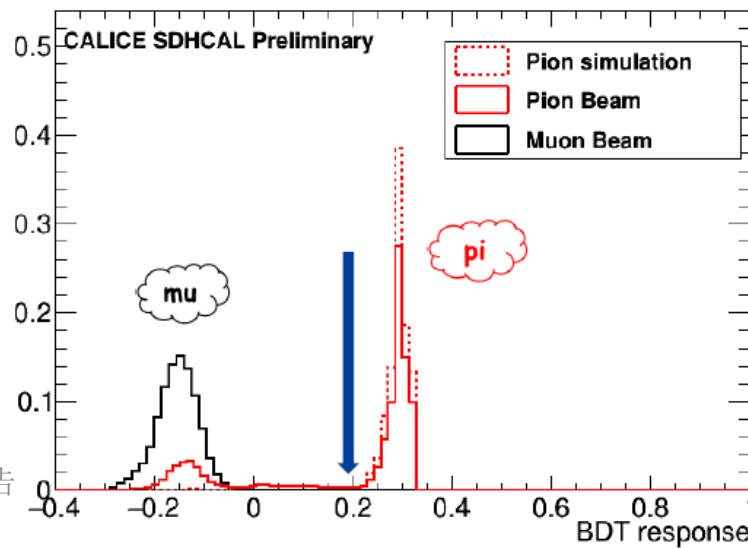
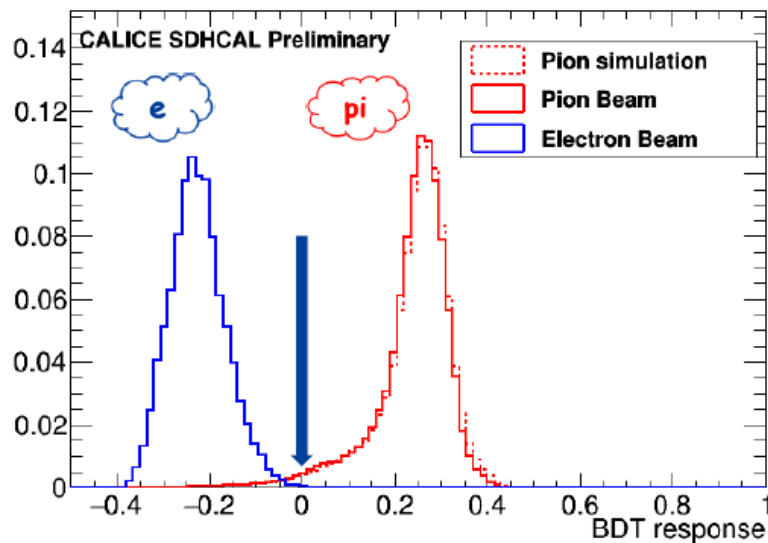
Gas can arrive at almost all point in 5s using LMA (Least Mean Age) model

# 子课题三：强子量能器进展-RPC

→ 2017年3月上海交大正式加入CALICE合作组，分析2015年在CERN SPS SDHCAL束流测试数据，用BDT多变量方法提高pion, muon和电子的鉴别效率，提纯强子束流中的pion，发表一篇CALICE Analysis Note (CAN-059)。在CALICE合作组会议报告3次。



CERN SPS 束流测试数据:  
强子束流 @ 10 - 80 GeV



→ SDHCAL 探测器层数优化，对于CEPC  
喷注能量较低时，40层探测器性价比较好。

# 子课题三：强子量能器进展-GEM

## ➤ 年度计划

- ◆ 2016.7-2017.6 大面积GEM探测器设计和模拟，初步确定双层GEM的主要参数。完成大面积双层GEM探测器的概念性设计，初步确定探测器的基本参数。✓
- ◆ 2017.7-2018.6 大面积GEM探测器制作工艺研究，高颗粒度GEM读出电子学的设计。基本确定大面积GEM探测器制作的各项具体工艺以及读出电子学的设计方案。✓
- ◆ 2018.7-2019.6 试制30cm×30cm双层GEM探测器，试制高颗粒度GEM读出电子学，进行探测器与读出电子学的集成和联合测试。
- ◆ 2019.7-2020.6 研制0.5m×1m 双层GEM探测器，制作500道读出电子学；进行探测器与读出电子学的集成，测量探测器的各项性能；对于MIP粒子的探测效率要好于95%，达到设计指标。
- ◆ 2020.7-2021.6 灵敏面积达到0.5m×1m 微孔型探测单元计数率能力达1MHz/cm<sup>2</sup>，撰写论文。

## ➤ 子课题介绍

- ◆ 颗粒度：1 cm×1 cm
- ◆ 面积：1 m×0.5 m
- ◆ 对MIP粒子探测效率：>95%
- ◆ 计数率：1MHz/cm<sup>2</sup>
- ◆ 厚度：小于6mm

2018/8/7

## ➤ 研究方案

- ◆ 1 cm×1 cm 高颗粒度“3-1-1”结构的30 cm×30 cm 双层GEM探测器读出方案
- ◆ 1 cm×1 cm 高颗粒度“3-1-1”结构的0.5 m×1 m 双层GEM探测器读出方案

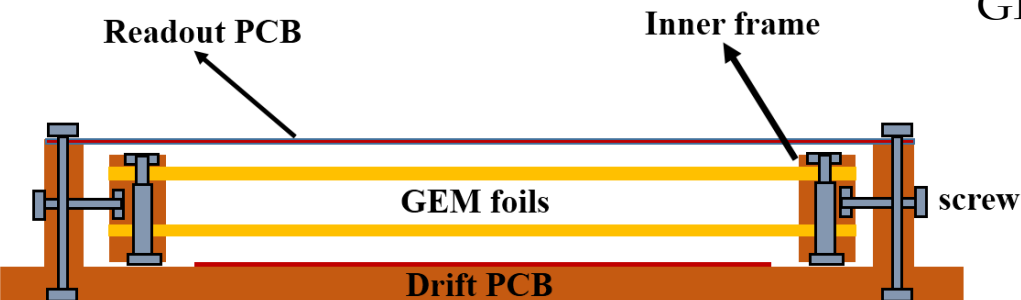
科技部CEPC中期进展报告

# 子课题三：强子量能器进展-GEM

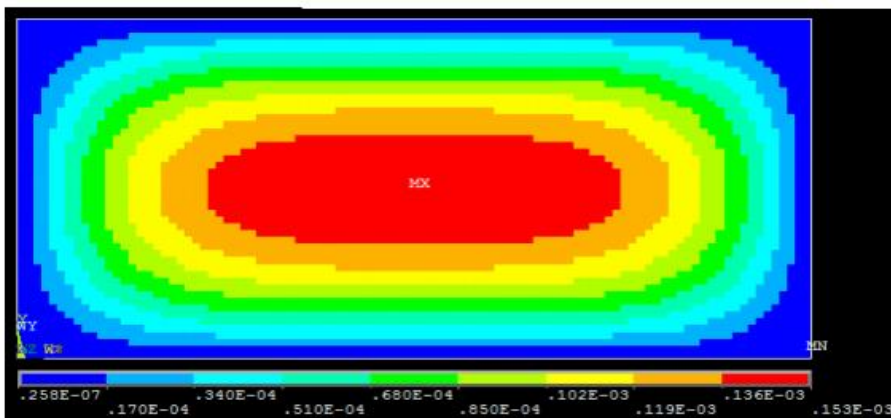
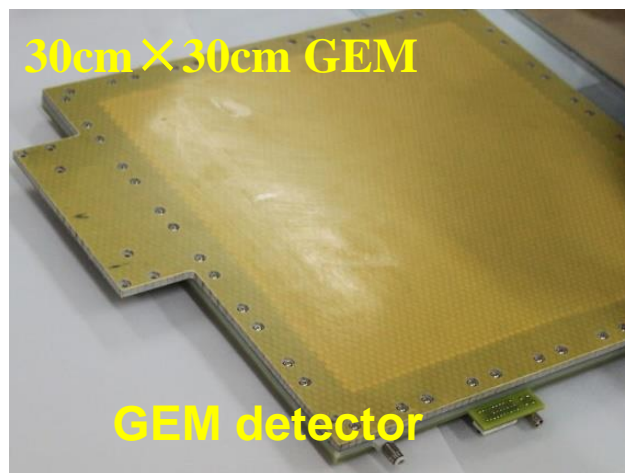
## GEM-SDHCAL

### 自拉伸技术GEM制作工艺

- 模拟了自拉伸工艺下的GEM膜以及探测器室体的形变，完成了探测器设计。
- 采用自拉伸工艺制作了30cm × 30cm GEM探测器原型



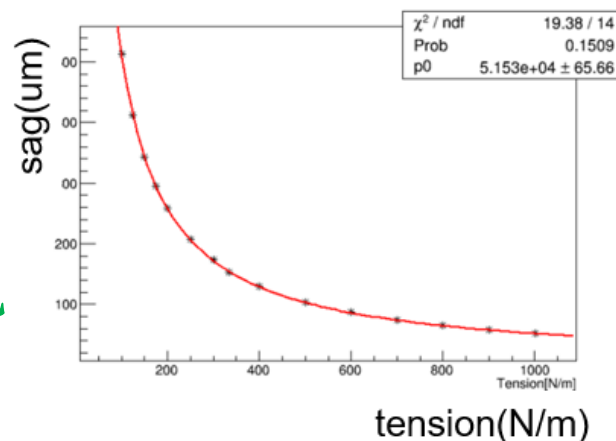
单层GEM膜在张力、重力及电场力下垂直形变图



100cm × 50cm GEM膜形变模拟

2018/8/7

### 最大形变随张力变化



科技部CEPC中期进展报告

# 子课题三：强子量能器进展-GEM

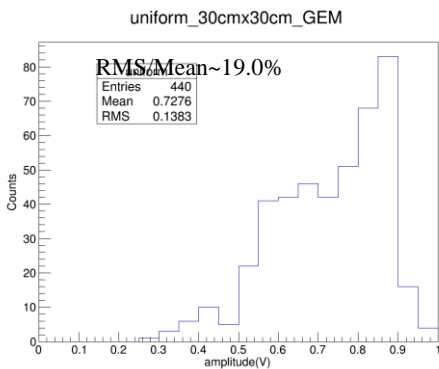
## 探测器和电子学联合调试

- 完成基于Microroc芯片的电子学读出系统的设计和制作。

## 测试结果（气体：70%Ar+30%CO<sub>2</sub>）

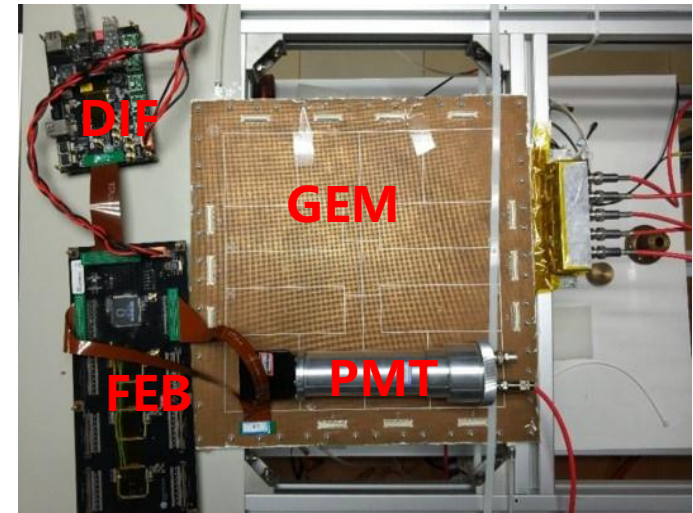
- ✓ 均匀性扫描：RMS/Mean~19.0%;
- ✓ 宇宙线探测效率：~95%（增益~3500）
- ✓ 宇宙线测试：单个宇宙线事例多个pad有响应的事例数占总事例数比例为1.54% (5fc阈)

### 均匀性测试结果

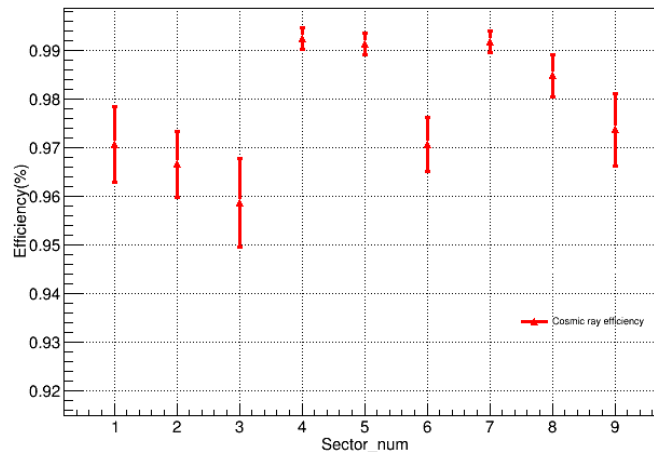


2018/8/7

GEM探测器及读出电子学  
30cm×30cm GEM 阳极板



cosmic ray efficiency test



- 30cm×30cm分区扫描。每10cm×10cm扫一个点共9个点
- GEM探测器对MIP的探测效率 > 95%

# 子课题三：量能器研究团队



王志刚 (高能所)



张云龙 (科大)



董明义 (高能所)

电磁量能器研究团队  
高能所：王志刚，董明义，胡涛，赵航，赵兵  
科大：张云龙，牛亚洲，赵申森



杨海军 (交大)



俞伯祥 (高能所)



刘建北 (科大)

强子量能器研究团队  
高能所：俞伯祥，蒋杰臣，邓少卿  
科大：刘建北，洪道金  
交大：杨海军，胡继峰，  
Francois Lagarde，刘冰



# 子课题三： 论文发表和学生培养

- (1) 基于波形采样的 CEPC 电磁量能器读出单元测试系统, 牛萍娟, 董明义, 赵航, 胡鹏, 于丽媛, 胡涛, 王志刚. 核技术, 2018,41(1).
- (2) Particle Flow Oriented Electromagnetic Calorimeter Optimization for the Circular Electron Positron Collider. H.Zhao,C.Fu,D.Yu,Z.Wang, T.Hu, M.Ruan. Accepted
- (3) R&D of the CEPC scintillator-tungsten ECAL. MingYi Dong. JINST. Accepted.
- (4) 《薄型较大面积THGEM气体探测器的研制》, 核电子学与核探测技术, 已经接收;
- (5) Studies of the detector cells in hadronic calorimeter based on plastic scintillators, RDTM, 正在投稿
- (6) Development of a double-GEM detector using the self-stretching technique for digital hadron calorimetry 2018 JINST 13 P01020
- (7) CALICE Note CAN-059, under review

➔ 毕业1名博士生 (赵航), 3名硕士生 (夏莉, 丰建鑫, 李明慧)

# 子课题三：国际专家评估报告

Imad Laktineh (Lyon, France)

Frank Simon (MPI, Germany)

Tohru Takeshita (Shinshu, Japan)

吕军光 (高能所)

王义 (清华大学)

班勇 (北京大学)

Please choose the appropriate grade (mark ✓) for the following items based on your best knowledge (5 means the highest score, 1 means the lowest score):

Item 1: Does the detector design appear reasonable aiming to goals of the MOST project?

Answer: ⑤ ✓ ④ ③ ② ①

Item 2: Is the chosen technology option suitable for detector design within MOST project?

Answer: ⑤ ④ ✓ ③ ② ①

Item 3: Does the current progress and preliminary test performance look promising?

Answer: ⑤ ✓ ④ ③ ② ①

Item 4: Overall detector R&D performance in the past two years?

Answer: ⑤ ④ ✓ ③ ② ①

I. Laktineh Frank Simon 竹下徹 王义 junguang lu Ban Yong

## Conclusions:

The activities of the different groups involved in the preparation of the future CEPC calorimeters and the results obtained so far are of very good quality, in particular when considering the limited number of human and funding resources allocated to these activities. The goals of the first part of the project seem to be globally well fulfilled. The committee encourages the funding agencies to provide more support to these important activities.

already performed elsewhere helps to build up good experience locally, the committee encourages the groups to take part to R&D activities within international collaborations like CALICE in order to profit from their expertise and available technologies and to achieve more genuine developments which address specific issues for CEPC, complement existing world-wide efforts and go beyond the current state of the art.

- 量能器团队在有限的人力和经费条件下，高质量地完成了项目前期的研究计划。
- ➔ 建议投入更多经费
- ➔ 鼓励参加国际合作，充分利用国际同行已经预研的技术和经验，有助于解决CEPC探测器相关的关键技术

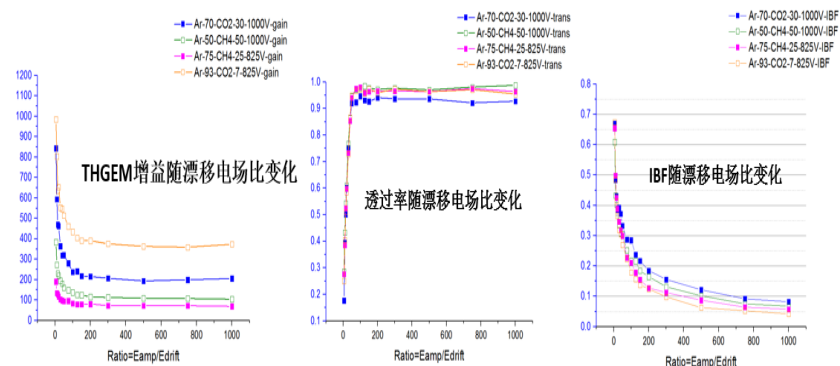
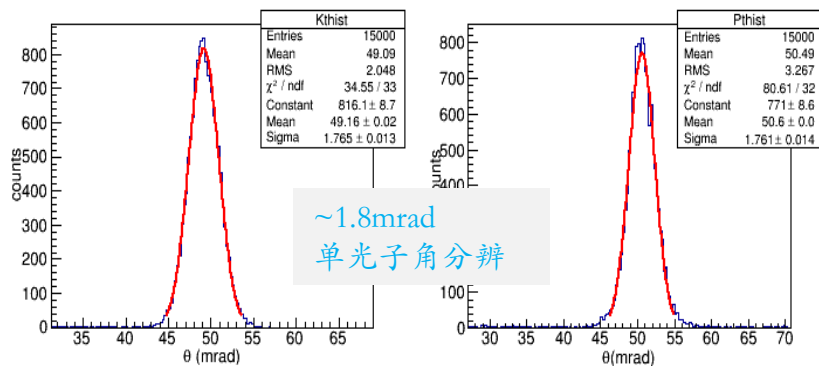
# 子课题三： 下一步研究计划

- 将前端读出集成到探测器读出阳极板，开始准备 $0.5\text{m} \times 1\text{m}$  GEM的制作，开展性能测试。
- 测试完成结构改造后的 $20\text{cm} \times 20\text{cm}$  THGEM的各项性能；准备制作 $0.5\text{m} \times 1\text{m}$ 的THGEM探测单元。
- 准备制作 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 的RPC探测单元，分析SDHCAL束流测试数据，预计发表论文1篇。
- 开展ECAL原理样机的研制和支撑结构设计
- 加强制冷系统研制
- 根据国际评估专家组建议：积极与国际同行开展交流与合作，高能所和科大计划参加9月份在交大举办的CALICE合作组会议，正式加入CALICE。

# 子课题四：年度计划完成情况

2016.7-2017.6：进行探测器原理和结构设计、模拟研究，关键参数优化，确定契伦科夫探测器总体设计 → 按计划完成。

- 针对20GeV-40GeV K,  $\pi$ 分辨的要求，完成了PID原理探测器的结构设计；
- 利用Geant4模拟了设计探测器的基本性能，初步验证了好于2mrad的单光子角分辨；
- 利用Garfield开展了光灵敏探测器的模拟研究（电子透过率，电子传输效率，相对增益，正离子反馈率等），为探测器参数选型提供了依据；

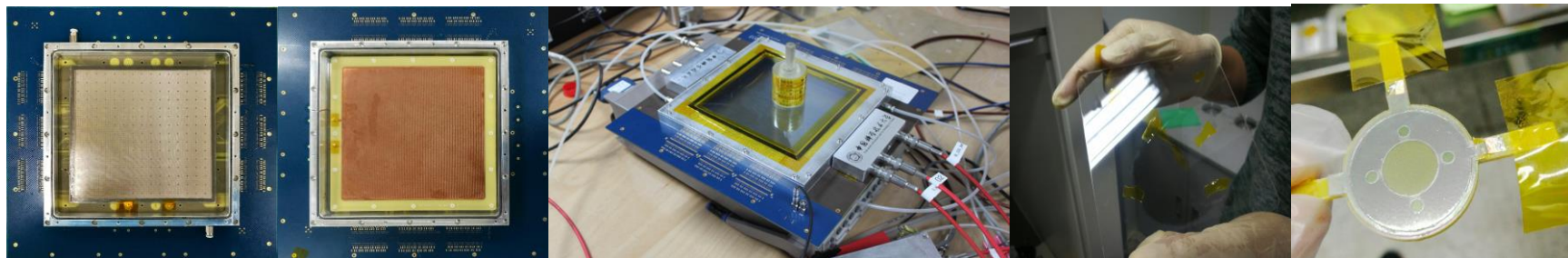


# 子课题四：年度计划完成情况

2017.7-2018.6：试制不同结构的THGEM+Micromegas 混合型微结构气体探测器，测试探测器主要性能，得到能够独立工作的单光子灵敏探测器

→ 按计划完成。

- 关键技术验证1：单光电子放大，利用双丝网Micromegas (DMM) 实现研制了具有**高增益 ( $>10^6$ )** 和**低离子反馈( $\sim 0.0005$ )**光读出探测器；
- 关键技术验证2：两维高位置分辨读出，实现了基于四角读出原理的探测器的研制，**实现了好于250um的位置分辨**，读出路数仅相当于像素读出的1/25。
- 150mm $\times$ 150mm样机尺寸探测器研制 (THGEM+ Micromegas 和DMM两种方案)



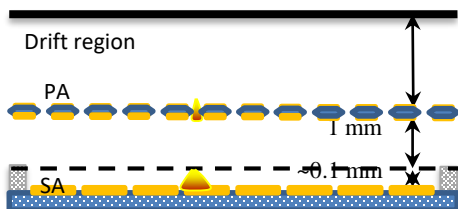
150mm $\times$ 150mm DMM (图1)，THGEM+Micromegas 探测器 (图2) 及初步性能测试 (图3)；透射式 (图4) 和反射式 (图5) CsI光阴极的制备研究。

# 子课题四：主要进展和亮点工作

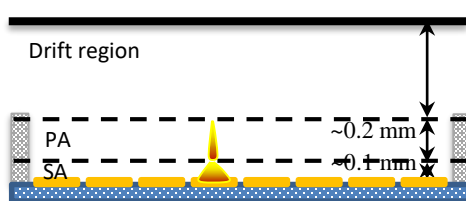
## 光灵敏探测器中的关键技术研究：

- 单光子放大：提出了两种并行互补的光灵敏探测器的研制方案；

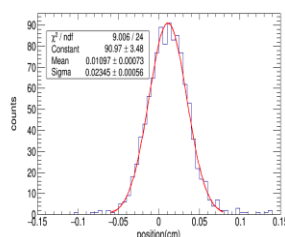
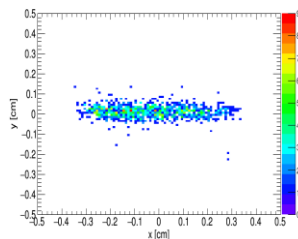
THGEM+Micromegas



双丝网Micromegas



- 位置灵敏读出：基于四角读出原理二维位置灵敏读出方法的研究。



- ✓ THGEM+Micromegas：技术相对成熟，探测器结构简洁，作为基本路线，是项目顺利开展的有力保障；
- ✓ DMM探测器：结构更紧凑，实现了 $>10^6$ 单电子增益和 $\sim 0.0005$ 离子反馈率；
- ✓ 四角读出：更少的读出路数，更好的位置分辨；利用 $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ 读出pad，初步实现 $235\mu\text{m}$ 位置分辨，好于 $2\text{mm} \times 2\text{mm}$ 的像素读出的 $\sim 500\mu\text{m}$ 水平，读出路数降低到其 $1/25$ ；

# 子课题四：参与人员和研究成果

## PID-RICH参与人员：

教授1人(刘建北)，特任副研究员1人（张志永），博士研究生1人；

## 论文发表：

1. A high-gain, low ion-backflow double micro-mesh gaseous structure for single electron detection  
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 889 (2018) 78 – 82.

## 专利申报：

1. 发明专利：用于大面积Micromegas探测器制作的热熔胶膜热压接方法（提交评审中）

## 参加会议：

1. Thermal-Bonding Method for Micromegas Fabrication and Its Applications, 刘建北,  
International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics in 2017  
(TIPP2017), 北京, 2017.05.22-05.26, 国际会议。
2. 基于微结构气体探测器的光灵敏探测器的模拟研究, 丰建鑫, 第七届全国先进气体探测器  
研讨会, 广西, 2017.11.11-11.12, 国内会议。
3. DMM: 一种用于单光电子探测的双层丝网Micromegas 的研制, 张志永, 第七届全国先进  
气体探测器研讨会, 广西, 2017.11.11-11.12, 国内会议。

## 学生培养：

1. 本科毕业论文1人；
2. 硕士毕业论文1人。

# 子课题四：国际专家评估

评估专家：Silvia Dalla Torre (Italy), 吕军光, 衡月昆 (高能所)

## 对已完成工作的肯定：

- 实现了具有针对单电子 ( $> 10^6$ ) 和低离子反馈 ( $\sim 0.0005$ ) 的高增益的DMM探测器结构的原型，其是THGEM + MM的基准选项的替代光子探测器。开发了一种用于实现具有较粗读出粒度的2D定位能力的四角读出方案。此外，制造了两个全尺寸 ( $150 \times 150 \text{ mm}^2$ ) THGEM + MM和DMM光子探测器原型。
- 关于仿真和原理样机的工作表明，RICH 预研进度符合任务书的计划要求。而且这项研究所涉及的相关技术非常先进。

## 对下一步工作的建议：

- RICH原型的设计和蒙特卡罗研究还需要进一步的工作和几个关键方面的研究。
- 需要考虑RICH在CEPC中的作用，并分析与其他探测器的关系和影响；  
例如：1) RICH材料量对量能器的影响；2) 与径迹探测器的关系；  
3) 磁场对RICH光电子探测的影响。
- 光电阴极研究，CsI或光电转换气体仍然是一项重要挑战。可以考虑使用CaF<sub>2</sub>或MgF<sub>2</sub>改善窗材料。
- 需分析RICH的光子探测效率和 $\pi/K$ 探测效率，死区和死时间的影响。



# 子课题四：下一步工作计划

针对PID子课题的总体研究目标，结合国际评审专家提出的重要建议，下一步的工作计划从以下方面展开：

## 模拟研究方面：

- 深化模拟研究，从CEPC物理模拟入手，理解PID探测器的性能要求；
- 在CEPC环境下明确RICH的各项具体要求，优化RICH的设计；

## RICH原型的研究：

- 考虑更多的基本因素，如紫外线辐射器的吸收，石英窗口的透明度，CsI的响应波长区域，更好地估计检测到的QE数量和性能。
- $C_4F_{10}$  辐射体：纯化对紫外线传播非常重要，尤其是排除氧气，水，苯等杂质。
- CsI光电阴极：优化CsI光电阴极制备，提高光电效率。
- 光子探测器：选择并测试高品质、具有更宽透紫范围的石英窗；深入研究光探测器性能，提高探测器稳定性。

# 课题小结

- 探测器关键技术预研的各子课题都按照任务书的年度计划和中期考核指标开展和执行
- 2017年10月完成各子课题初步设计报告（5份报告）
- 2018年6月邀请了22名国内外专家，开展项目国际评估，整体进度基本符合任务书计划和要求（4份专家评估报告）。后续将对专家评估意见进行详细研讨。
- 参加骨干14人：4正高、8副高、2中级  
团队成员：4职工、5博士后、22研究生
- 到账经费1098.2万，累计支出507.7万，执行率46%
- 发表了10篇SCI论文，已培养2名博士生和6名硕士生

# 致谢

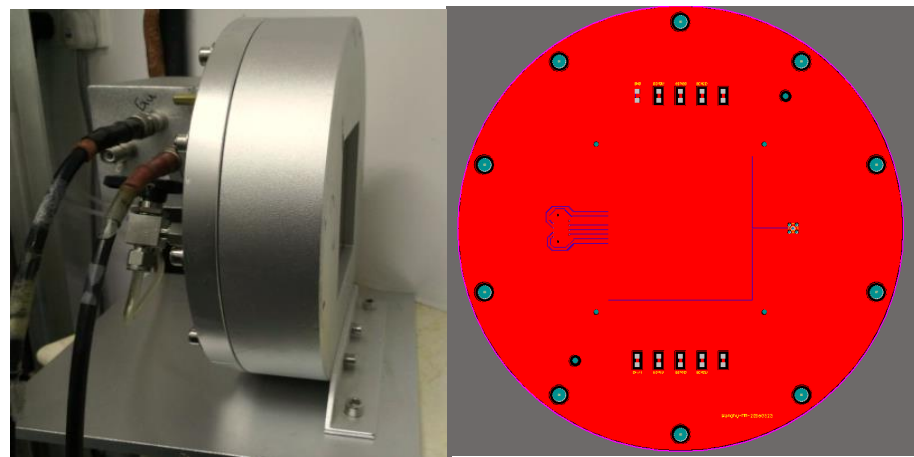
非常感谢专家的聆听  
请多提出宝贵的建议



# 子课题二：课题执行情况-探测器

## TPC连续正离子反馈模块研制进展

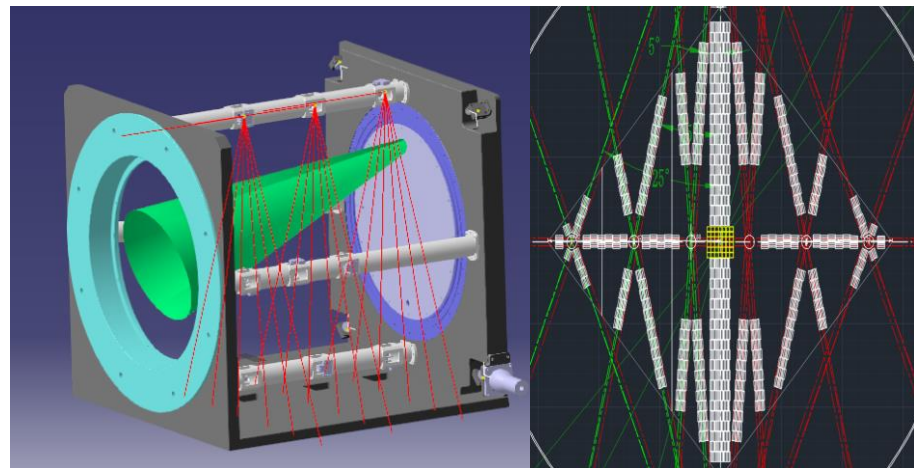
- 完成GEM+Micromegas探测器设计
- 有效面积： $100\text{mm} \times 100\text{mm}$
- 漂移区：12mm
- 传输区：1.0mm
- 收集区：128 $\mu\text{m}$
- 测试腔体及条形Pad电路板完成设计



GEM+Micromegas探测器及读出板设计图

## TPC测试原型研制进展

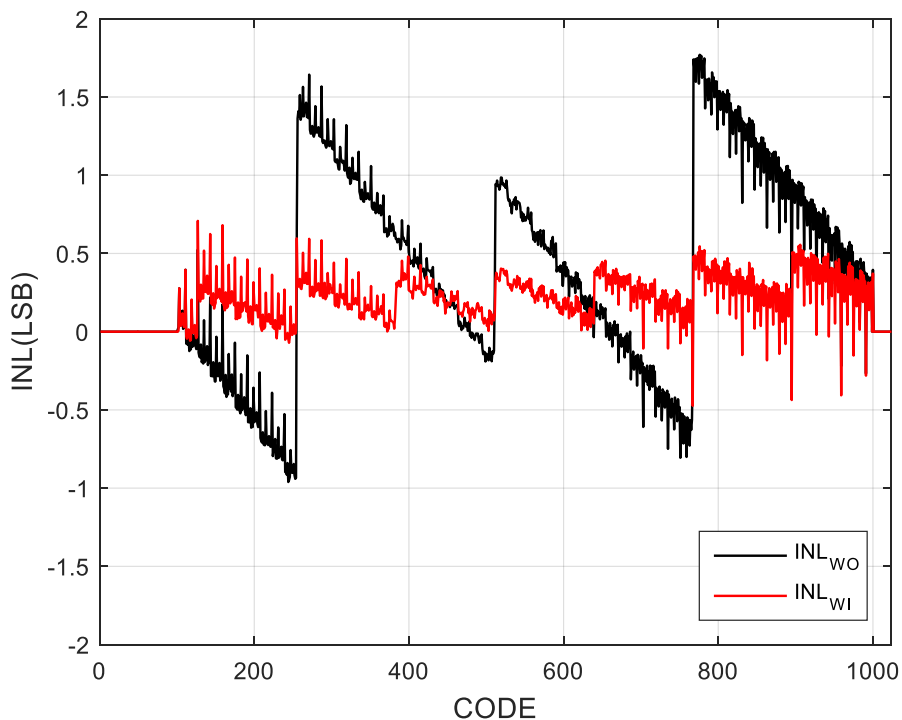
- 可适应读出模块： $100\text{mm}^2 \rightarrow 200\text{mm}^2$
- 漂移距离：510mm
- 可控正离子产生：光电效应法
- 测试方法：单束激光或5GeV电子束
- 束流方向：168Pads
- Pad尺寸：1mm  $\times$  6mm
- 测试条件：探测器制作采用无磁性金属材料，可满足1.0T磁场测试



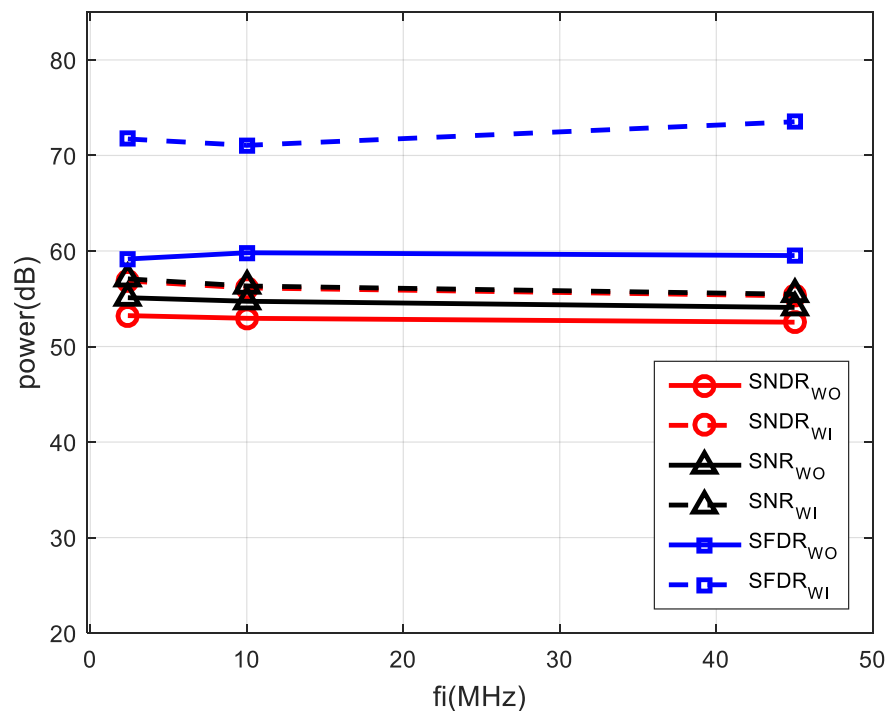
TPC测试原型机及读出板设计图

# 子课题二： ADC 测试结果 @ 50 MS/s

INL: <0.6LSB



Dynamic Performance: ENOB~9.17bit



**Circuit Module**

Reference buffer

**SAR ADC Core**

Others(CLK gen.)

**Total**

**Power consumption (mW)**

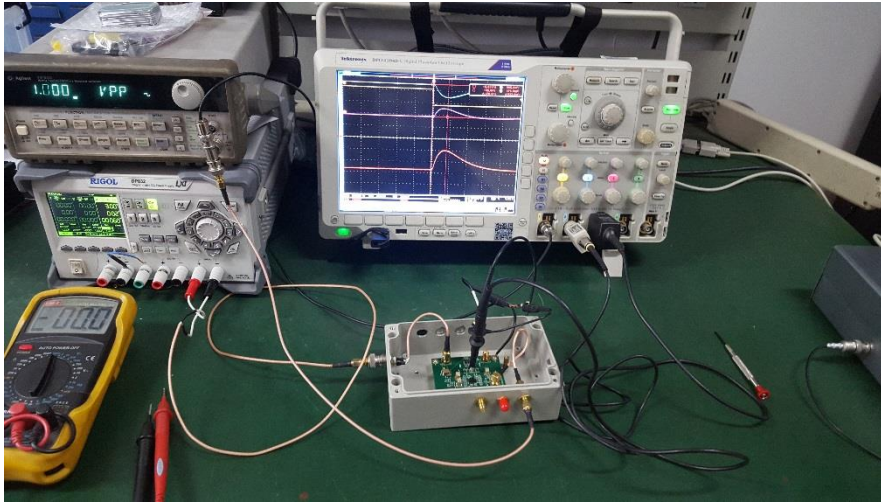
0.25

**1.0** FOM=21.3fJ/conv.

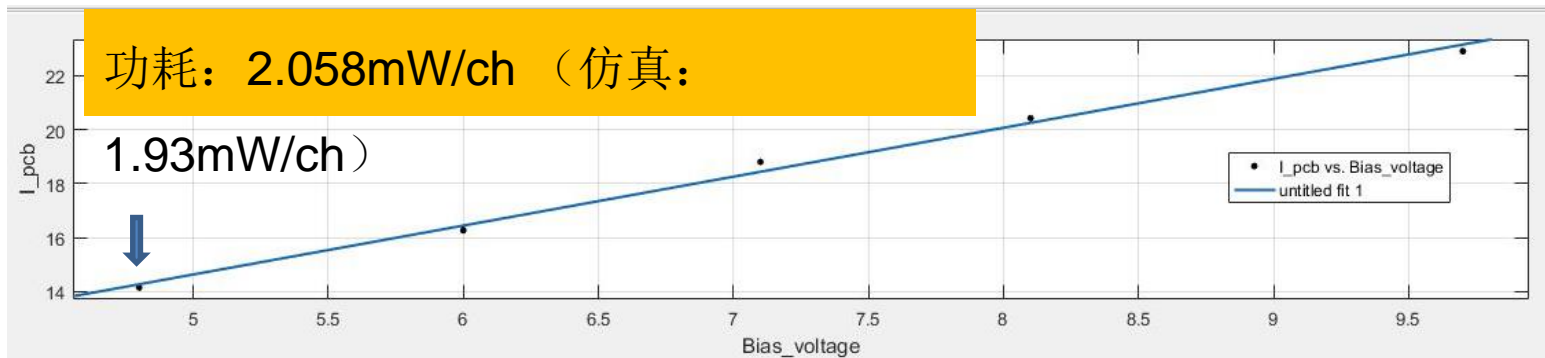
2.75

**4.0**

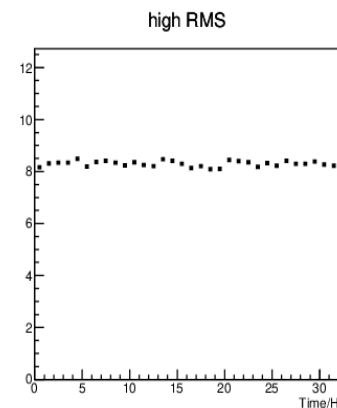
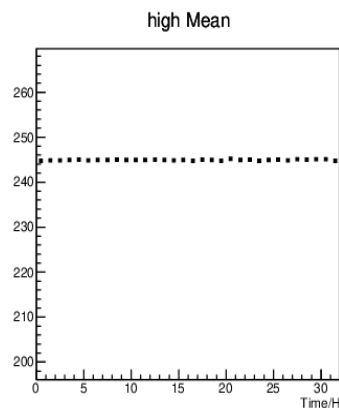
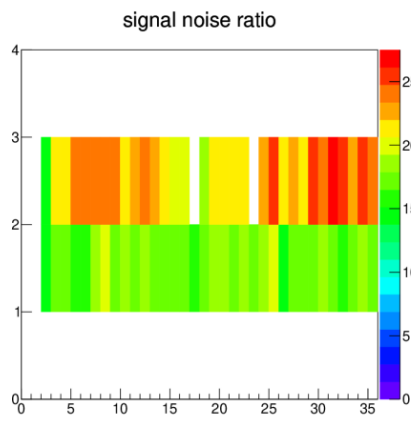
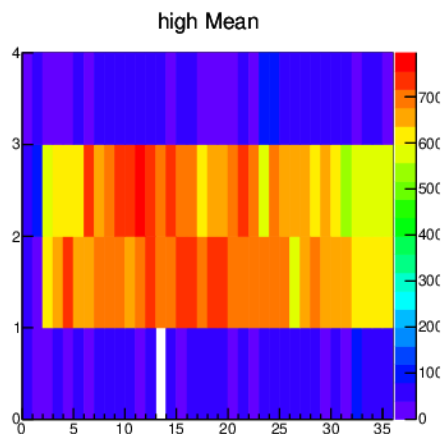
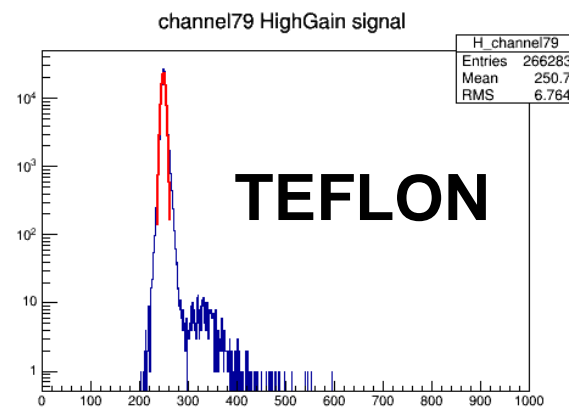
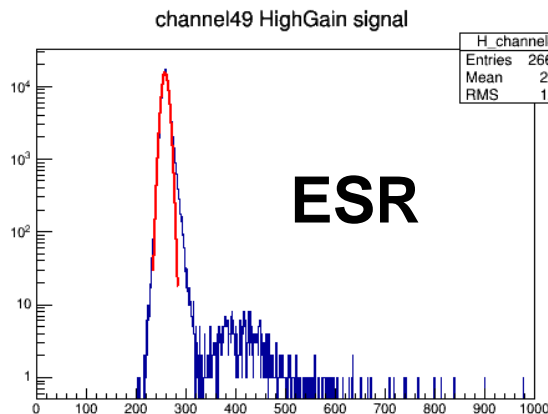
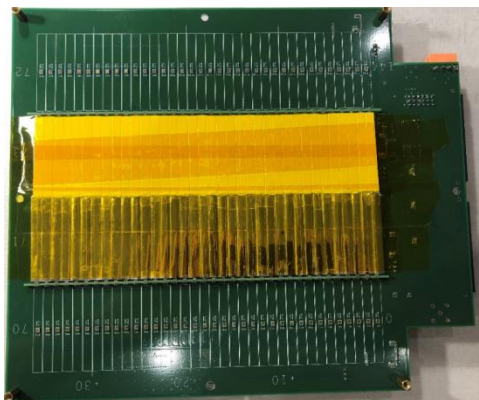
# AFE Test Results



OUT  
INPUT  
OUTPUT  
DIFF



# 子课题三：单层样机的研制



开展了单层样机研制，并进行了宇宙线测试，对比了两种反射膜性能。

# 子课题三： 论文发表和学生培养

## • 会议报告（部分清单）

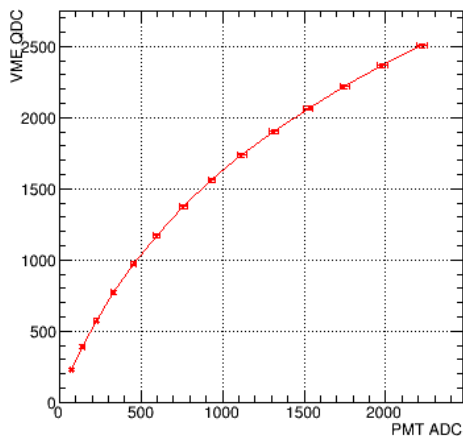
- An improved self-stretching GEM assembly technique , 刘建北, International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics in 2017 (TIPP2017), 北京, 2017.05.22-05.26, 国际会议。
- CEPC 强子量能器GEM方案预研进展, 王宇, 第七届全国先进气体探测器研讨会, 广西, 2017.11.11-11.12, 国内会议。
- The progress of the CEPC HCAL, Boxiang Yu, CHEF, Lyon, 2017.10.2-6
- The progress of the CEPC ECAL, Mingyi Dong, CHEF, Lyon, 2017.10.2-6
- “Conceptual design of the CEPC calorimeters” , Haijun Yang, Asian Forum for Accelerators and Detectors, Jan 16-17, 2017
- “Status of CEPC Calorimeter R&D” , Haijun Yang, HKUST-IAS High Energy Physics Conference, Jan 23-26, 2017
- “Recent SDHCAL results from beam test” , Bing Liu, CALICE Collaboration Meeting, LLR, France, March 22-24, 2017
- “BDT Application in SDHCAL” , Haijun Yang, CALICE Collaboration Meeting, U. Tokyo, Japan, Sept. 25-27, 2017
- “Status of semi-digital Hadronic Calorimeter (SDHCAL)” , Haijun Yang, International workshop on Future High Energy Electron Positron Collider, Beijing, Nov. 6-8, 2017
- [Status of CEPC ECAL, Mingyi Dong, HKUST-IAS, Jan. 22-26, 2018](#)
- [Status of CEPC HCAL, Jianbei Liu, HKUST-IAS, Jan. 22-26, 2018](#)

## • 学生培养：科大本科毕业生一名，高能所研究生毕业一名

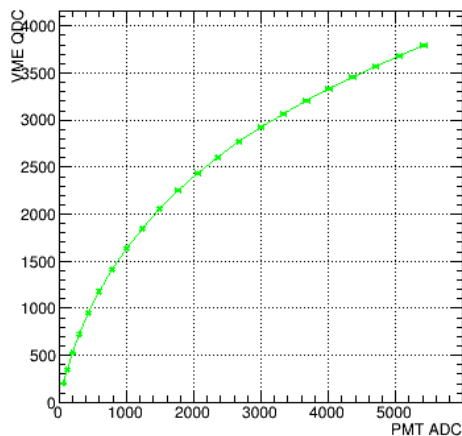


# 子课题三： SiPM 性能测试

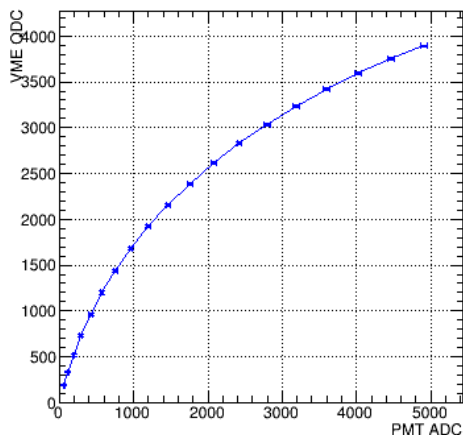
5ns PW



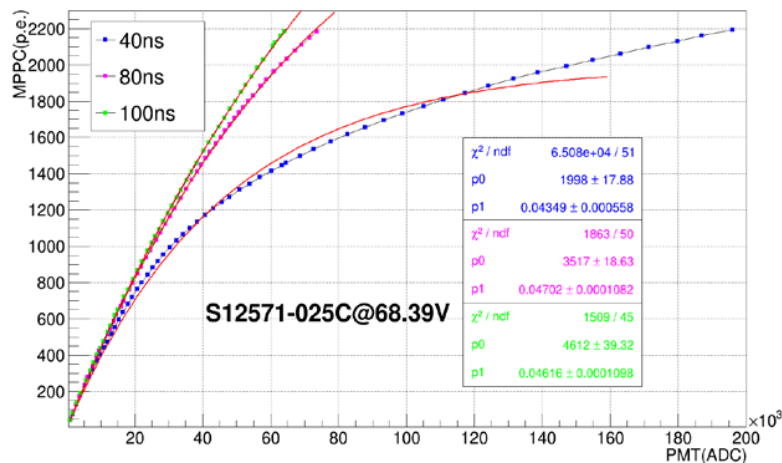
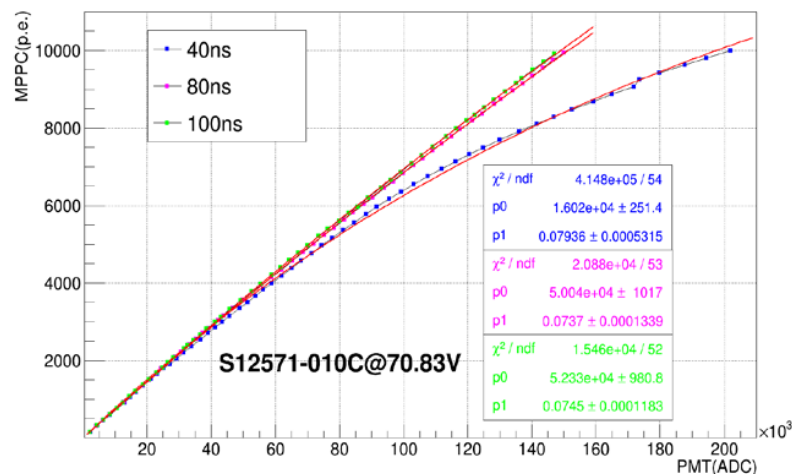
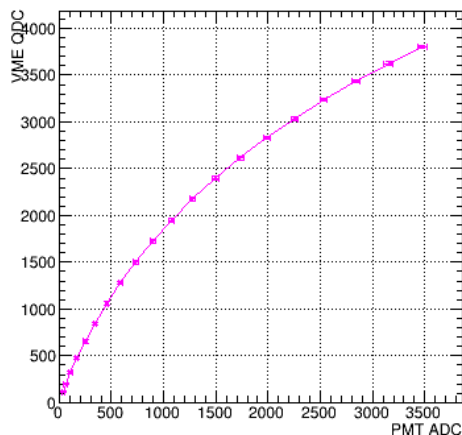
10ns PW



20ns PW



40ns PW



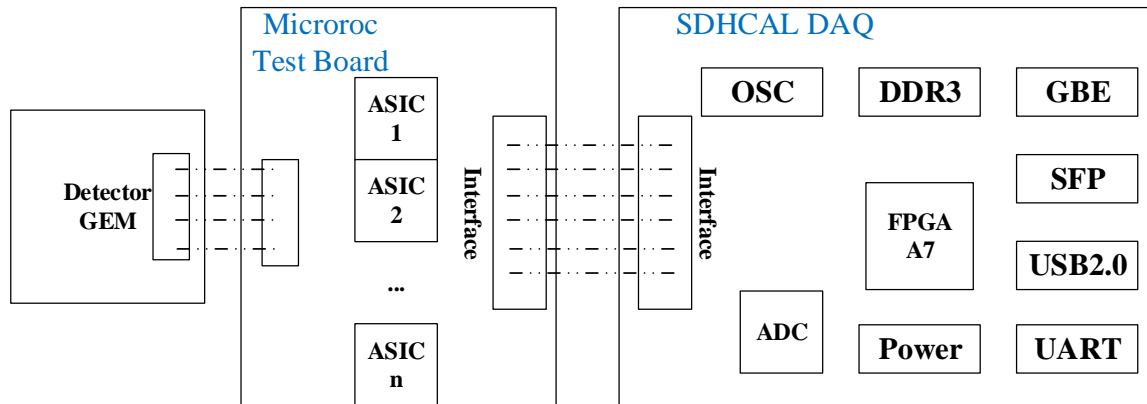
对SiPM输出线性进行了测试，SiPM饱和特性在一定程度上可以得到修正，有效提高SiPM的线性范围，有利于满足CEPC - ECAL需求。

# 子课题三：强子量能器进展-GEM

## 高颗粒度GEM读出电子学设计

- ▶ 电子学读出系统: 完成基于Microroc芯片的电子学读出系统Phase 1的设计,并且已完成该电子学读出系统的制作。

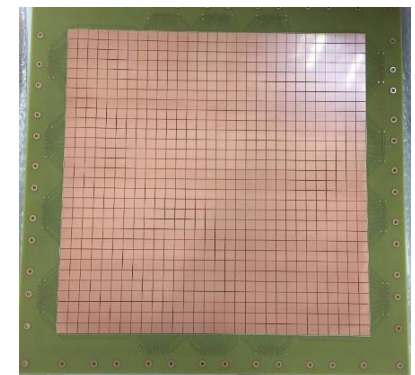
### 结构框图



电子学读出系统实物图



30cm × 30cm GEM  
探测器阳极板



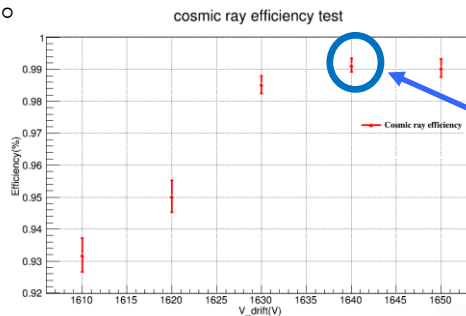
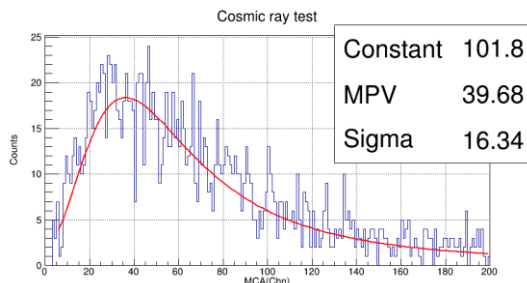
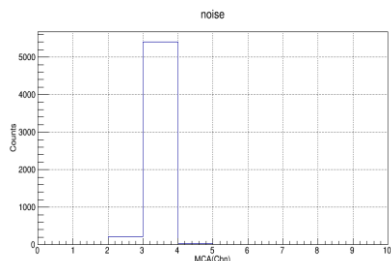
- ◆ 阳极读出板：30cm × 30cm GEM探测器的阳极读出，共900个1cm<sup>2</sup> 的pad
- ◆ MICROROC测试板：PCB上集成4片MICROROC，用菊花链的形式连接。
- ◆ DIF板：完成MICROROC数据采集、配置、自动化测试。

# 强子量能器进展-GEM

## 30cm×30cm双层GEM探测器性能测试

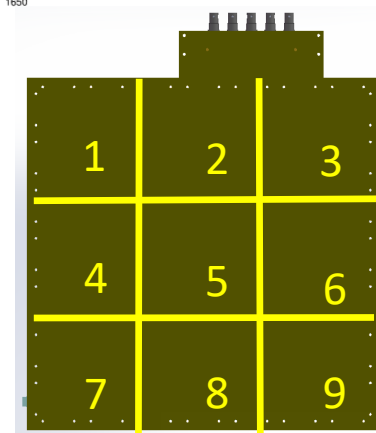
◆ 95%Ar+5%iC<sub>4</sub>H<sub>10</sub>

- 对sec5进行宇宙线效率扫描，确定探测器工作点。用多道(MCA 10V量程 1024道)和示波器同时记录数据。

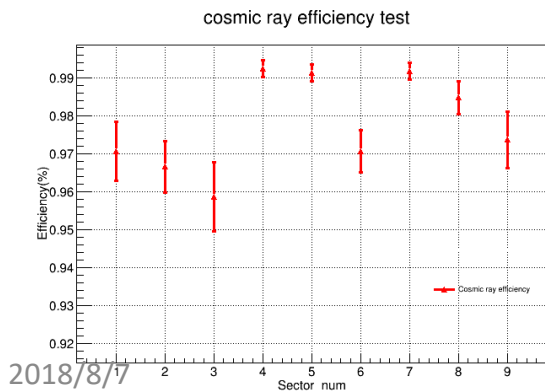


增益~25000

探测器分区



- 30cmX30cm分区扫描。每10cmX10cm扫一个点，共9个点



✓ 探测器对MIP的探测效率>95%

✓ 效率误差定义为 $(\epsilon(1-\epsilon)/N)^{1/2}$