

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)

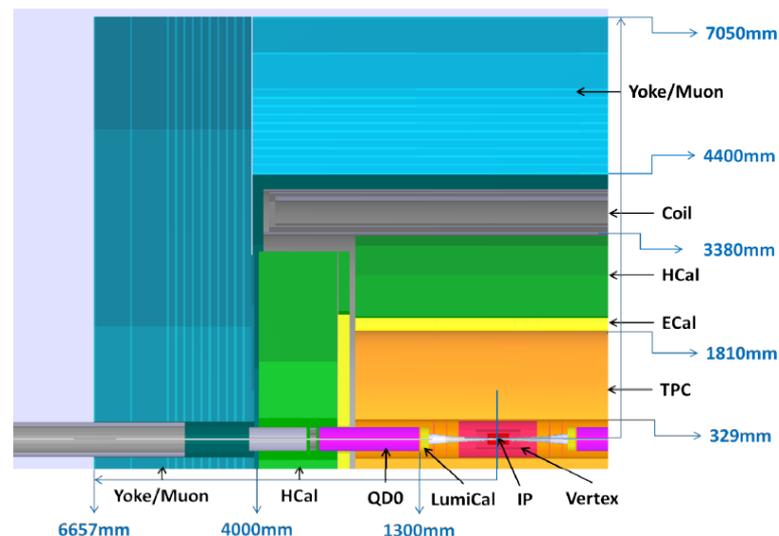
2018年12月26日



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



	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		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 μm ；积分时间10-100 μs ；功耗<100mW/cm²。

技术路线：

- 采用高阻、厚外延层CMOS工艺（TowerJazz CIS 0.18 μm ）→提高信噪比；
- 像素内甄别，实现小像素耗尽型CPS设计→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：

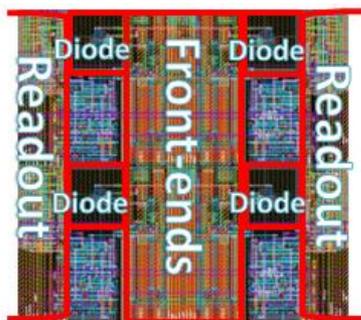
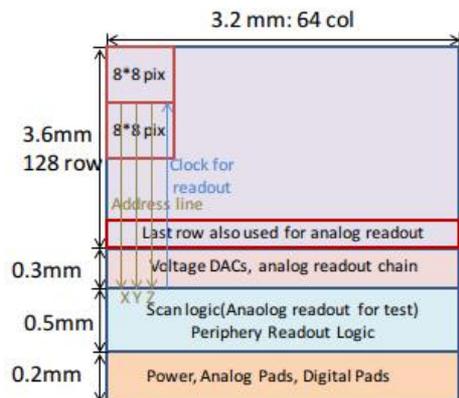
第一年：通过调研和比较，确定设计芯片工艺、电荷收集二极管设计方案、前置放大器参数和结构，探索像素阵列新读出结构。 ✓

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。 ✓

子课题一：两种芯片设计

MIC4 (华师/高能所)



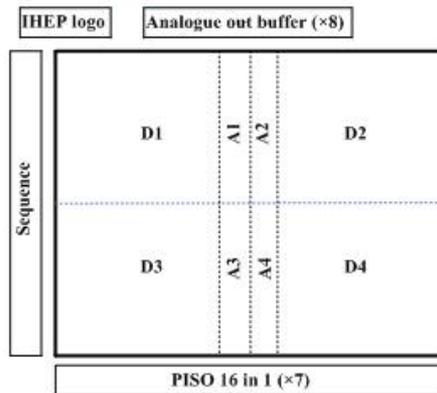
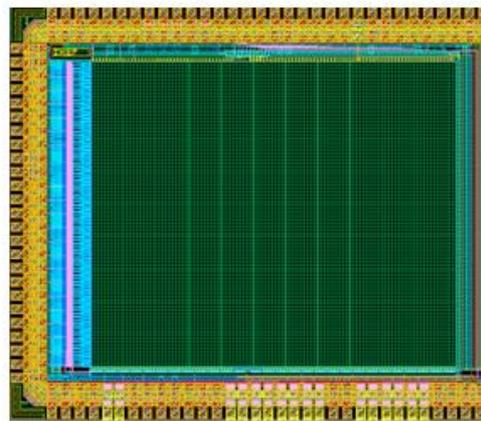
- Design MIC4 (Maps In CCNU)芯片面积: about 14 mm²
- 阵列大小: 128 row x 64 col
- 前端电路: 电流比较器
- 触发读出, 非零压缩, 仅读出击位置
- DACs, 偏置
- 衬底可加负偏压至 -8V

JadePix2 (高能所)

2nd Submission: joint 0.18 um CMOS process MPW submission

with IPHC in May, 2017

- 3 × 3.3 mm²;
- 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

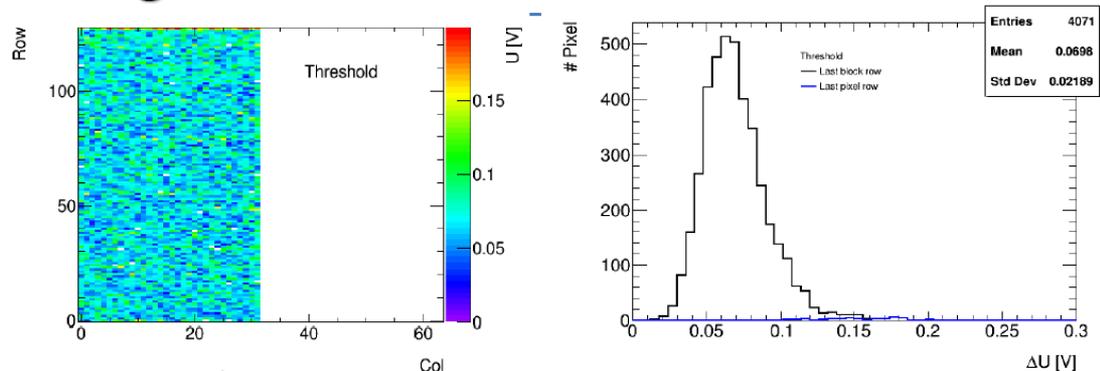
亮点:

- 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。

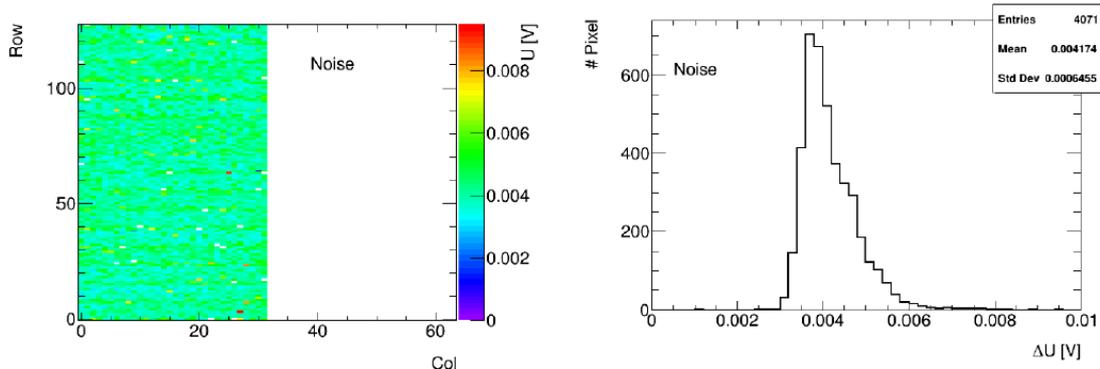
子课题一：MIC4测试结果

- 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 \rightarrow Mean threshold around 99 e-



- \rightarrow Mean FPN \sim 31 e-, TN around 6 e-

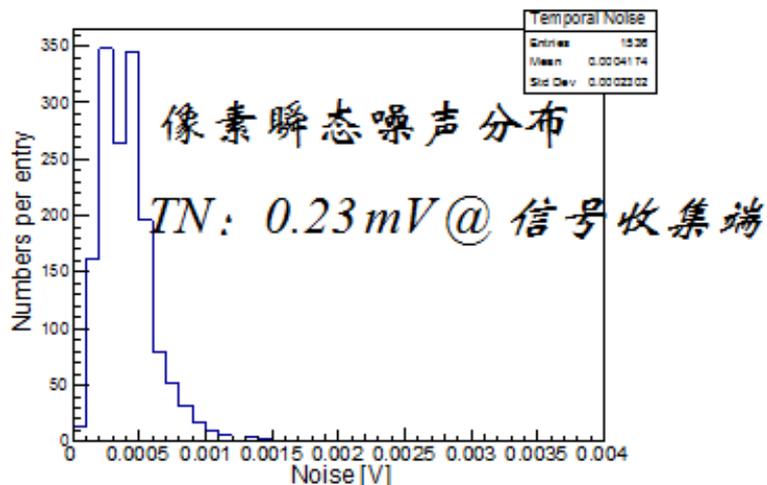
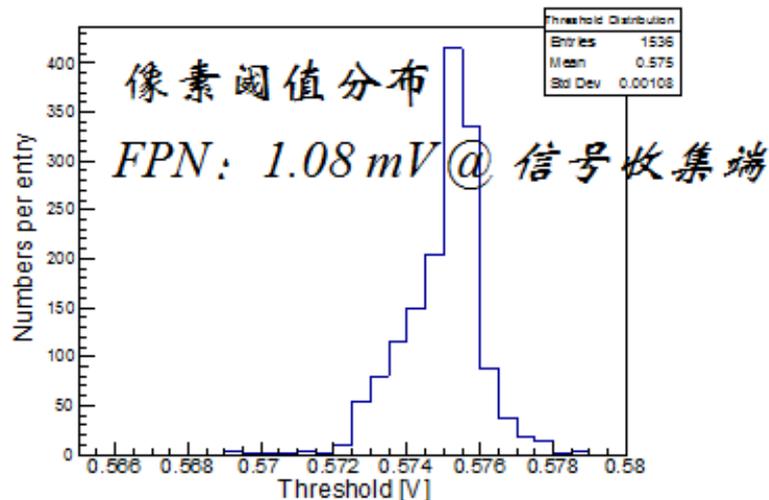
MIC4 阈值和噪声测试结果

子课题一： JadePix2测试结果

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：未来研究计划和目标

→ 2018年6月国际评审专家报告：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。

→ 下一次芯片设计需要整合为一个

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 μm 范围，实现单一芯片设计达到本项目的综合指标。

方案考虑：

- 1、ALPIDE前端+Token-ring读出
- 2、ALPIDE前端+Rolling-shutter读出

人才培养：毕业1名博士生（王珍）、3名硕士生（李雅淑，黄建凯，王艳）

- 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, 在NIMA发表, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.10.006>
- 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

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: $5\text{mW}/\text{通道}$

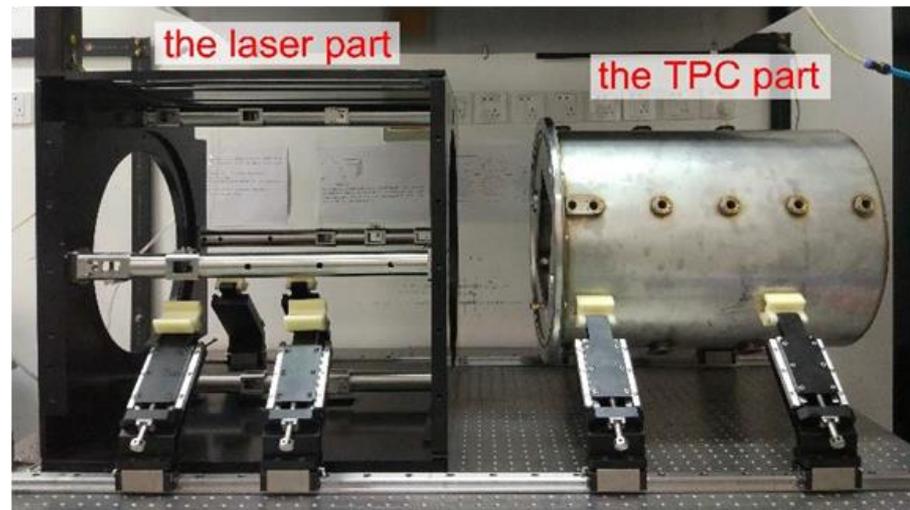
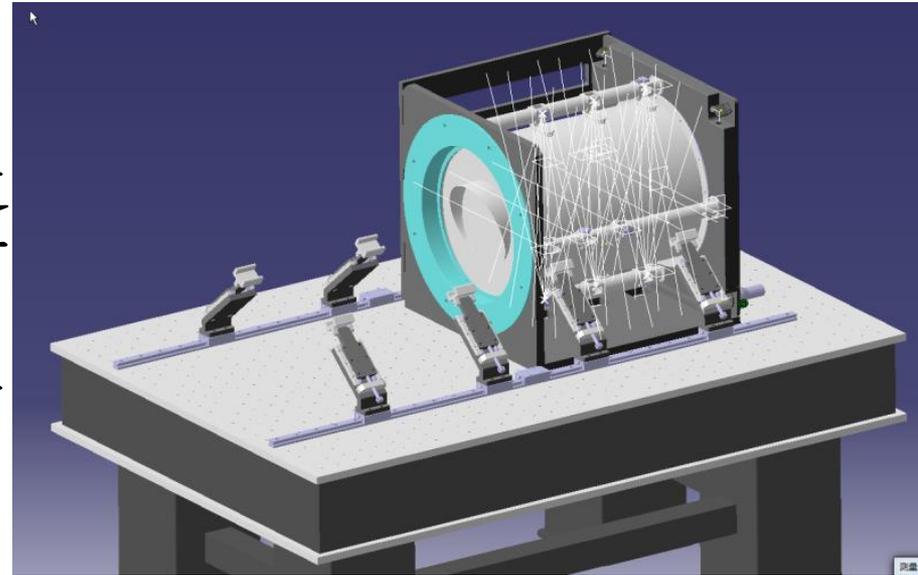
研究内容：

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：TPC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

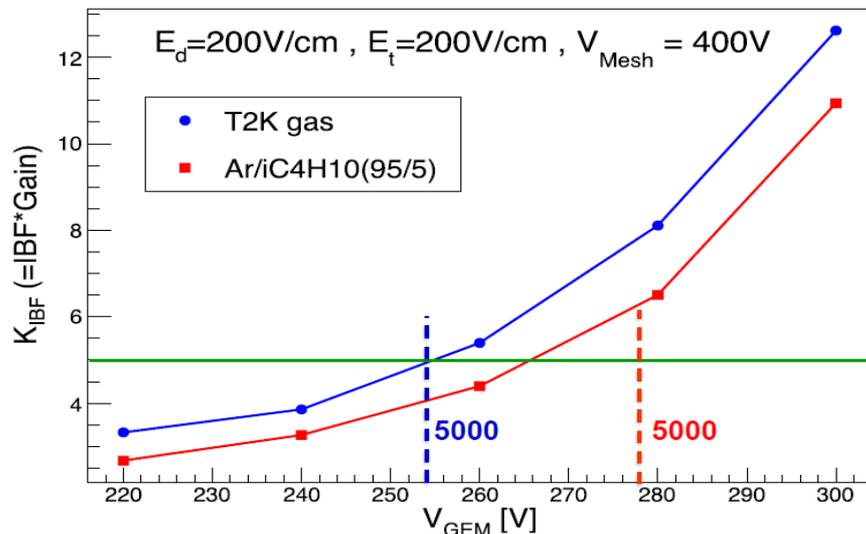


子课题二： 测试进展

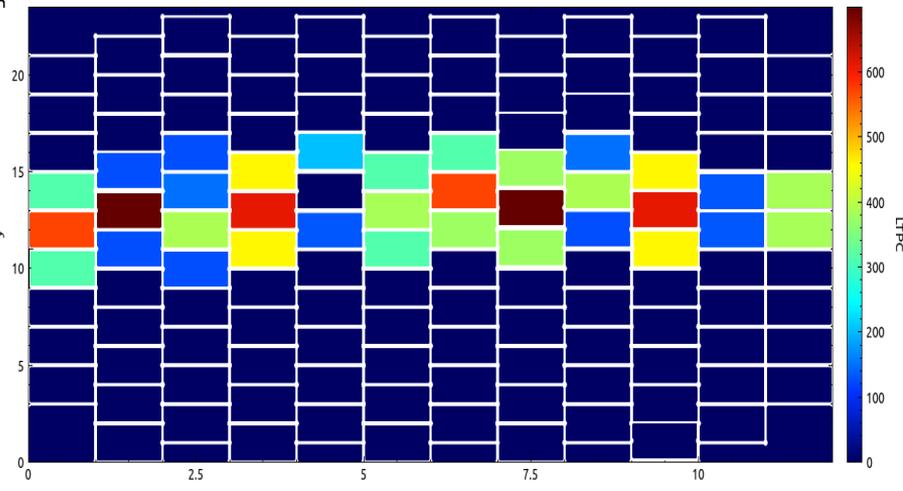


主要难点和解决的问题：（已完成）

- 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**
- 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12层Pad的测试探测器模型，利用激光束测量得到了径迹曲线，单点位置分辨 $<72\mu\text{m}@\sigma$ ，径迹重建位置分散 $126\mu\text{m}@\sigma$



IBF*Gain连续抑制方法示意图



子课题二：课题执行情况-读出芯片

- 为了实现高动量分辨，CEPC-TPC读出pad面积很小，每个端面通道数达1M
- 国际上现有ASIC无法满足CEPC-TPC读出的低功耗要求，本课题实现单通道功耗小于5mW的读出ASIC芯片

	PASA/ALTRO	AFTER	Super-ALTRO	SAMPA
TPC	ALICE	T2K	ILC	ALICE upgrade
Pad size	4x7.5 mm ²	6.9x9.7 mm ²	1x6 mm ²	4x7.5 mm ²
Pad channels	5.7 x 10 ⁵	1.25 x 10 ⁵	1-2 x 10 ⁶	5.7 x 10 ⁵
Readout Chamber	MWPC	MicroMegas	GEM/MicroMegas	GEM
Gain	12mV/fC	18 mV/fC	12-27 mV/fC	20/30 mV/fC
Shaper	CR-(RC) ⁴	CR-(RC) ²	CR-(RC) ⁴	CR-(RC) ⁴
Peaking time	200 ns	100 ns	30-120 ns	80/160 ns
ENC	385 e	1000 e	520 e	482 e @ 180ns
Waveform Sampler	ADC	SCA	ADC	ADC
Sampling frequency	10MSPS	25MSPS	40MSPS	20MSPS
Dynamic range	10bit	10bit	10bit	10bit
Power consumption	32mW/ch	6.2-7.5mW/ch	47.3mW/ch	8mW/ch
CMOS Process	250 nm	350 nm	130 nm	130nm

子课题二：课题执行情况-读出芯片

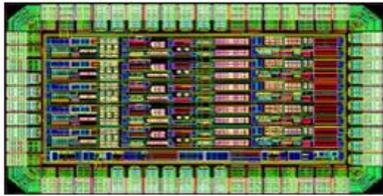
技术方案和创新性：

- 采用更加先进的65nm CMOS工艺
- 减少模拟电路，采用一阶CR-RC成形和SAR ADC结构，更多功能由数字电路实现

目前取得的进展：

- 完成基于65nm低功耗高集成度TPC读出ASIC第一次流片
- 模拟前端（AFE）和逐次逼近（SAR）型ADC原型芯片的测试，各项性能指标达到设计要求，**单通道功耗分别为2.18mW和1mW，显著低于现有芯片功耗**

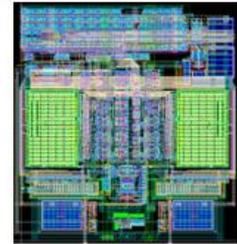
AFE



1320um x 838um

	Specifications	Test Results
Gain	10mV/fC	10.5mV/fC
Dynamic Range	120fC	>120fC
INL	<1%	0.41%
Power consumption	2.50mW/ch	2.18mW/ch
ENC	500e @ 10pF	448e @ 10pF
Xtalk	<1%	<0.36%

SAR-ADC



90um x 97um

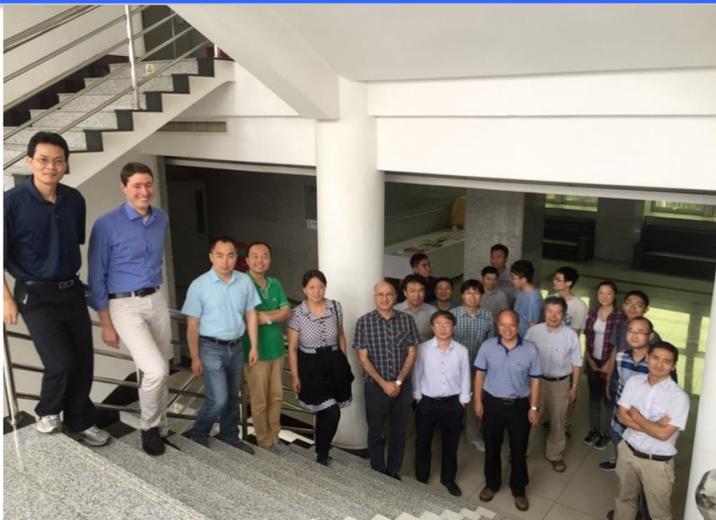
	Specifications	Test Results
Sampling rate	40 MSPS	50 MSPS
Resolution	10 bit	10 bit
INL	<0.65 LBS	<0.5 LSB
DNL	<0.6 LSB	<0.5 LSB
ENOB	>9 bit	9.18 bit
Power consumption	<2.5 mW/ch	1 mW/ch

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，实现中期目标
 - 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ASIC芯片的设计与评测（模拟前端+ADC混合，抗辐照性能等）
 - 发表SCI文章5篇（中期目标：2篇论文）
 - 毕业博士生一名（张余炼）

- 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)
- Haiyun Wang, Qi Huirong, etc., Investigation of the signal and the pointing accuracy of UV laser in Micro-pattern gaseous detector, Acta Phys. Sin.(待发表)
- Haiyun Wang, Qi Huirong, etc., Design and study of the TPC detector module and prototype for CEPC, International Journal of Modern Physics A (待发表)

子课题二： 国际专家评估报告



国际评估
专家列表
4国际
3国内

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√

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.

- 国际专家总体评估意见：从原型机的测试模块得到的结果来看，对于过去两年的工作基于肯定。
- 在两年多时间内，研究小组从CEPC TPC需求出发，研制和验证复合结构探测器模块，进展良好。
- 对于下一步的研究，提出需要从宇宙线、粒子径迹等开始激光系统的畸变定量测试验证研究。

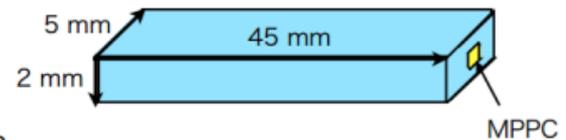
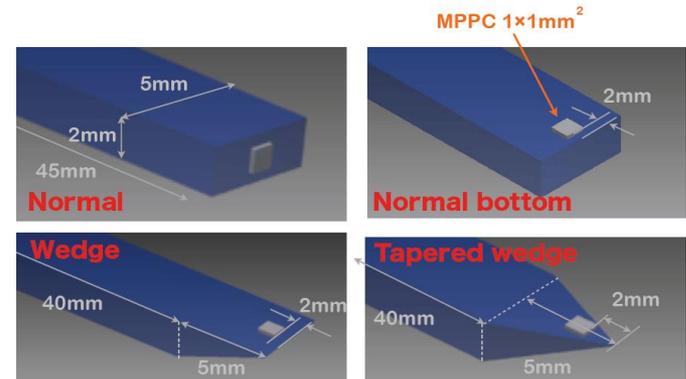
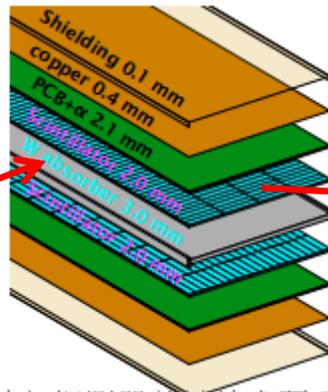
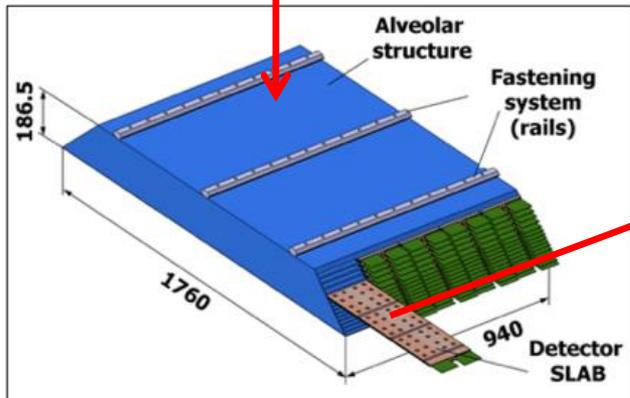
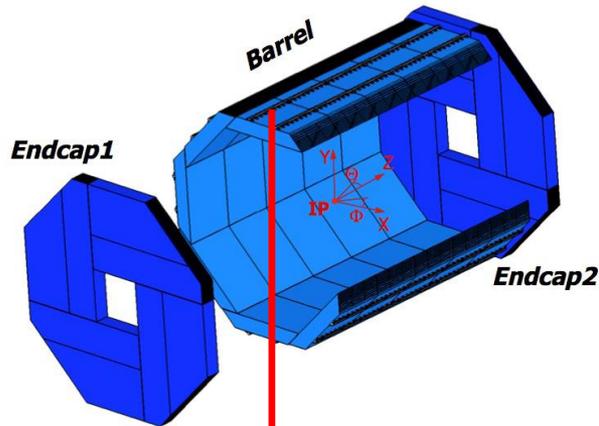
子课题二：下一步研究计划

- 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芯片的研制好于预期 ($\sim 3\text{mW/ch}$)，但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：

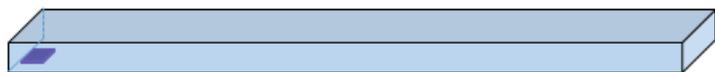
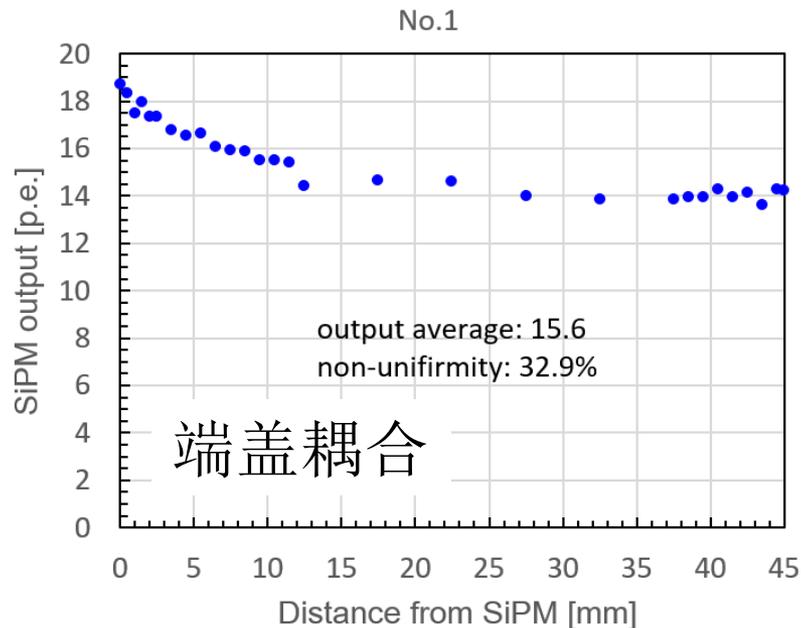
- (1) 解决基于SiPM读出电磁量能器的技术选型问题；
- (2) 实现电磁量能器读出单元颗粒度达到 $5 \times 5 \text{ mm}^2$ ；
- (3) 研制小型电磁量能器原理样机；
- (4) 针对CEPC的特点，研制一套基于两相二氧化碳制冷的主动散热系统，在 -20°C 下，导热量大于 30 mW/cm^2 ；
- (5) 发表2-3篇论文。



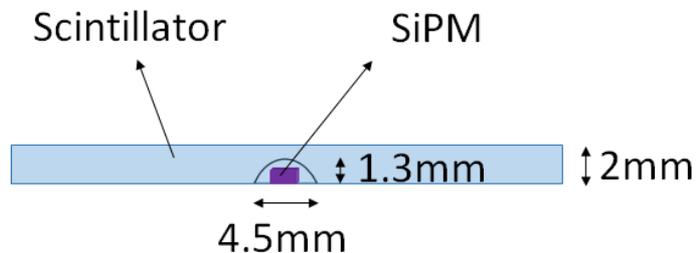
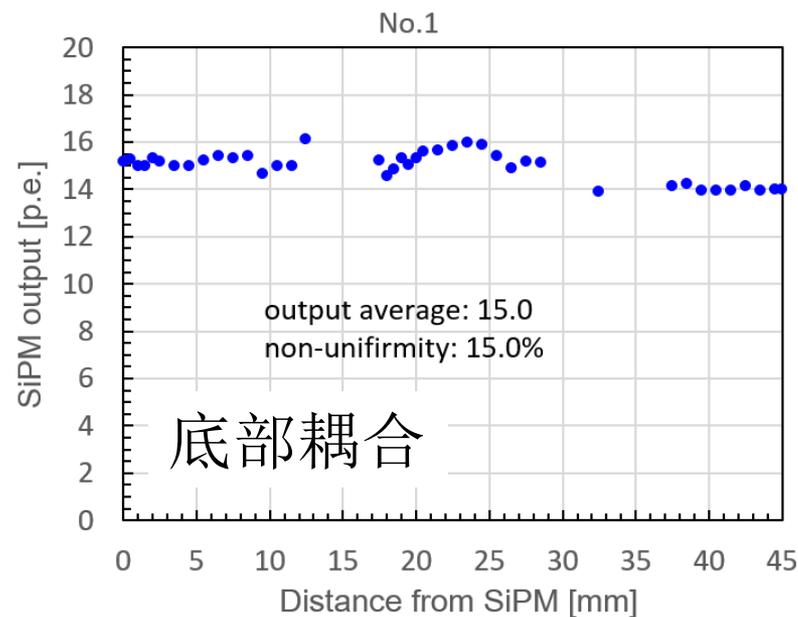
基于塑料闪烁体和
硅光电探测器

亮点I: 塑闪与SiPM耦合方式改进

➤ 塑料闪烁体性能测试和结构优化



10 μm pitch SiPM



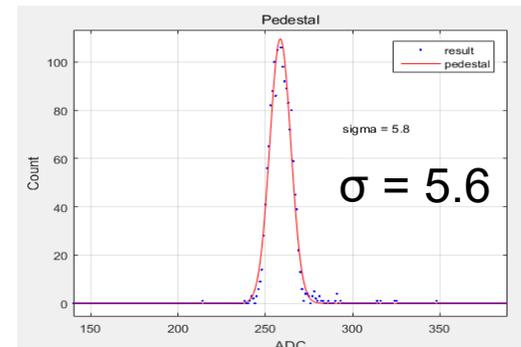
- Output: ~ 16 p.e.
- Non-uniformity: $\sim 30\% \rightarrow 15\%$

电子学板设计

- 响应范围: $\sim 100\text{fC} \sim 200\text{pC}$
- 通道数: 36
- 死时间: 2ms
- 响应极性: positive
- 功耗: 8mW/channel



SPIROC 芯片



芯片噪声

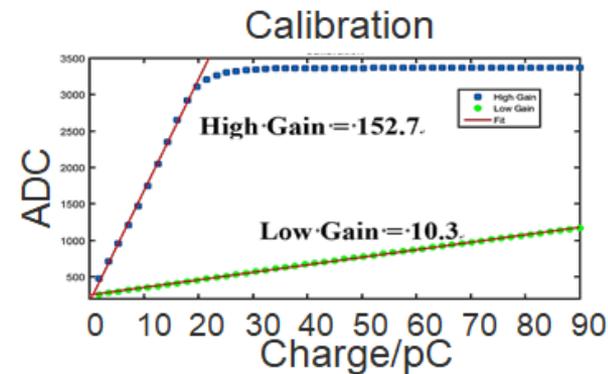
FEB



DIF



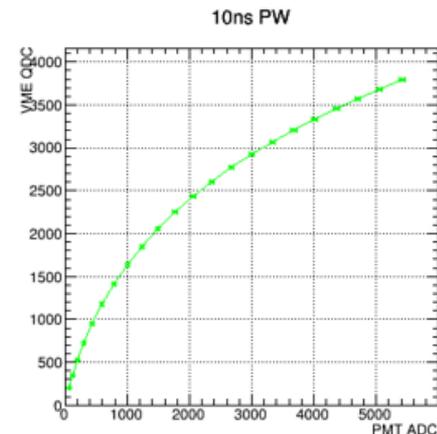
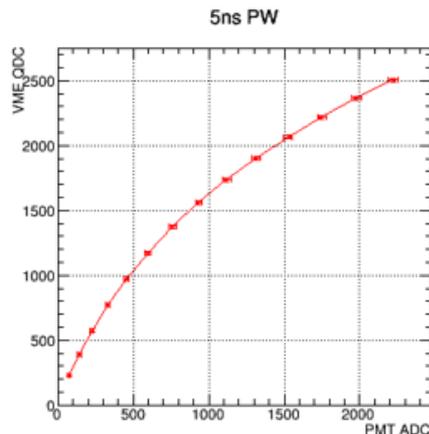
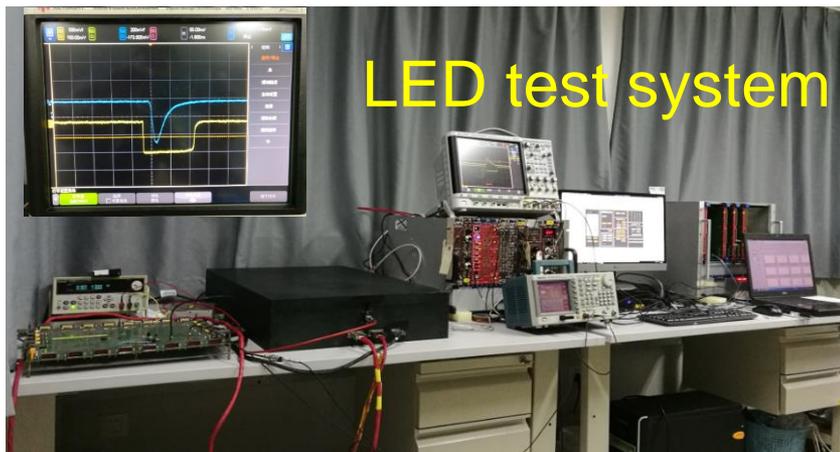
Test Platform



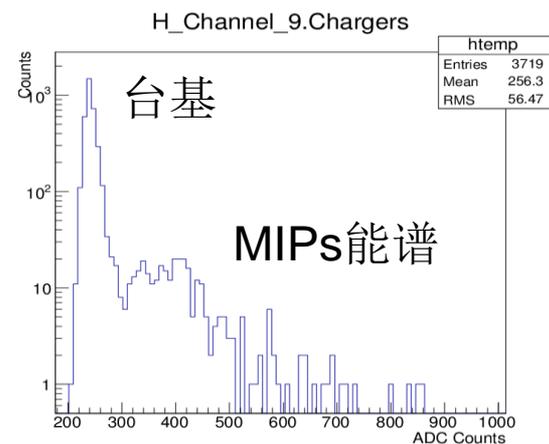
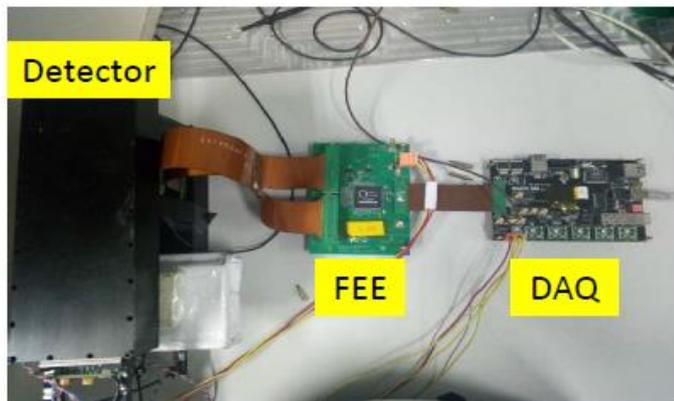
基于SPIROC2B和2E芯片分别开发了前端读出电子学板!

建立LED光源和宇宙线测试平台

- 建立LED光源系统，对SiPM性能进行测试

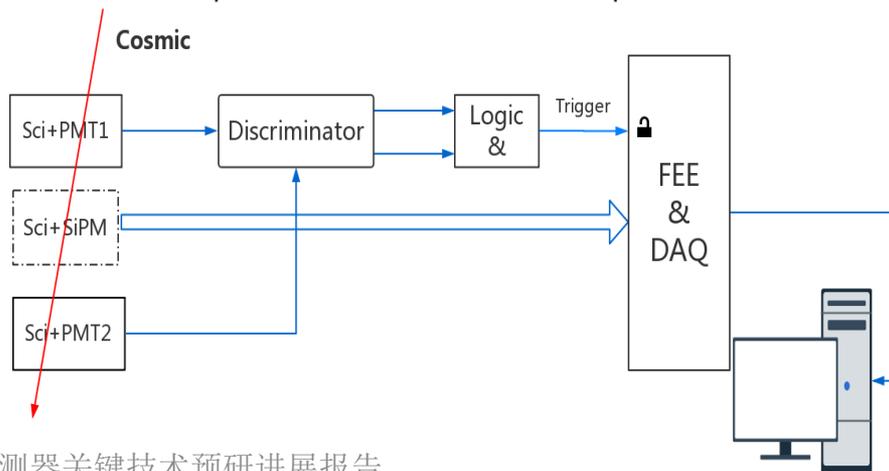
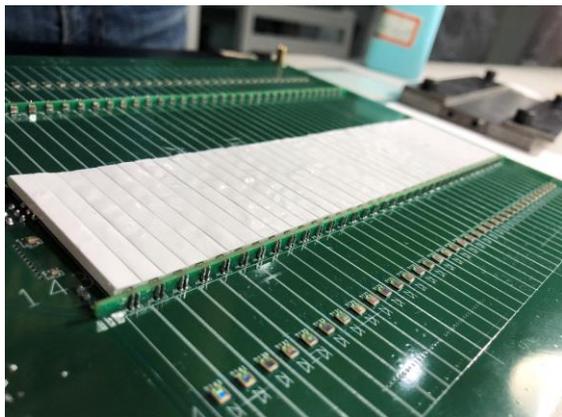
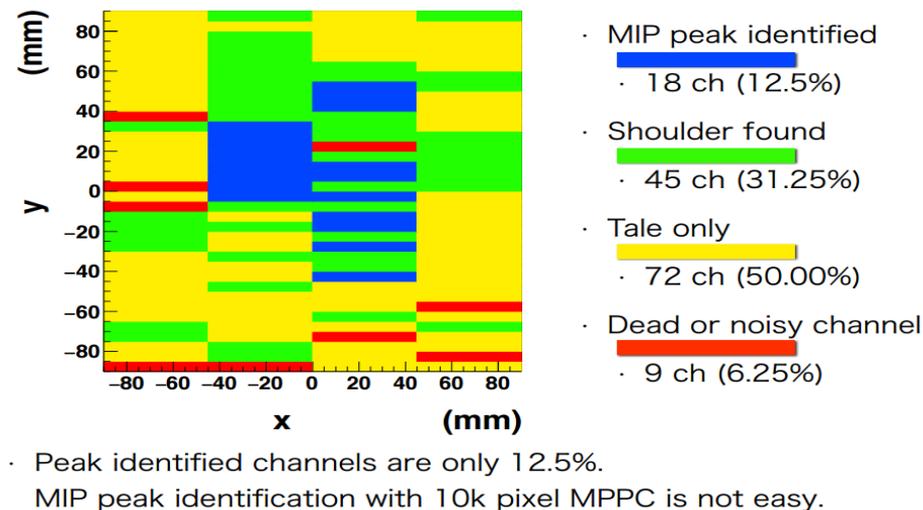
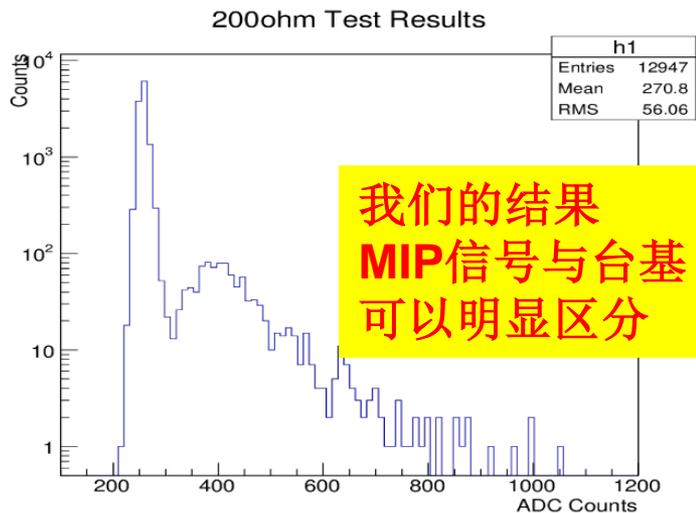


- 建立宇宙线测试平台，开展宇宙线测试



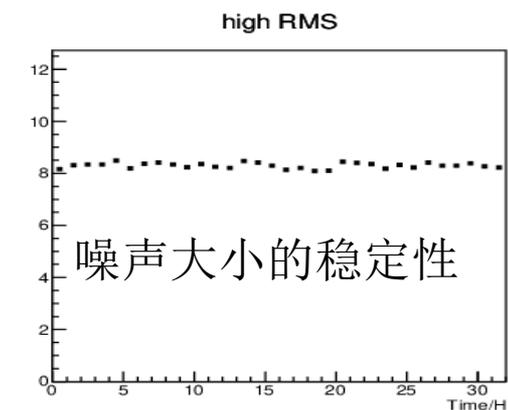
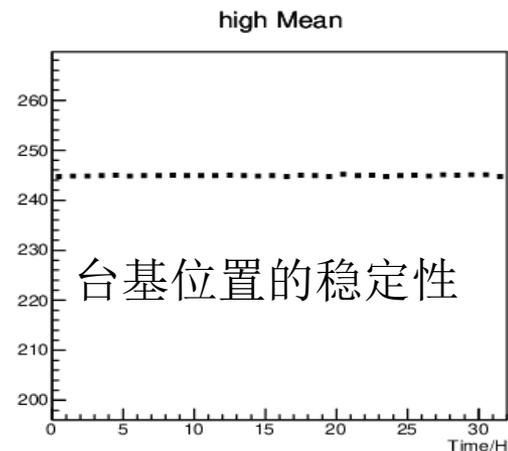
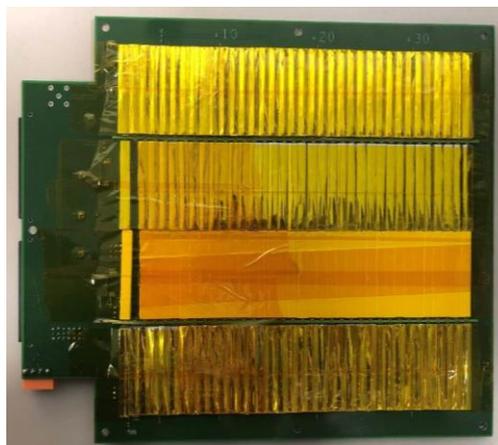
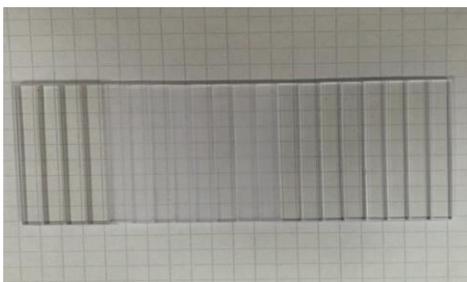
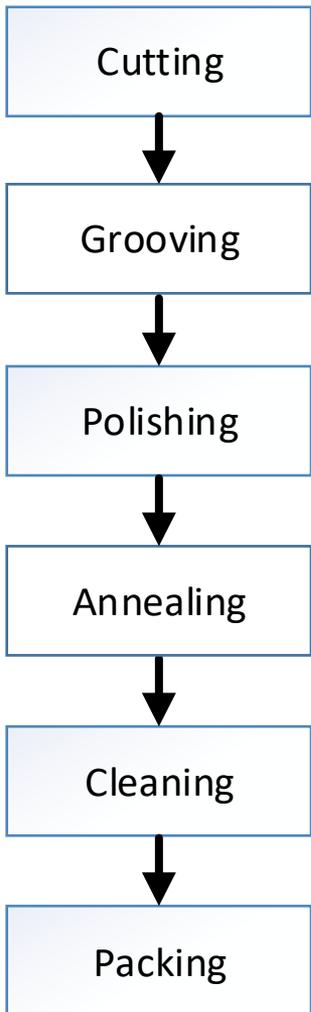
亮点II: 宇宙线测试结果

- 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 (右上图, 12.5%) 效果更好!



单层样机的制作

- 制作单层样机并进行测试，为下一步30层电磁量能器原理样机积累经验

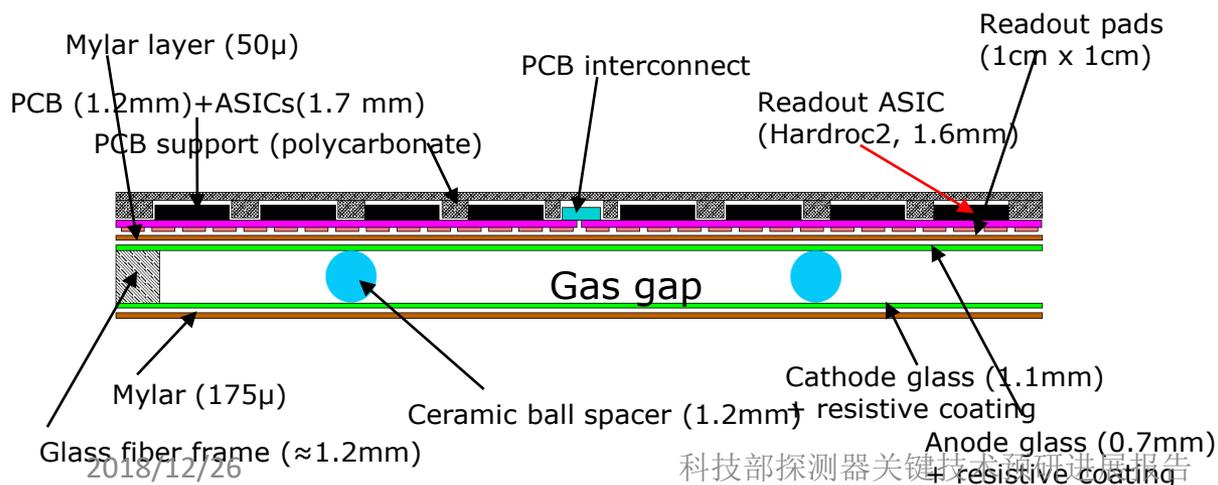


子课题三：强子量能器研究目标

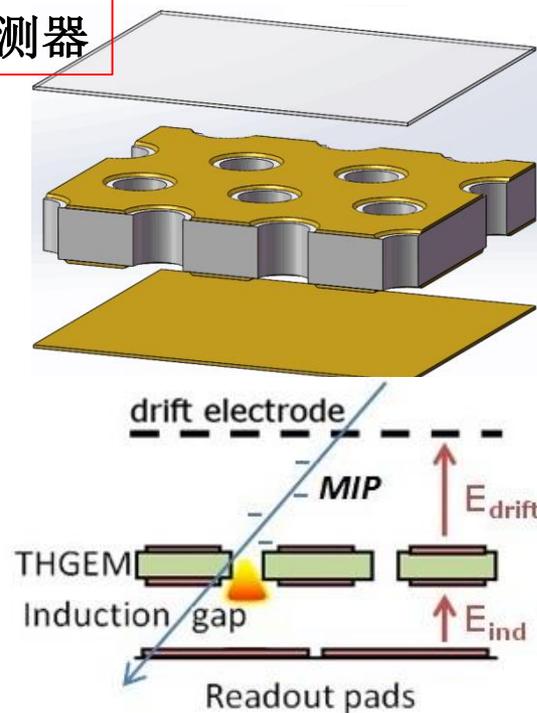
研究目标和考核指标：

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 1MHz/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-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；

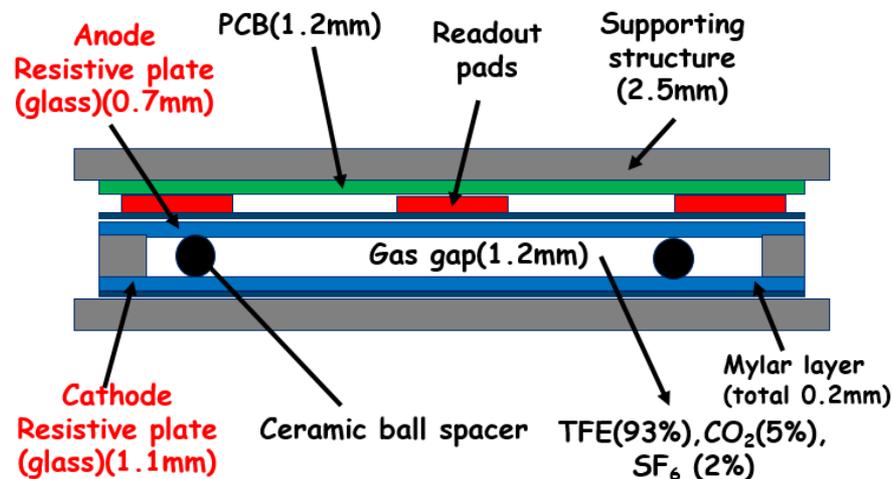
($0.12\lambda_I, 1.14X_0$)

Stainless steel Absorber(15mm)

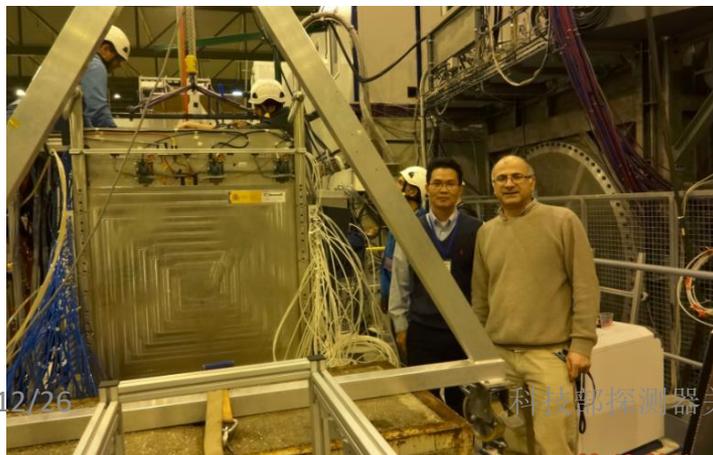
Stainless steel wall(2.5mm)

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

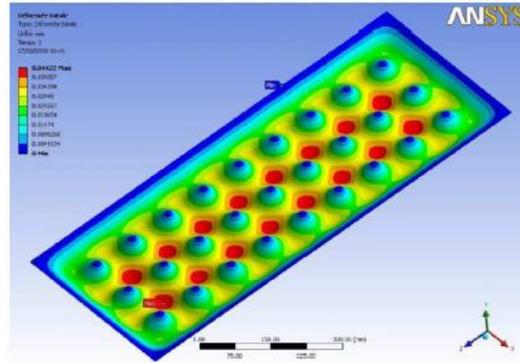
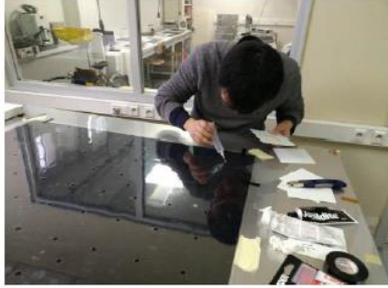
Stainless steel wall(2.5mm)



ASIC HARDROC(64ch), three-threshold



子课题三：强子量能器进展-RPC制作

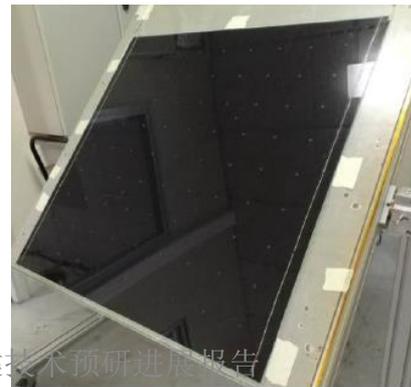


The maximum deformation is about 44 microns

Place spacers



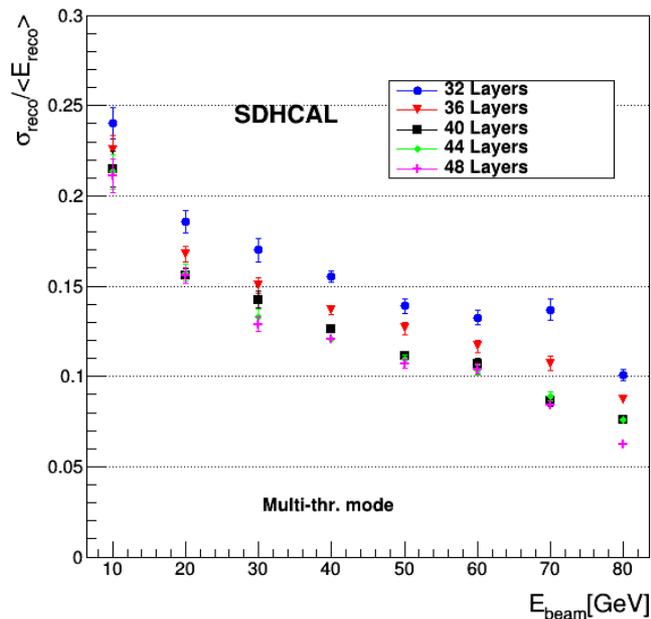
Sealing chambers



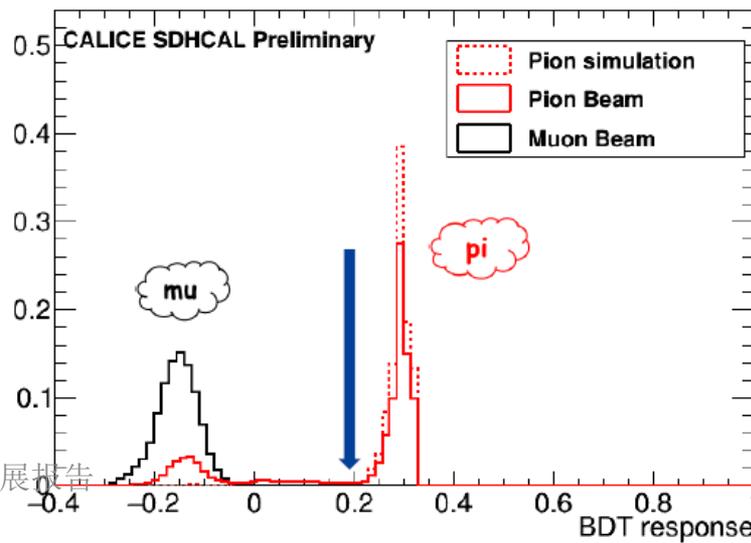
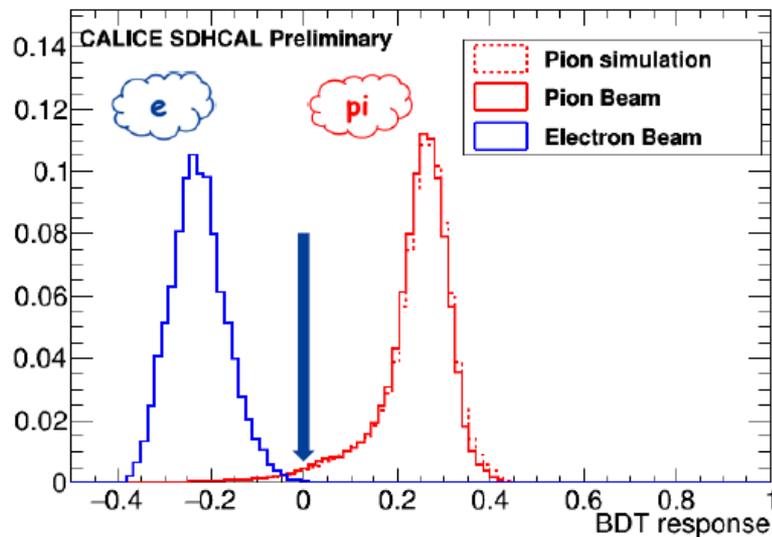
Gas can arrive at almost all point in 5s using LMA (Least Mean Age) model

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4次。



CERN SPS 束流测试数据:
强子束流 @ 10 - 80 GeV



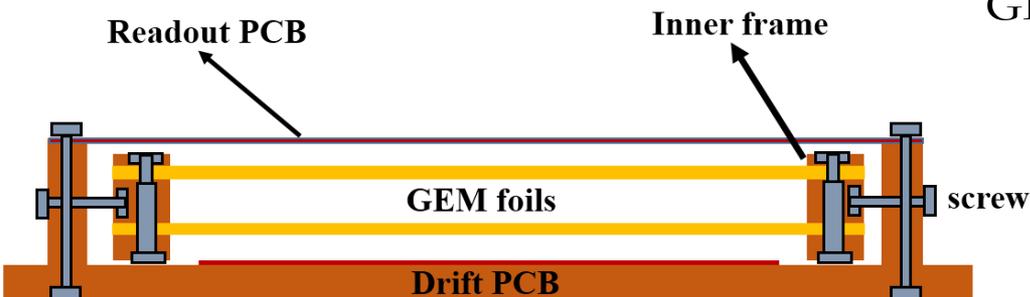
→ SDHCAL 探测器层数优化，对于CEPC
喷注能量较低时，40层探测器性价比较好。

子课题三：强子量能器进展-GEM

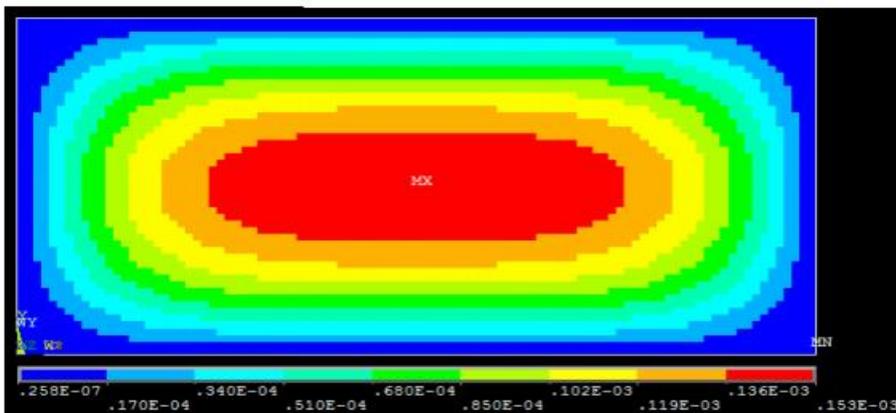
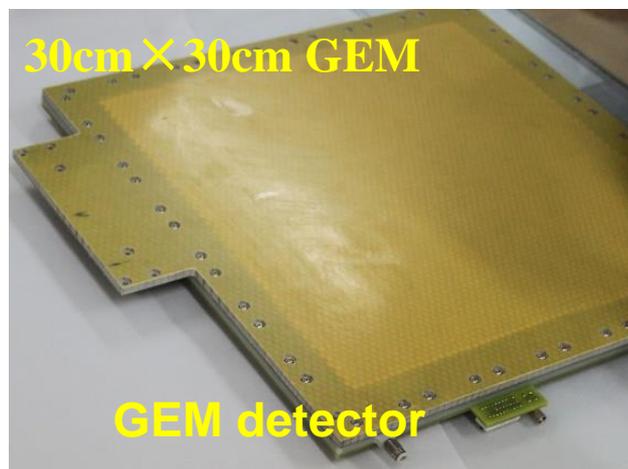
GEM-SDHCAL

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



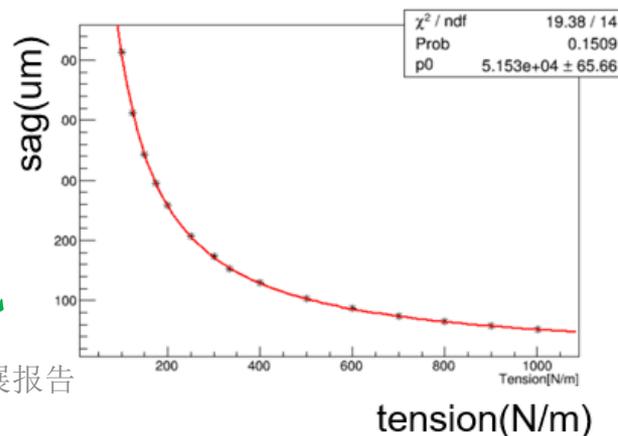
单层GEM膜在张力、重力及电场力下垂直形变图



100cm × 50cm GEM膜形变模拟

2018/12/26

最大形变随张力变化



科技部探测器关键技术预研进展报告

子课题三：强子量能器进展-GEM

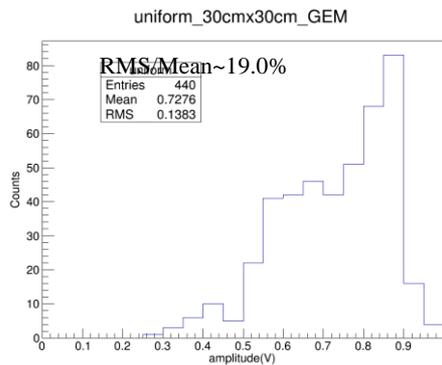
探测器和电子学联合调试

- 完成基于Microroc芯片的电子学读出系统的设计和制作。

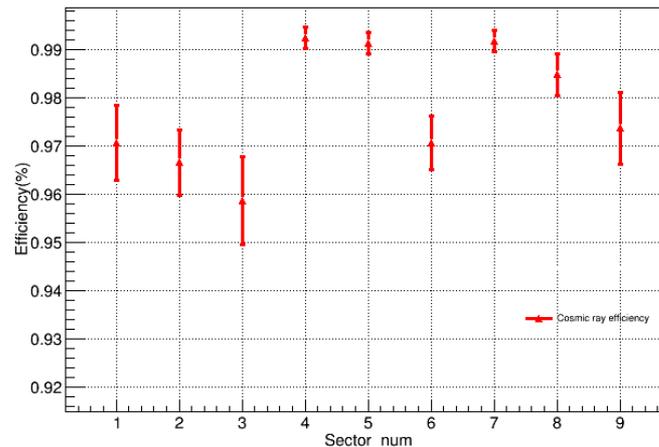
测试结果（气体：70%Ar+30%CO₂）

- ✓ 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)

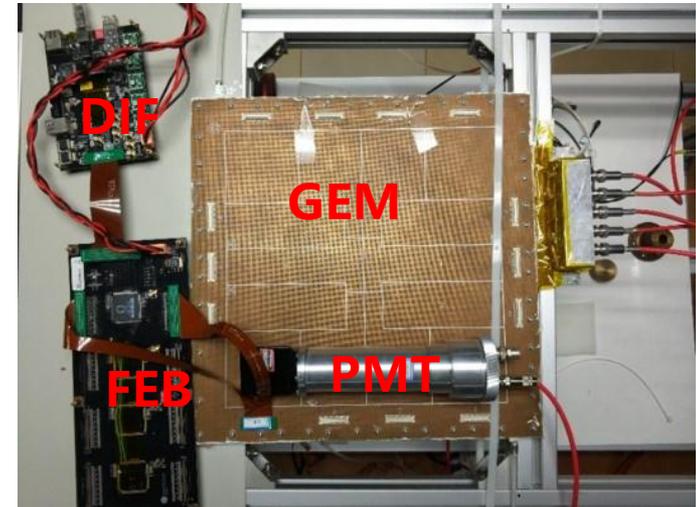
均匀性测试结果



cosmic ray efficiency test



GEM探测器及读出电子学
30cm×30cm GEM 阳极板

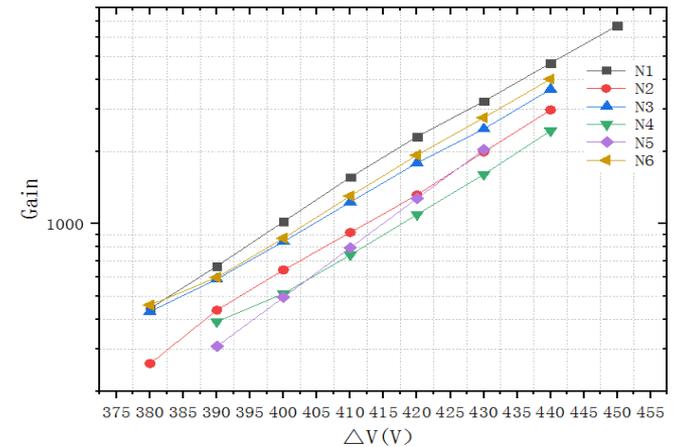


- 30cm×30cm分区扫描。每10cm×10cm扫一个点共9个点
- GEM探测器对MIP的探测效率 > 95%

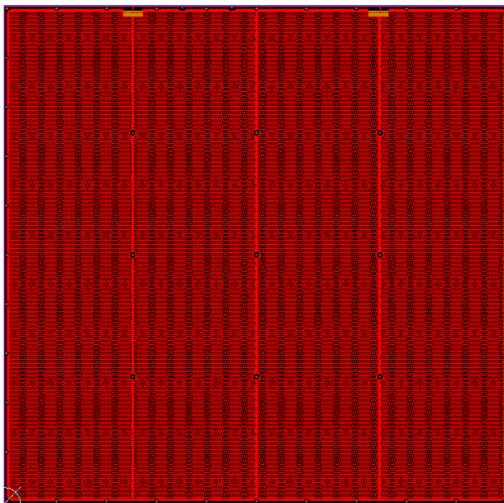
子课题三：强子量能器进展-THGEM

- 进行了最新型的大面积M-THGEM探测器的研究，进行了两次批量生产，经过技术改造，第二批达到了很好的效果；
- 采用M-THGEM结构，厚度可以达到6mm的要求，同时又有较大的气体放大倍数，达7000倍；
- 测量了大量的实验数据，结果比较乐观；
- 开始了50cm×50cm的THGEM的设计；

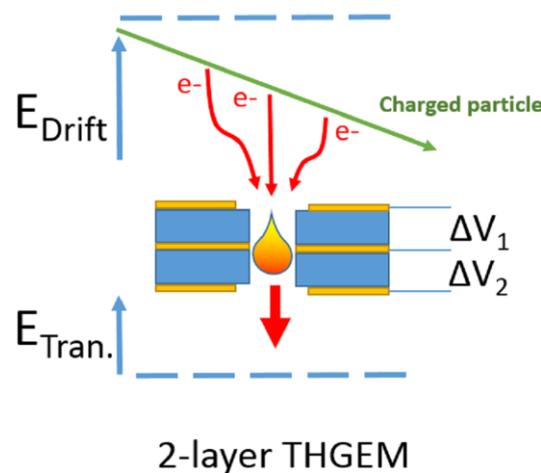
气体放大倍数达7000倍



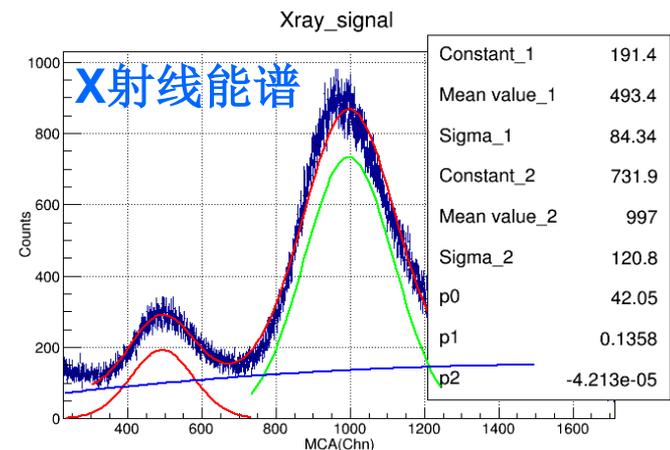
第二批M-THGEM的增益曲线



50cm×50cm的M-THGEM设计



M-THGEM探测器结构



X射线能谱

子课题三： 论文发表和学生培养

- Development of a double-GEM detector using the self-stretching technique for digital hadron calorimetry, W. You, Y. Zhou et.al., JINST 13 P01020, 2018
- 夏莉, 俞伯祥等, 薄型较大面积THGEM气体探测器的研制, 《核电子学与探测技术》, 2017 (3) :237-241
- 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).
- Particle Flow Oriented Electromagnetic Calorimeter Optimization for the Circular Electron Positron Collider. H.Zhao, C.Fu, D.Yu, Z.Wang, T.Hu, M. Ruan. JINST, 13 P03010, 2018
- R&D of the CEPC scintillator-tungsten ECAL. MingYi Dong et.al.. JINST 13 C03024, 2018
- Studies of the detector cells in hadronic calorimeter based on plastic scintillators, RDTM (2018) 2:22

➔ 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

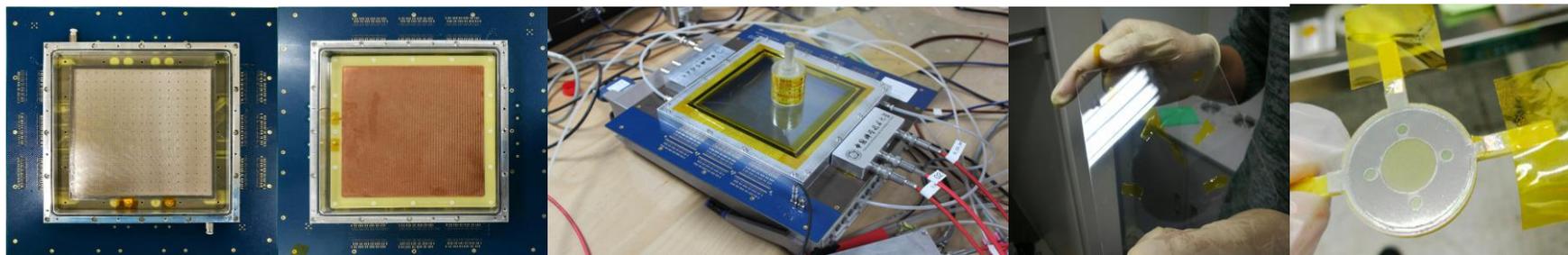
- 将前端读出集成到探测器读出阳极板，开始准备 $0.5\text{m} \times 1\text{m}$ GEM的制作，开展性能测试。
- 测试完成结构改造后的 $20\text{cm} \times 20\text{cm}$ THGEM 的各项性能；准备制作 $0.5\text{m} \times 1\text{m}$ 的THGEM探测单元。
- 准备制作 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 的RPC探测单元，分析SDHCAL束流测试数据，预计发表论文1篇。
- 开展ECAL原理样机的研制和支撑结构设计，安排和准备束流测试。
- 根据国际评估专家组建议：积极与国际同行开展交流与合作，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：PID主要研究进展

光灵敏探测器中的关键技术研究：

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 (~ 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×150mm样机尺寸探测器研制 (THGEM+ Micromegas 和DMM两种方案)



15cm×15 cm 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。

论文：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.

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)

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 (~ 0.0005) 的高增益的DMM检测器结构的原型，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CaF₂或MgF₂改善窗材料。
- 需分析RICH的光子探测效率和 π^0 探测效率，死区和死时间的影响。

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）；根据专家评估意见进行研讨和改进。
- 2018年8月初进行科技部项目中期进展汇报
- 参加骨干14人：4正高、8副高、2中级
团队成员：4职工、2初级，5博士后、27研究生
- 到账经费1358.2万，累计支出约600万，执行率约45%
- 发表了10篇SCI论文，已培养2名博士生和6名硕士生

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
和关键技术预研究进展汇报

课题四：探测器关键技术预研

谢谢大家！



Backup Slides

子课题一：研究团队和成果

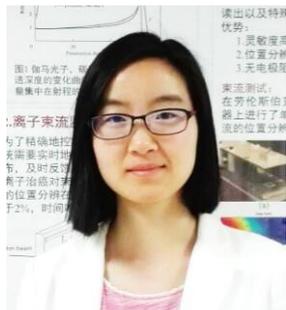
华中师范大学：

高能物理研究所：

专用实验室（软硬件条件）



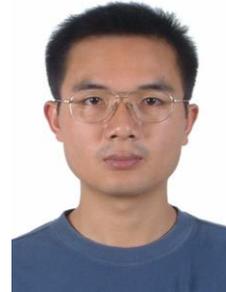
孙向明（教授）



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：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。

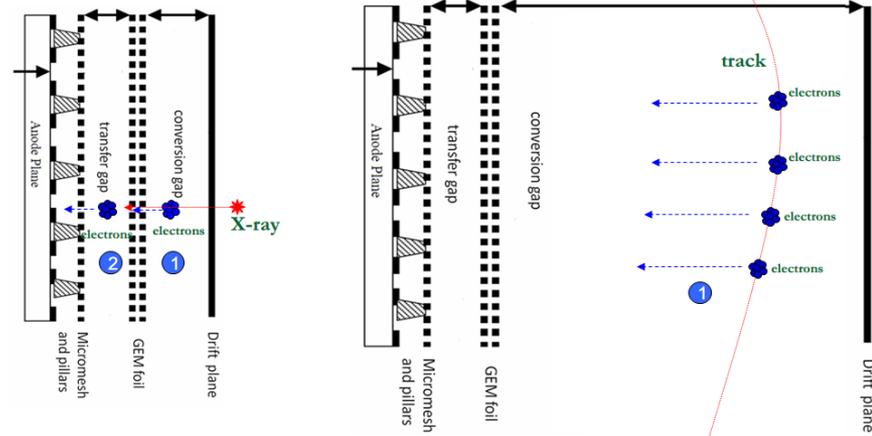
中期目标：确定芯片电路设计方案，测试读出模块，完成项目方案评估。

子课题二： 测试进展

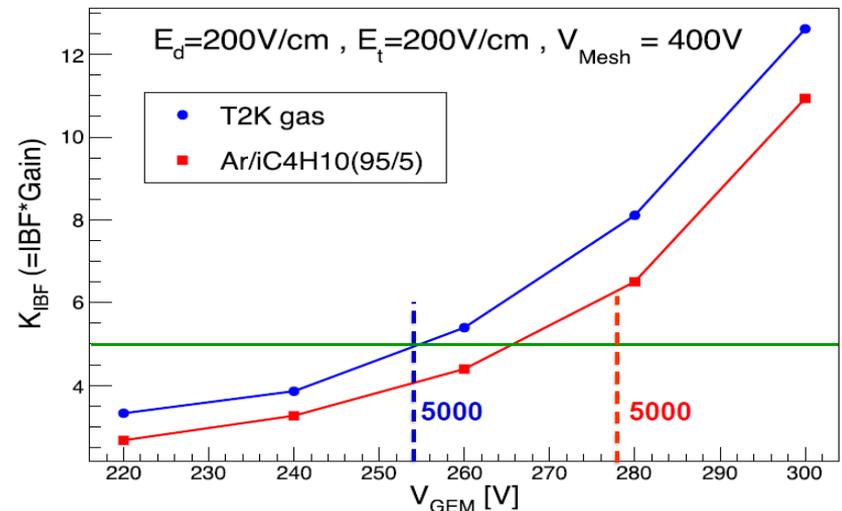


主要难点和解决的问题：（已完成）

- 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



长短漂移距离连续抑制方法示意图



探测器测试及结果

子课题三：量能器研究团队



王志刚 (高能所)

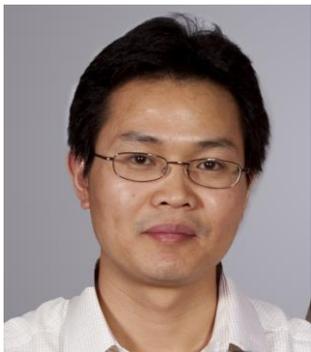


张云龙 (科大)



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)

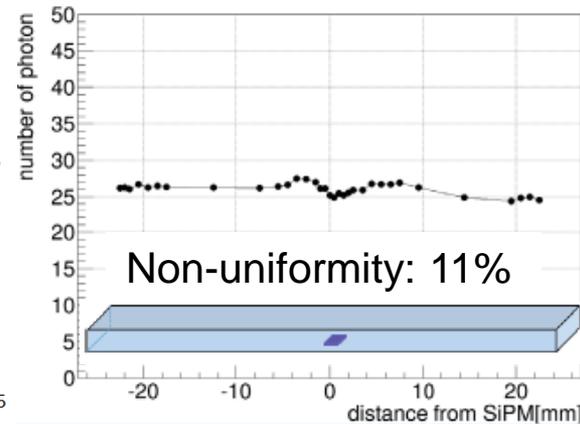
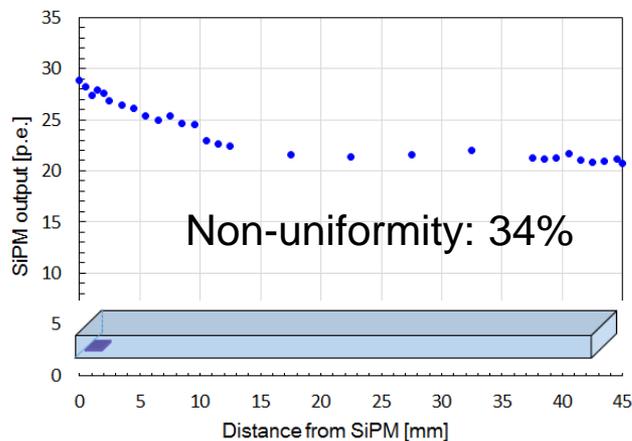
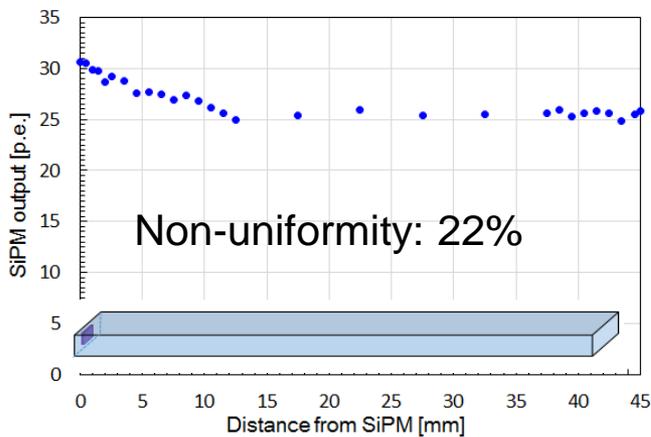
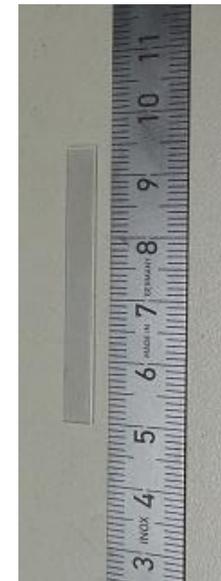
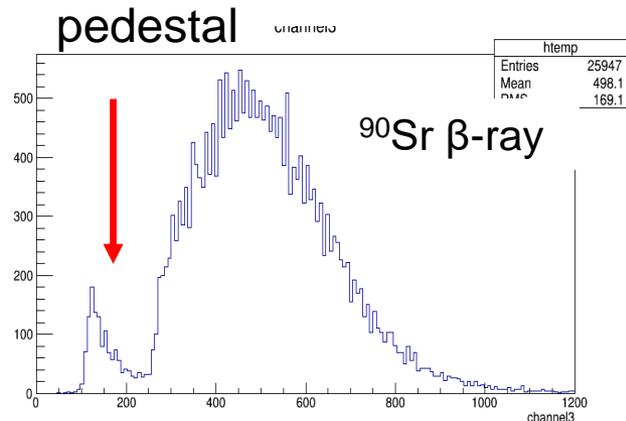
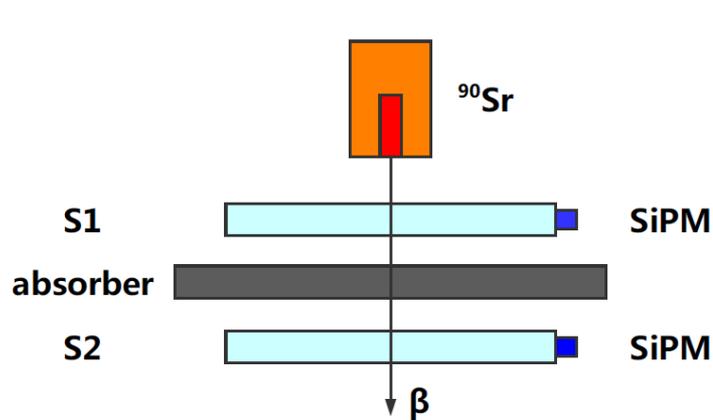


刘建北 (科大)

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

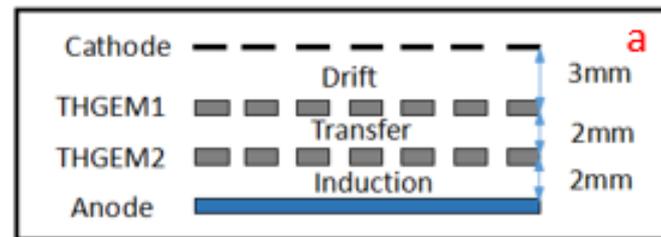
塑闪灵敏单元性能优化

➤ 塑料闪烁体性能测试和结构优化

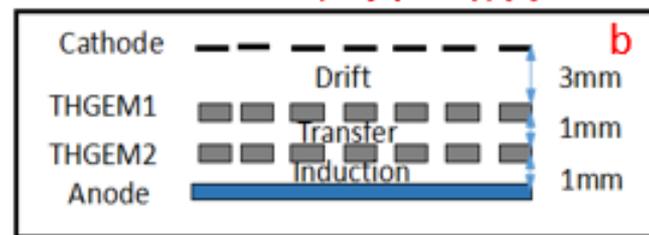


子课题三：强子量能器进展-THGEM

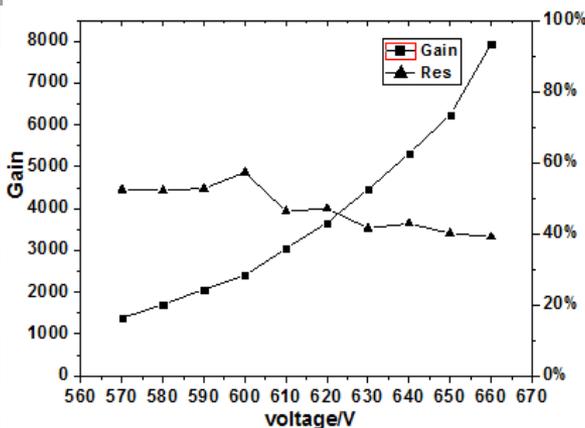
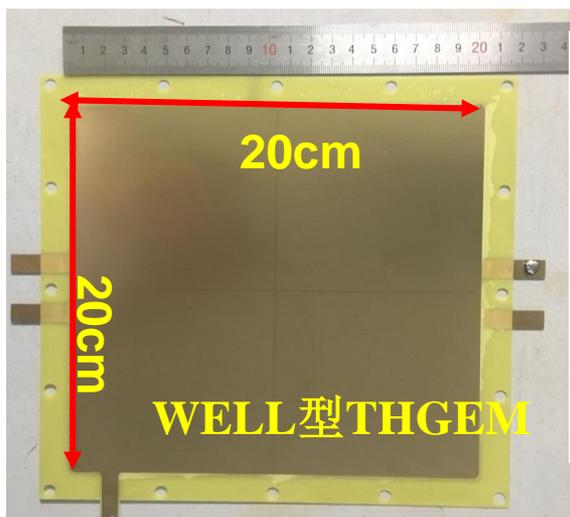
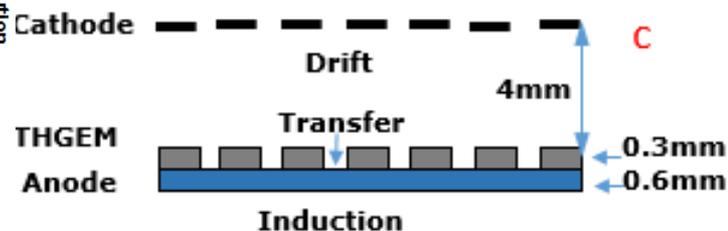
- 为了减少THGEM探测器厚度，结构改进两次；
- 采用WELL-THGEM结构，厚度达到6mm的要求；
- 完成第一个WELL-THGEM探测器的制作和测试。
- 完成ASIC (Gastone) 电子学模块制作和测试
- 软件多路读出，能获取WELL-THGEM探测器信号，需要进一步调试。



原THGEM探测器结构



改进型THGEM探测器结构



WELL-THGEM Gain 曲线

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。

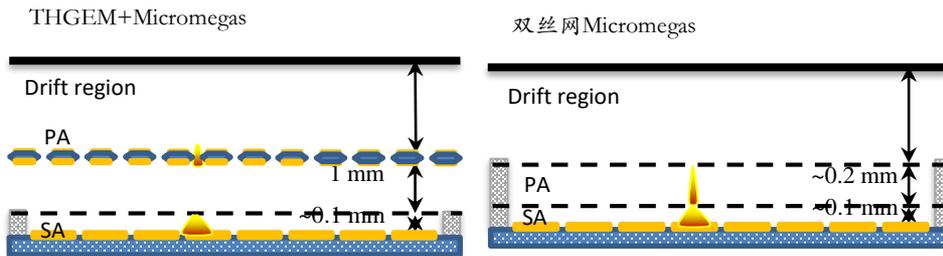
学生培养：

1. 本科毕业论文1人；
2. 硕士毕业论文1人。

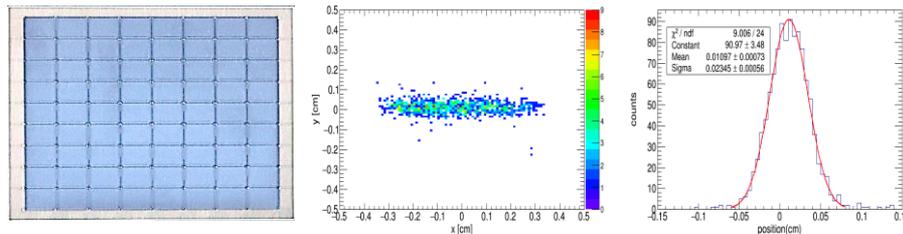
子课题四：主要进展和亮点工作

光灵敏探测器中的关键技术研究：

— 单光电子放大：提出了两种并行互补的光灵敏探测器的研制方案；



— 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 ~ 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 $1/25$ ；

论文：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.

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）

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。