



# 面向正负电子对撞机物理的时间投影室 径迹探测技术 (TPC) 研究进展

祁辉荣, 常悦, 喻丽雯, 余信, 原之洋, 代洪亮, 张建, 章红宇  
邓智, 李玉兰, 刘伟, 阮曼奇, 李刚, 伍灵慧, 陈元柏, 喻纯旭

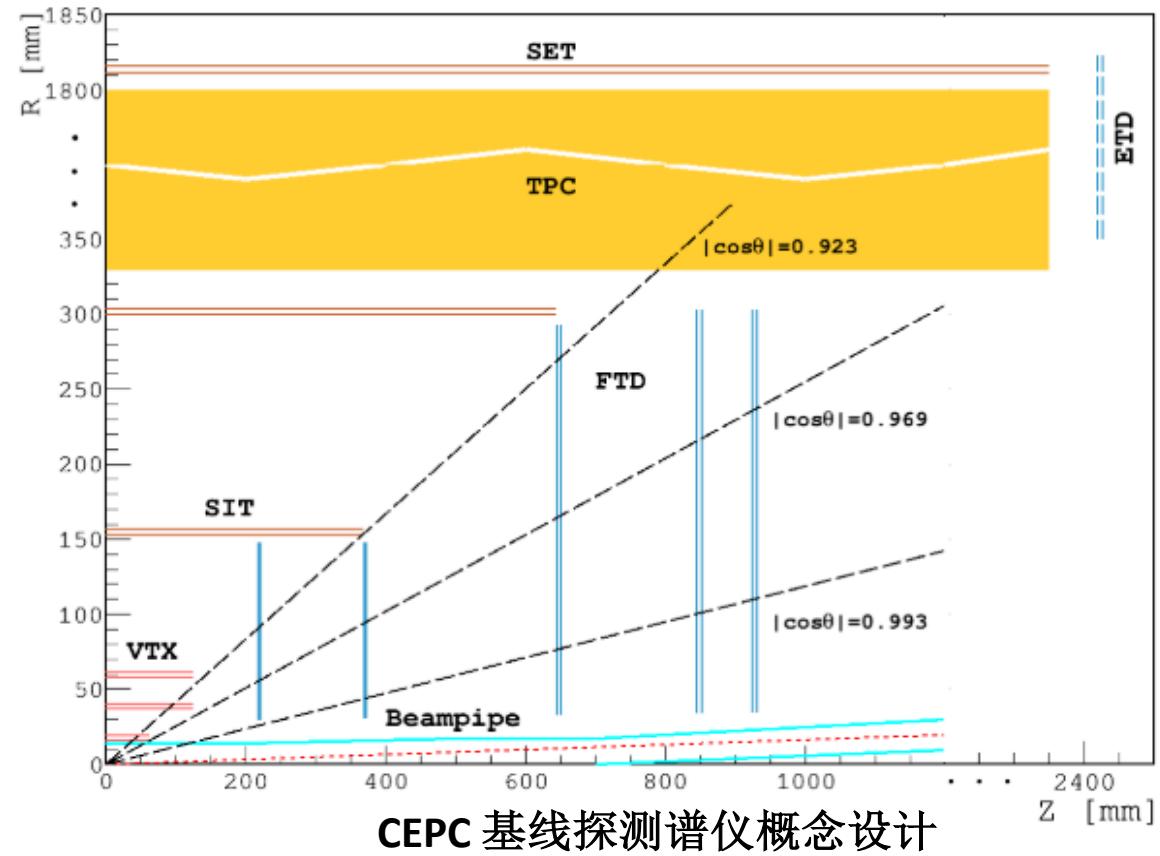
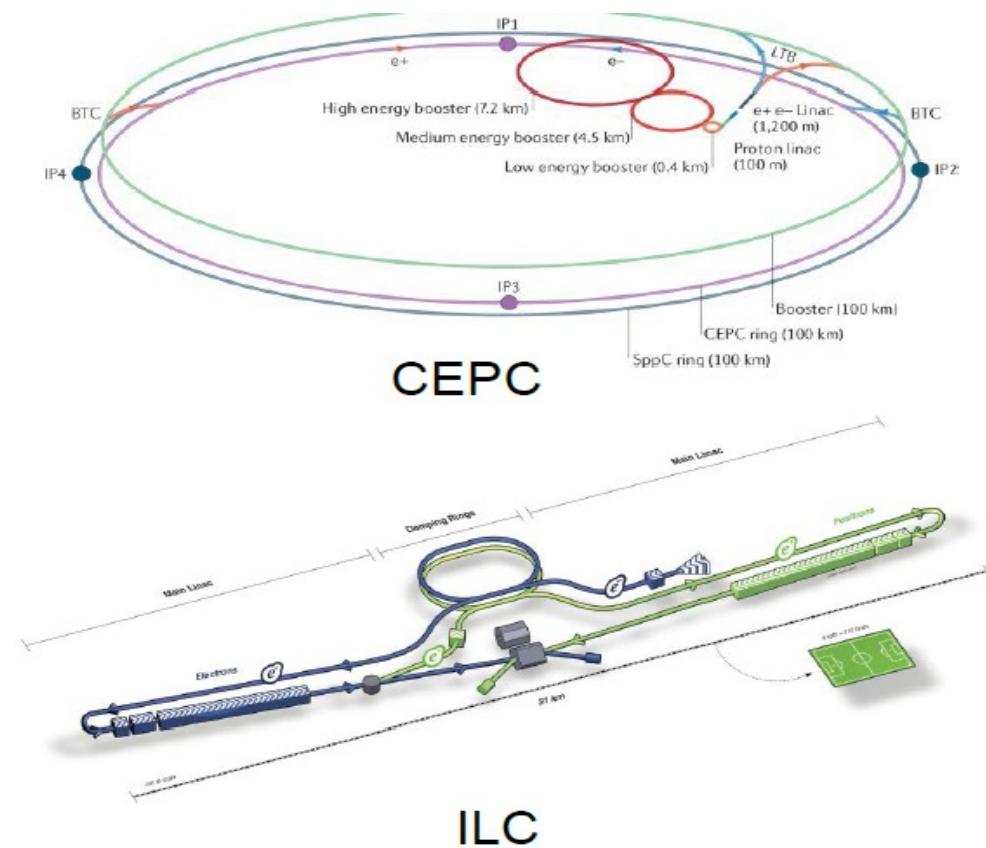
中国科学院高能物理研究所  
清华大学 南开大学

中国物理学会高能物理分会第十一届全国会员代表大会, 8月8-11, 2022

- 对撞机物理需求
- 时间投影室模块研究进展
- 时间投影室原型机研究进展
- 国际合作及研究计划
- 小结

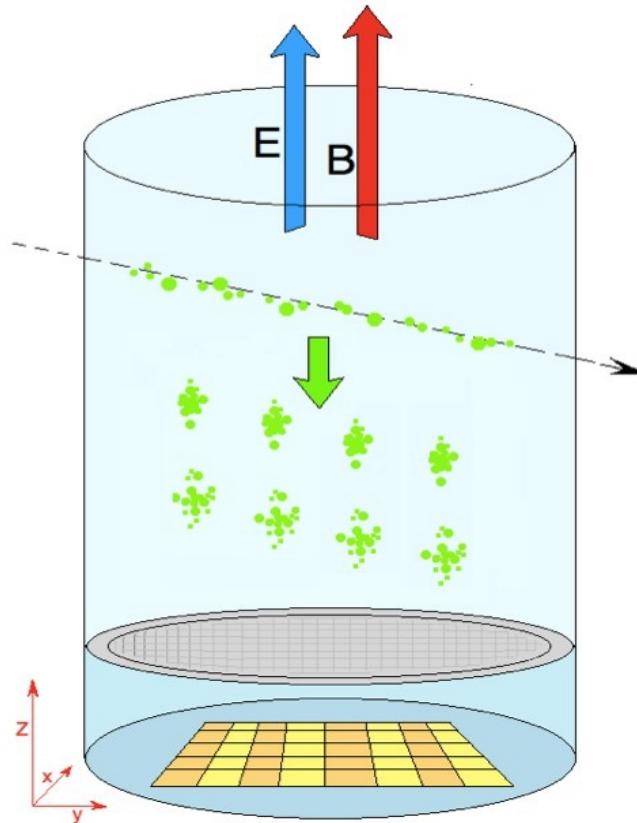
# 对撞机物理需求

- 高能正负电子对撞机径迹探测器需求不断提高，特别对于**低物质量**需求（会影响量能器）
- 动量分辨（Higgs物理） $10^{-4} (\text{GeV}/c)^{-1}$ （时间投影室本身）
- 粒子鉴别分辨能量（Z物理，高对撞亮度 $\sim 2 \times 10^{36}$ ） $\sim 2\%$
- 在**3Tesla** 和 2Tesla 磁场下，均实现米级的带电粒子的长径迹探测

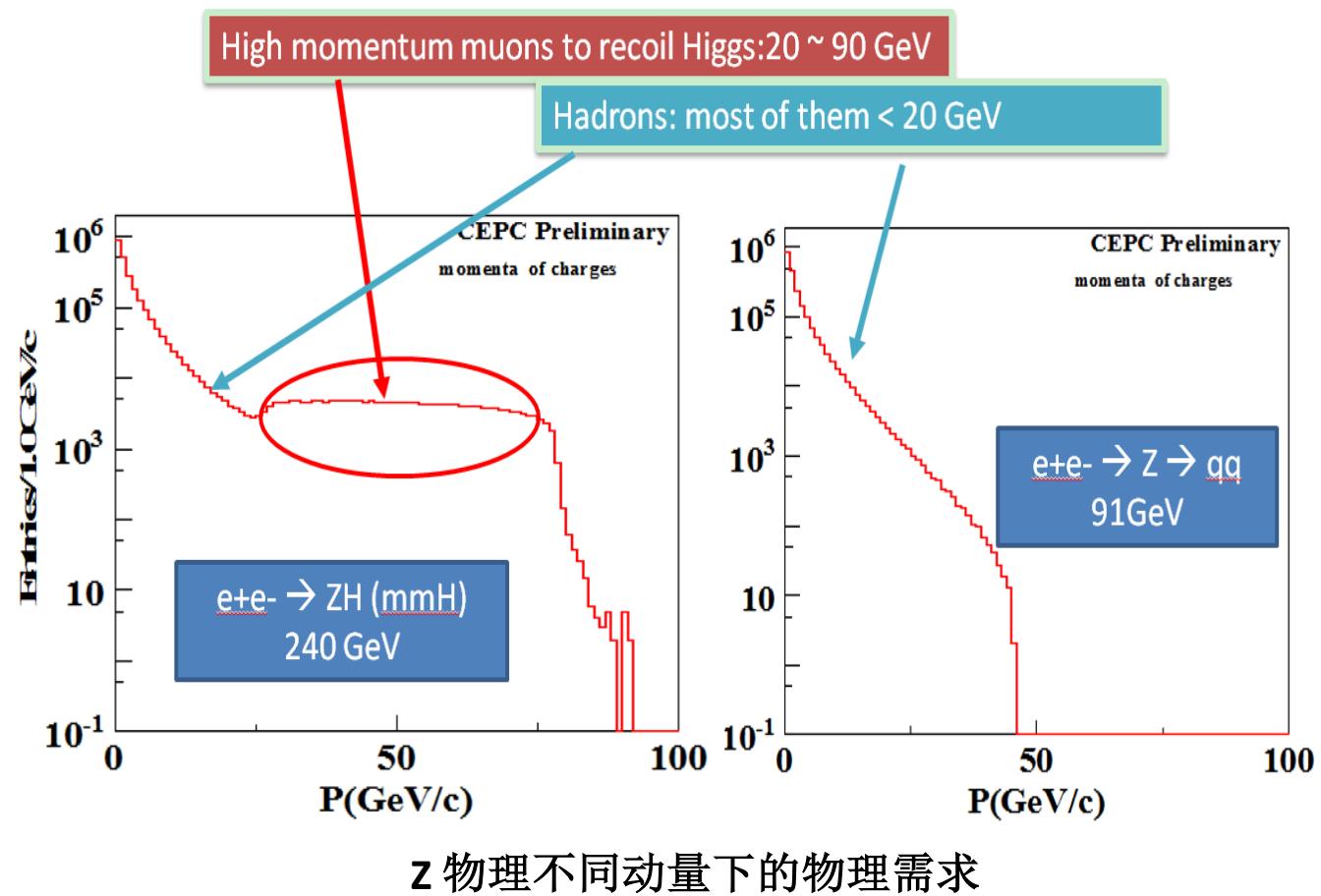


# 对撞机物理需求

- CEPC 是国际上正负电子对撞机项目的候选者之一，其基线探测器设计方案选用时间投影室 TPC 作为主径迹室，Higgs 物理（3 Tesla），Z pole 物理（2 Tesla）
- TPC 可提供与粒子流算法兼容的高分辨率 ( $dP/p \sim 0.1\%$ , 低物质量  $< 0.1X_0$ , 100  $\mu\text{m}$  位置分辨)



时间投影室TPC径迹探测示意图

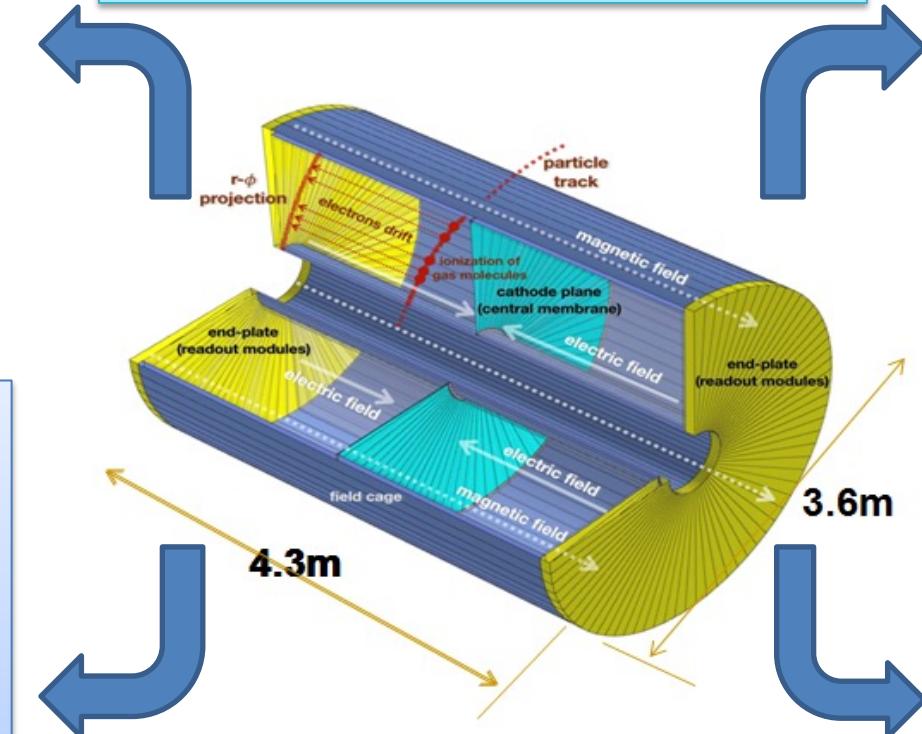


Z 物理不同动量下的物理需求

# 时间投影室关键技术研究热点问题

- 大尺寸型读出方法
- 面向Higgs物理需求
- $1\text{mm} \times 6\text{mm}$  Pad
- TPC 模块
- 集成UV激光的TPC原型机

时间投影室是正负电子对撞机  
一种主要径迹探测器技术



- 正离子反馈研究
- IBF模拟
- 对紫外激光光电效应产生的离子进行测试
- 实验研究

- 小像素尺寸型读出方法
- 面向Z物理需求
- $\sim 500\mu\text{m}$  Pad
- TPC 原型机与 UV 激光径迹
- $dN/dx + dE/dx$ 研究

- 粒子鉴别分辨研究
- 空间电离cluster模拟
- 不同读出结构的TPC原型机的PID研究
- 实验研究

- 面向CEPC的时间投影室研究进展
  - 感谢科技部重大研发计划项目支持 (NO.: 2016YFA0400400)
  - 感谢基金委重点基金项目支持 (NO.: 11535007)

# 时间投影室TPC模块研究 - 离子密度分布

- 时间投影室需要完成对于正离子控制的模拟研究和实验研究
- 实现正离子的有效控制和实验定量研究

## CEPC 对撞模式和本底:

- Higgs、W 和 Z 玻色子的 bunch 间距分别约为 760 ns、200 ns 和 25 ns
- $e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow q\bar{q}$  事例所产生的离子

## 离子密度分布:

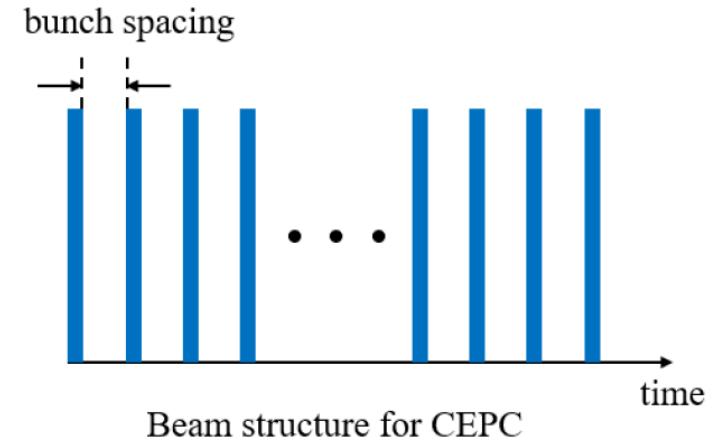
- 径向:  $L$  亮度、 $V_{ion}$  离子漂移速度、 $R$  事例率、 $k$  反馈正离子数

$$\rho = (1 + k) \frac{L}{V_{ion}/(ms^{-1})} \left( \frac{2.74 \times 10^{-3}}{r/mm - 97.9} - 1.25 \times 10^{-6} \right) [fC/mm^3]$$

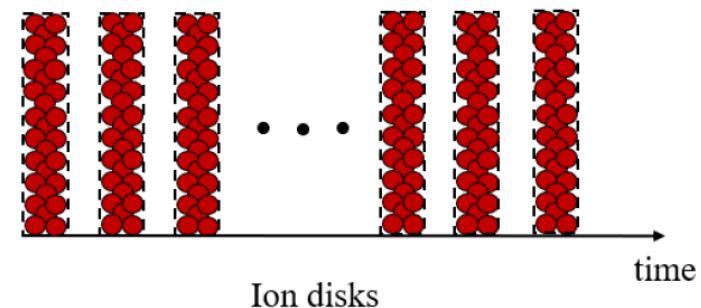
- 漂移方向: 近似成连续分布 (对于不同 bunch 间距乘以相应的比例系数)

Yuan Z, et al. Feasibility study of TPC detector at high luminosity Z pole on the circular collider[J]. IMPA, 2021, 36(22): 2142015.

束流结构示意图



离子层结构示意图



# 时间投影室TPC模块研究 – 电场分析

- 通过CEPC的对撞机设计参数与时间投影室的探测参数，在柱坐标下通过电场矢量分析给出时间投影室漂移区的离子密度影响

电场分析：  
矢量形式

柱坐标形式下

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon}$$

$$\phi(r, \theta, z) = \sum_{m=-\infty, \infty} \phi_m(r, z) e^{im\theta},$$

$$\phi_m(r, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_m(r, k) e^{ikz} dk,$$

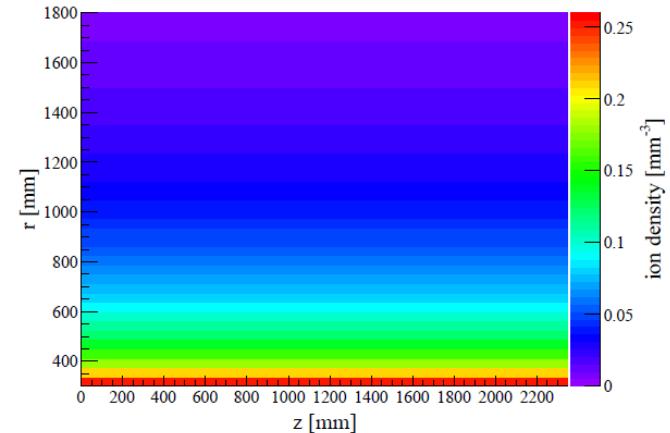
$$\Phi_m(r, k) = K_m(kr) \int_0^r R_m(r', k) I_m(kr') r' dr'$$

$$+ I_m(kr) \int_r^{\infty} R_m(r', k) K_m(kr') r' dr'$$

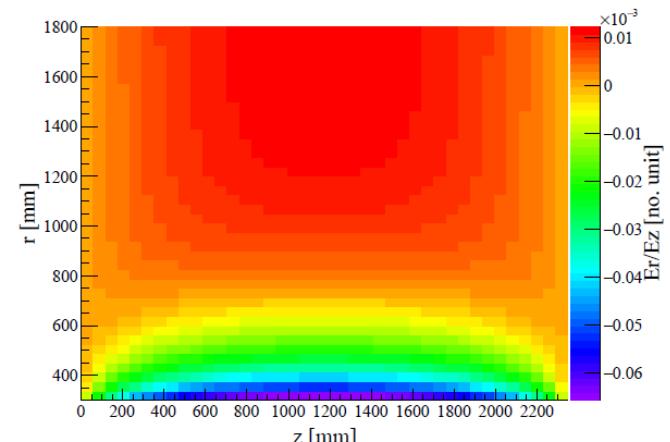
$$R_m(r', k) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \rho_m(r', z') e^{-ikz'} dz'$$

$$\rho_m(r', z') = \frac{1}{2\pi} \oint \frac{\rho(r', \theta', z')}{\epsilon_0} e^{-im\theta'} d\theta'$$

离子密度



$E_r/E_z$



# 时间投影室TPC模块研究 – 径迹畸变分析

- CEPC在 Z 物理和 Higgs 物理中的正离子反馈模拟结果

电子在电磁场中, 其运动方程为朗之万方程

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = q \cdot \vec{E} + q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) - k \cdot \vec{v}$$

探测器外加电场  $E$  和磁场  $B$  是平行的、 $E_{ion}$  漂移区离子层电场、 $E_{induced}$  探测器腔壁中感生电荷电场。电磁场矢量为:

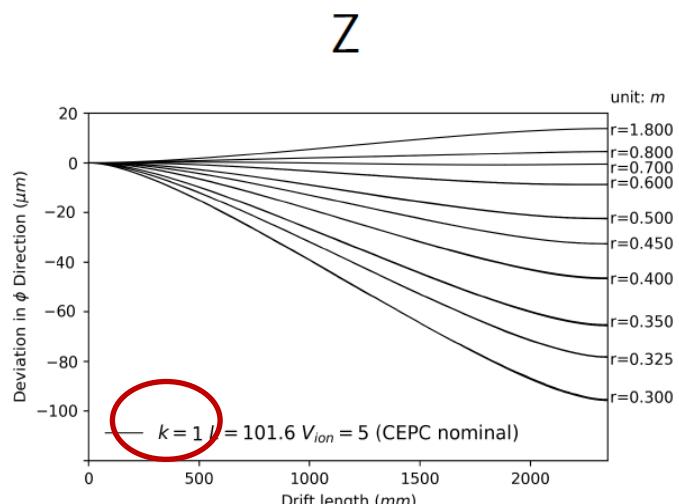
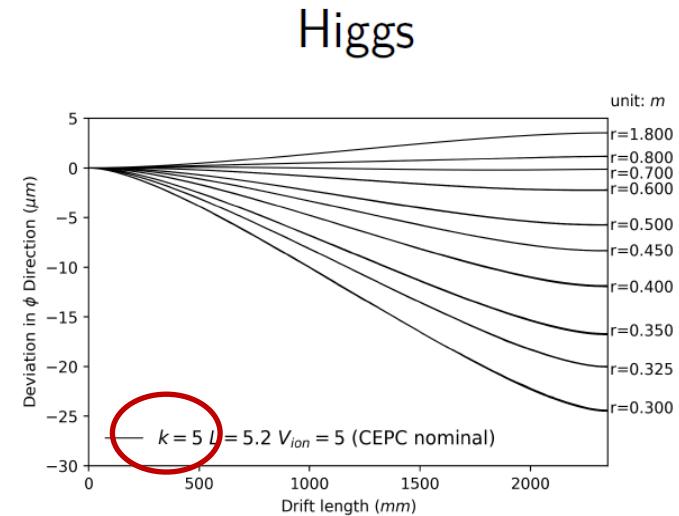
$$\vec{E} = (E_{ion} + E_{induced}, 0, E), \quad \vec{B} = (0, 0, B)$$

漂移速度会有三个分量:

$$v_r = \mu E_r \frac{1}{1 + \omega^2 \tau^2}, \quad v_\varphi = -\mu E_r \frac{\omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2}, \quad v_z = \mu E_z$$

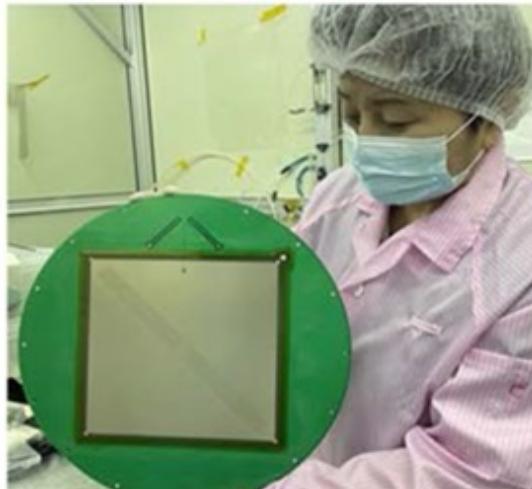
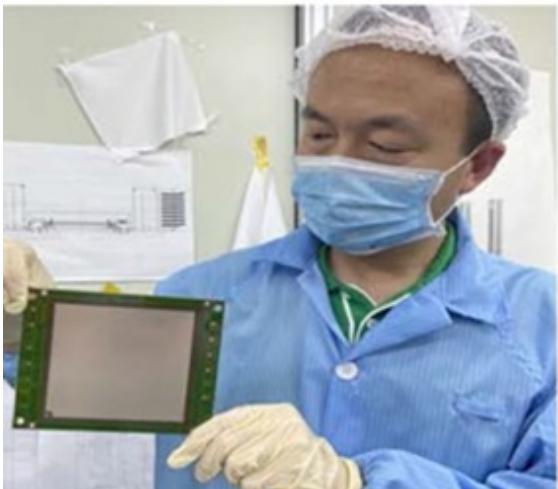
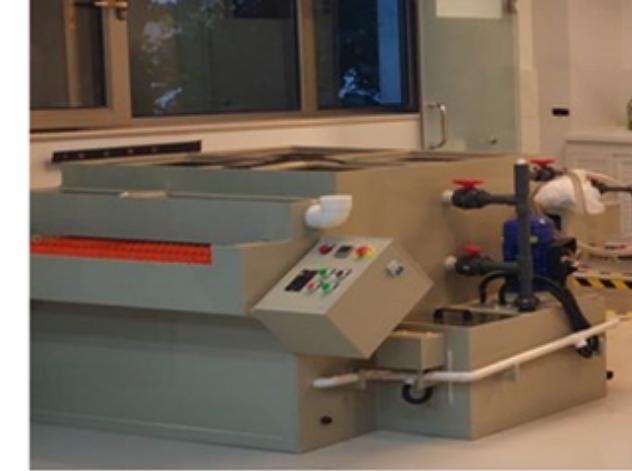
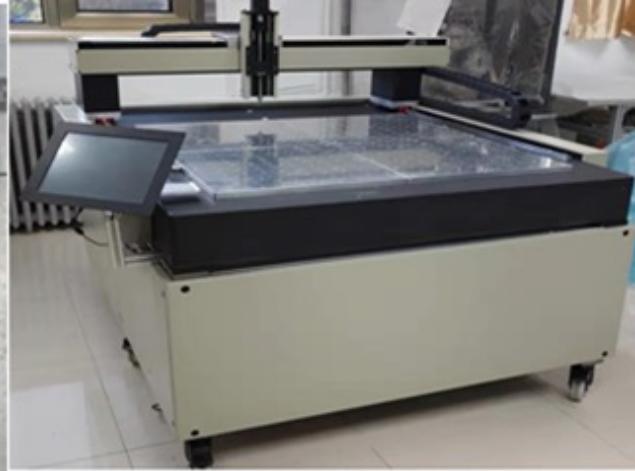
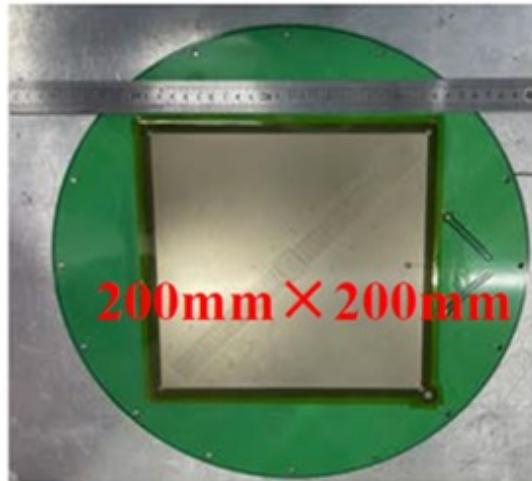
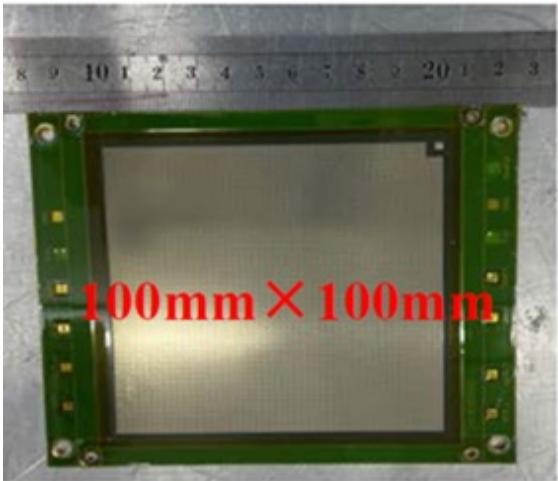
$\phi$  方向的微小偏差  $\Delta D_\phi$  是由于  $z$  方向上的微小移动距离  $\Delta z$  产生:

$$\Delta D_\phi = -\frac{\omega \tau}{1 + (\omega \tau)^2} \frac{E_r}{E_z} \Delta z,$$



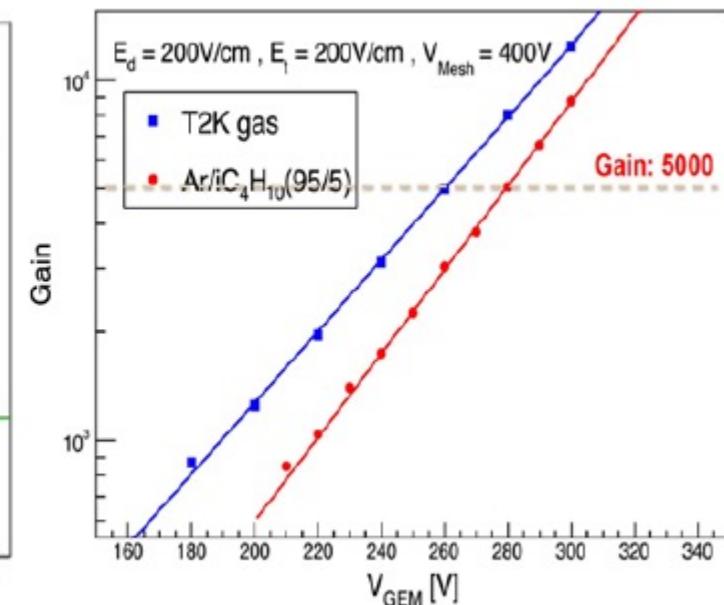
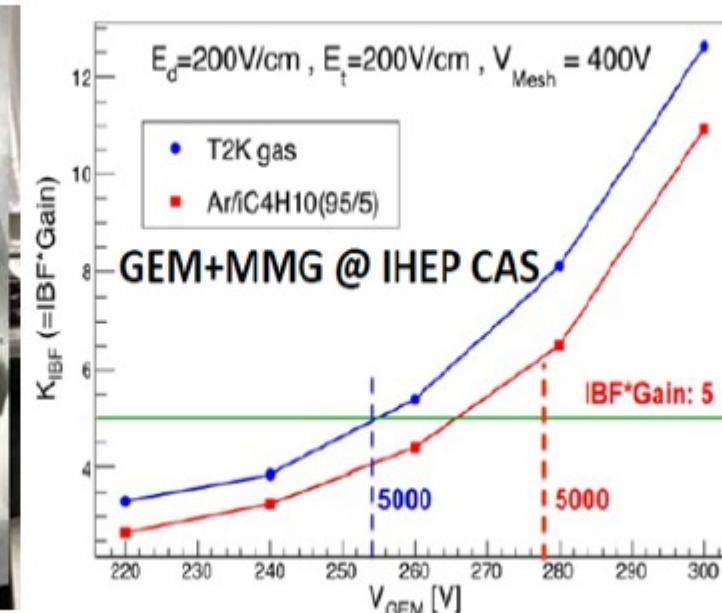
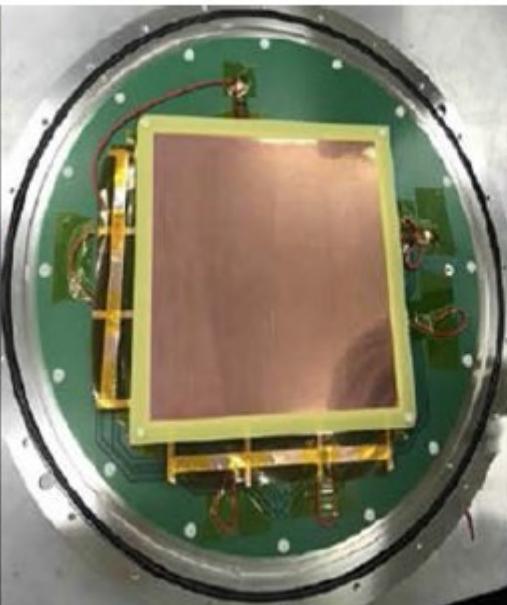
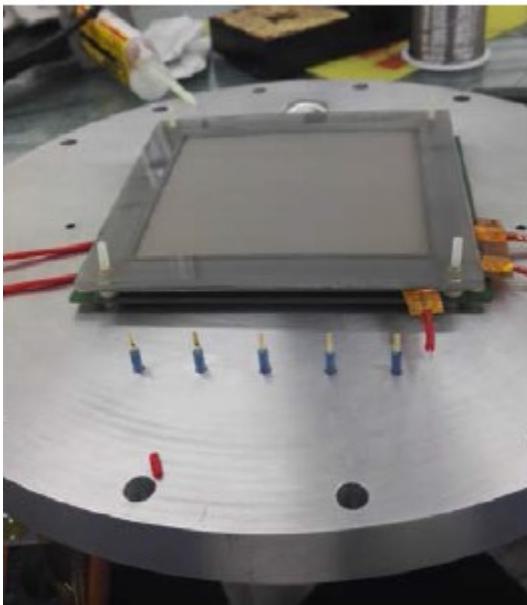
# 时间投影室TPC模块研制

- 研制成果
  - 结合国际合作，解决关键技术问题，自主研究不同尺寸的探测器模块
  - “核探测与核电子学国家重点实验室”平台项目资助，实现CEPC探测器模块**自主研制**



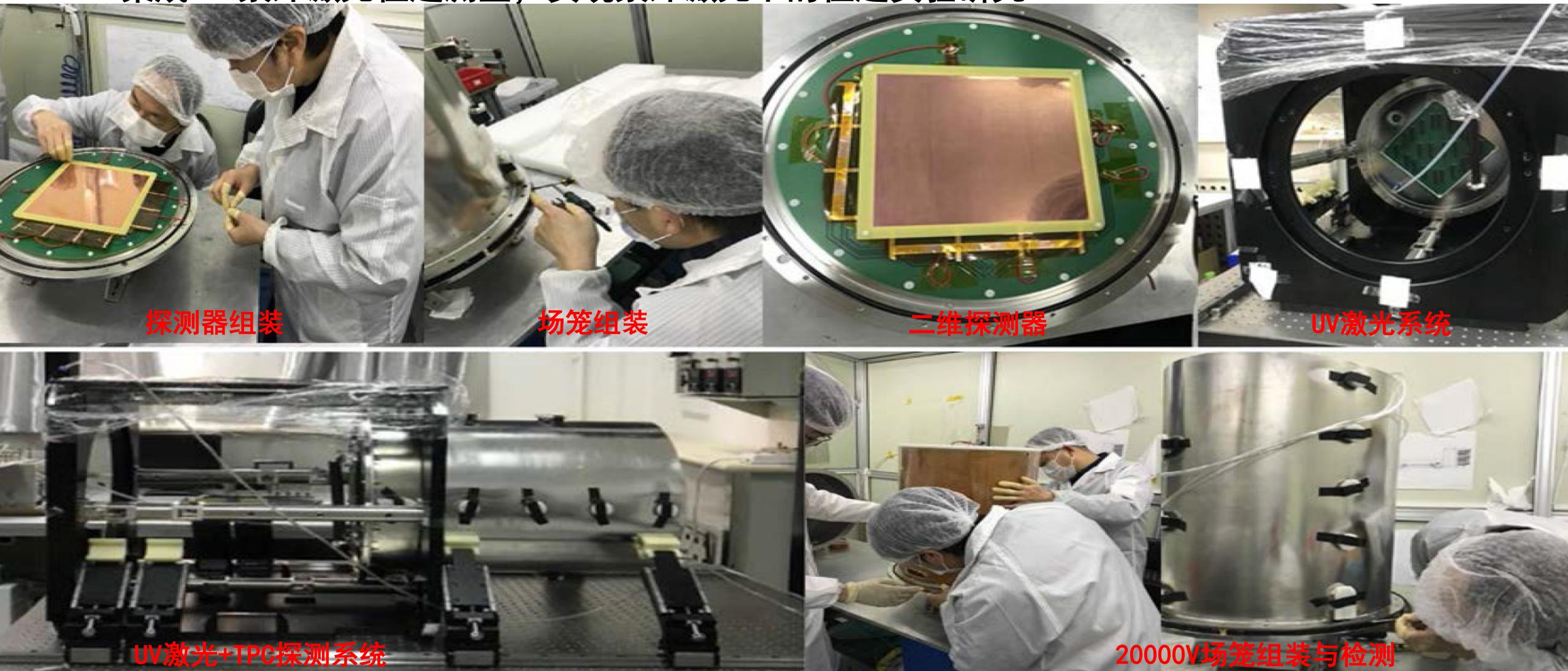
# 时间投影室TPC模块研究

- TPC探测器模块研究目标
  - 解决在环形对撞模式无法使用快速开关门清除正离子的问题（如CEPC）
  - 实现正离子反馈连续抑制以及读出模块的研制，研究空间电荷效应影响
- 主要研究成果
  - 高能所GEM+MM方案，有效面积： $50\text{mm} \times 50\text{mm} \rightarrow 200\text{mm} \times 200\text{mm}$
  - 模拟研究评估高计数率的物理探测需求（高亮度Z）， $\text{IBF} \times \text{Gain} < 2$ 是基本物理需求
  - 通过两种不同工作气体测量，确认了空间电荷效应对IBF值的影响



# 时间投影室TPC原型机研究 – 分系统研制

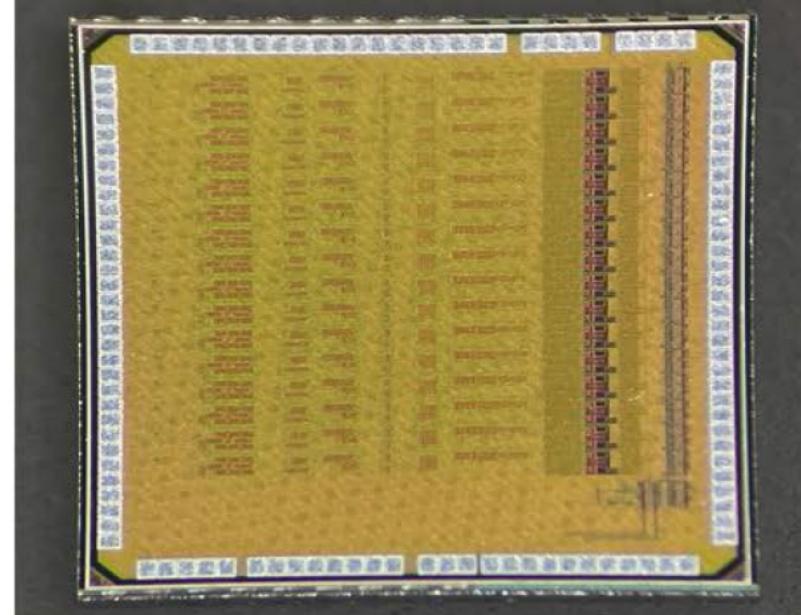
- 研制一套面向 CEPC 的 TPC 原型机，实现径迹性能测量和关键性能指标研究
- 集成UV紫外激光径迹测量，实现紫外激光下的径迹实验研究



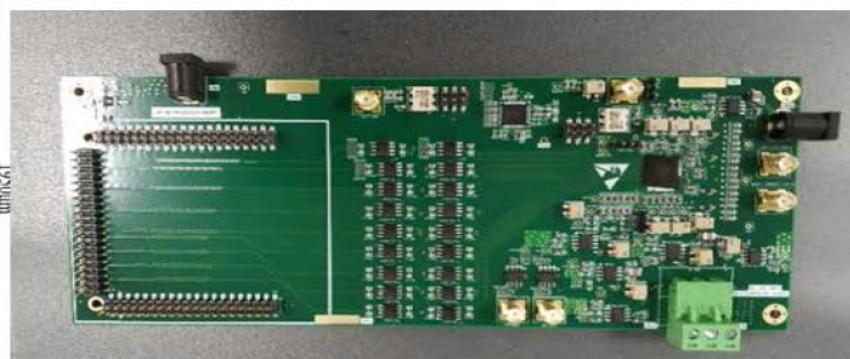
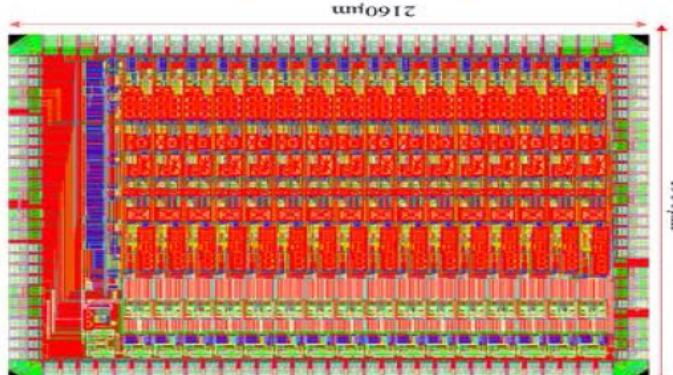
# 时间投影室TPC原型机研究 – 读出电子学系统

- 面向 CEPC 读出的低功耗(<5mW/通道)的读出电子学ASIC研制

- 高能物理研究所和清华大学
  - 参与单位: 清华大学、高能物理研究所
  - 合作单位: LCTPC collaboration and CEA-Saclay
  - 流片工艺: CMOS 65nm工艺
- 2016-2018: FEE ASIC v0 芯片研发
  - FEE ASIC v0 芯片设计: 读出架构的全功能验证
  - FEE ASIC v1 芯片设计: 低功耗性能优化
  - 国际评审会
- 2019-2020: FEE ASIC v1 芯片原型机测试
  - FEE ASIC v0 芯片与TPC原型机完成测试
  - 单通道功耗优于LCTPC通用芯片



65nm ASIC芯片实物图



65nm ASIC芯片设计版图及测试板实物图

# 时间投影室TPC原型机研究 – 系统联调

- 成功实现CEPC 读出低功耗(<5mW/通道) ASIC研制，并实现系统联调

	AFE (mW/ch)	ADC (mW/ch)	Total (mW/ch)
芯片v0仿真	1.93	1.0	2.93
原型芯片v0测试	2.02	1.0	3.02
芯片v1仿真	1.40	1.0	2.40
原型芯片v1测试	1.43	1.06 @40MS/s	2.49

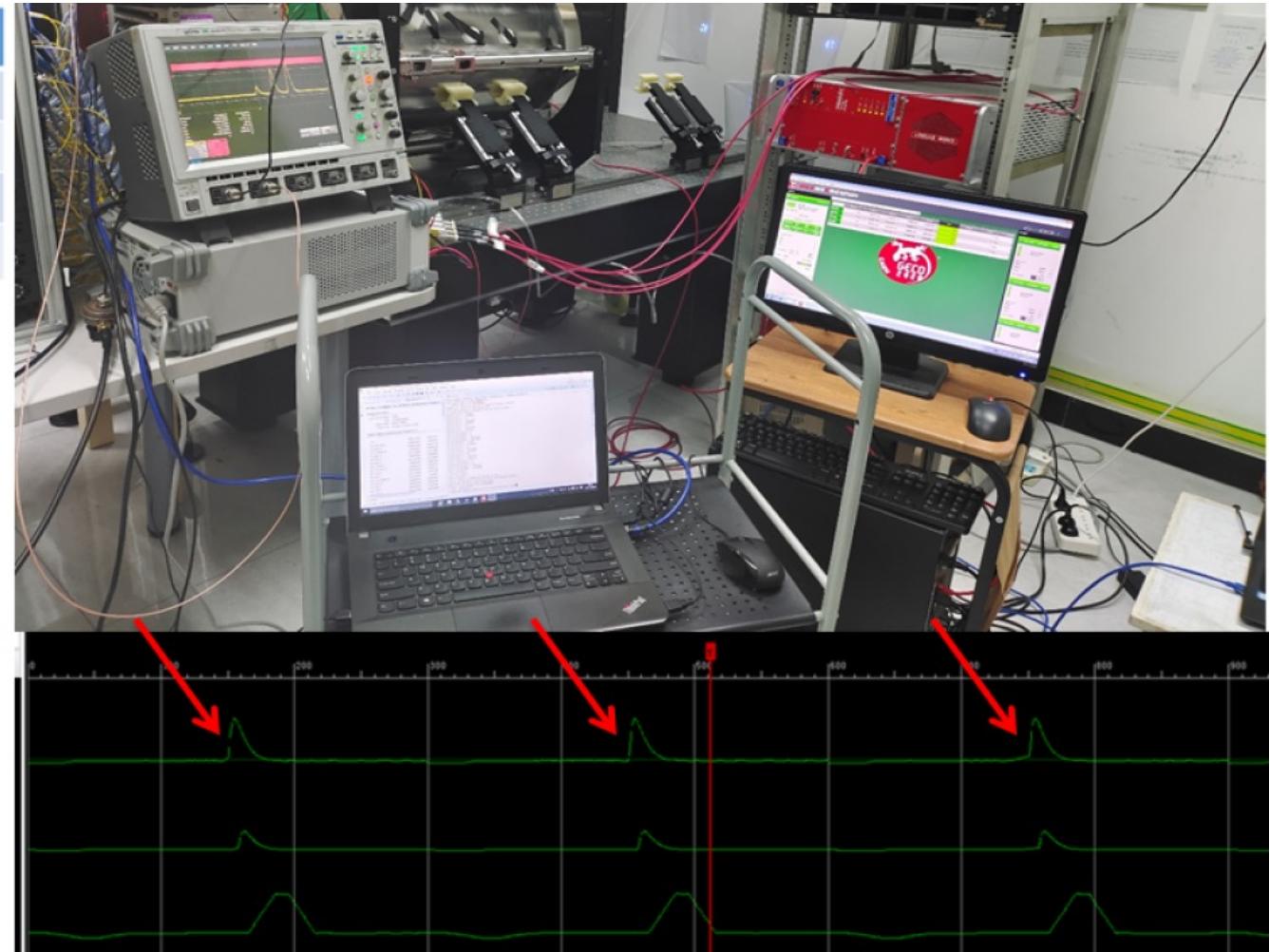
- ASIC+TPC探测器测试参数

- TPC工作条件:

- GEM: 280V
    - 漂移长度: 500mm
    - 漂移电场: 180 V/cm
    - 气体: Ar/CF4/iC4H10 95/3/2 (T2K)
    - 激光器: 7.2 mJ @20 Hz
    - 激光径迹: 共三层

- 电子学工作条件:

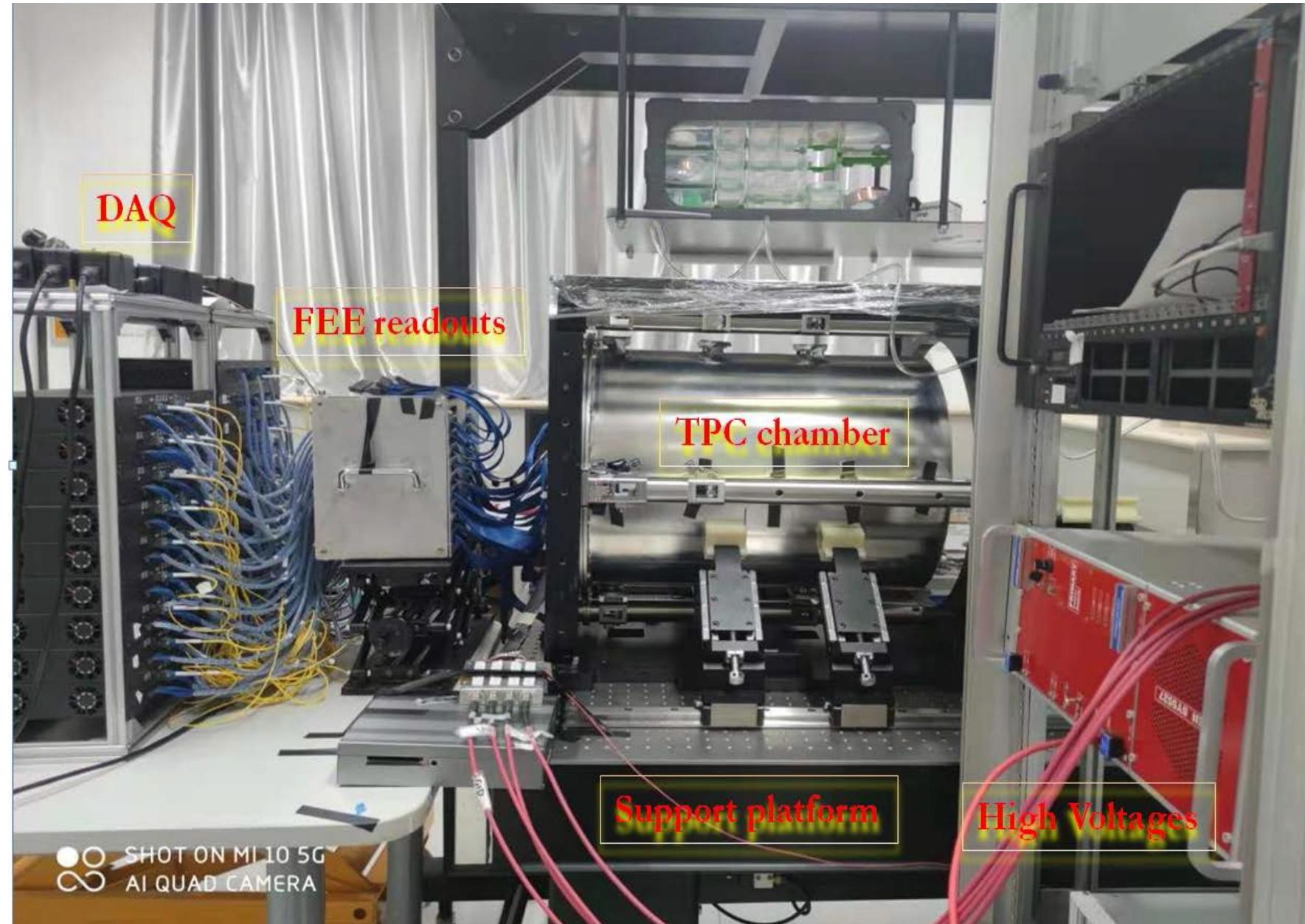
- 外触发模式
    - 触发延时:  $2500 \times 8 \text{ ns} = 20 \mu\text{s}$
    - 增益: 20 mV/fC
    - 采样率: 30 MS/s



65nm ASIC 芯片 + TPC测试及三层激光信号

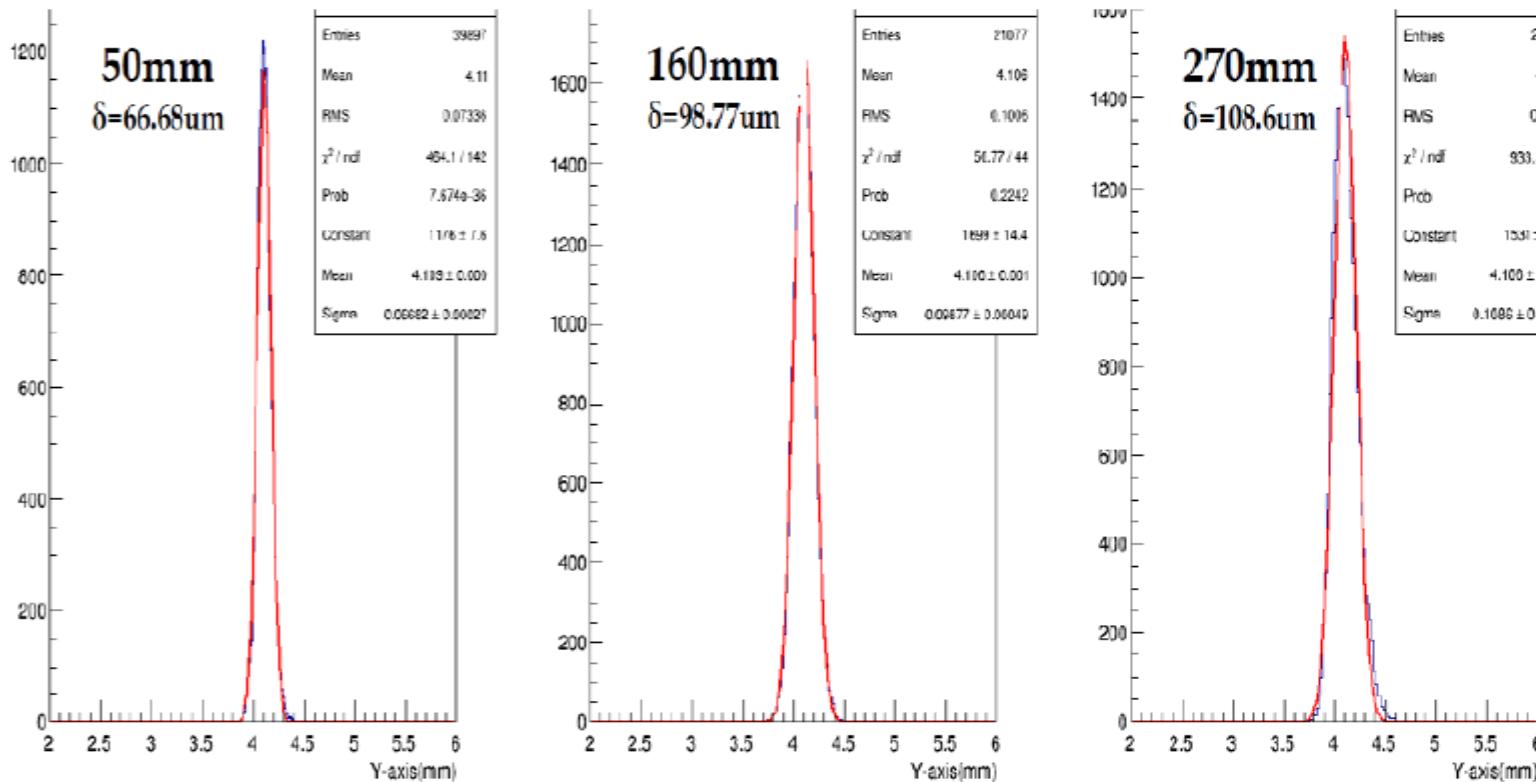
# 时间投影室TPC原型机研究 – 系统研制

- TPC原型机研究目标
  - 研究激光实现位置分辨率 $<100\mu\text{m}$ 的径迹实验研究及漂移速度等性能指标的实验研究
  - 实现紫外激光电离能力量化( $dE/dx$ )研究
- TPC原型机研究进展
  - 解决并完成整个UV激光光路的调装
  - 解决并完成实验探测器模块的1280路(清华大学)读出安装及实验测量研究



# 时间投影室TPC原型机研究 - Highlights

- 实现相邻条测试统计，确认读出条设计优化结果
- 实现空间位置分辨率实验测量，达到 $66 \mu\text{m} \sim 108 \mu\text{m}$
- 实现紫外激光特定能量下 $dE/dx$ 的实验研究~3.3%
- TPC原型机研究实现不同气体增益测试对比



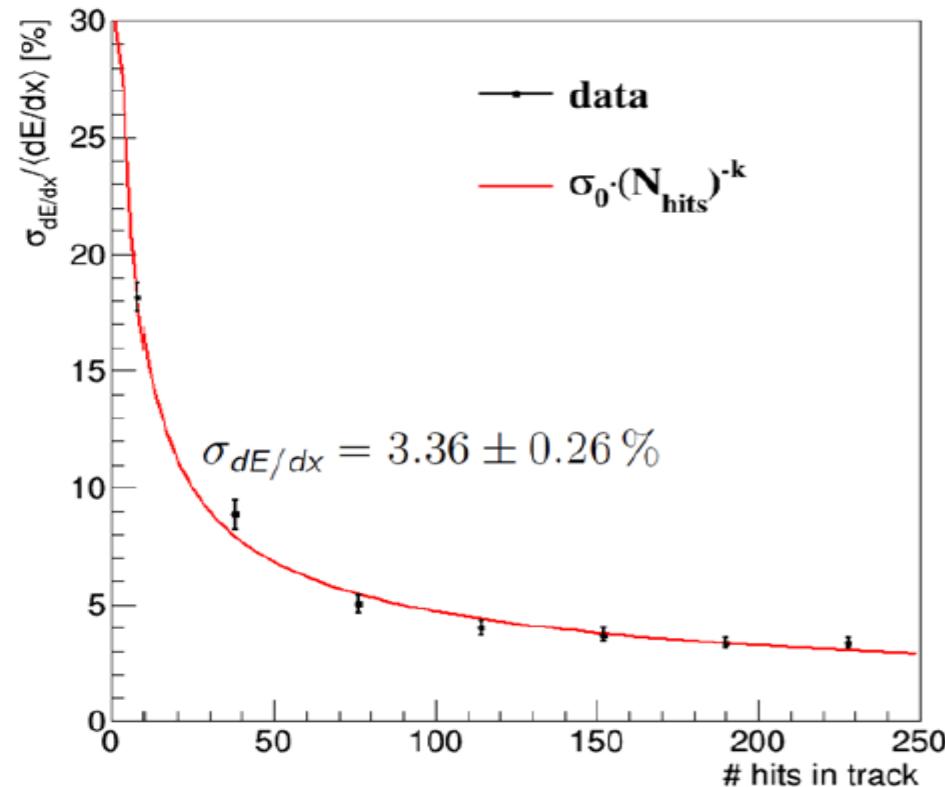
Nuclear Instruments and Methods in Physics  
Research Section A: Accelerators, Spectrometers,  
Detectors and Associated Equipment

Volume 1040, 1 October 2022, 167241



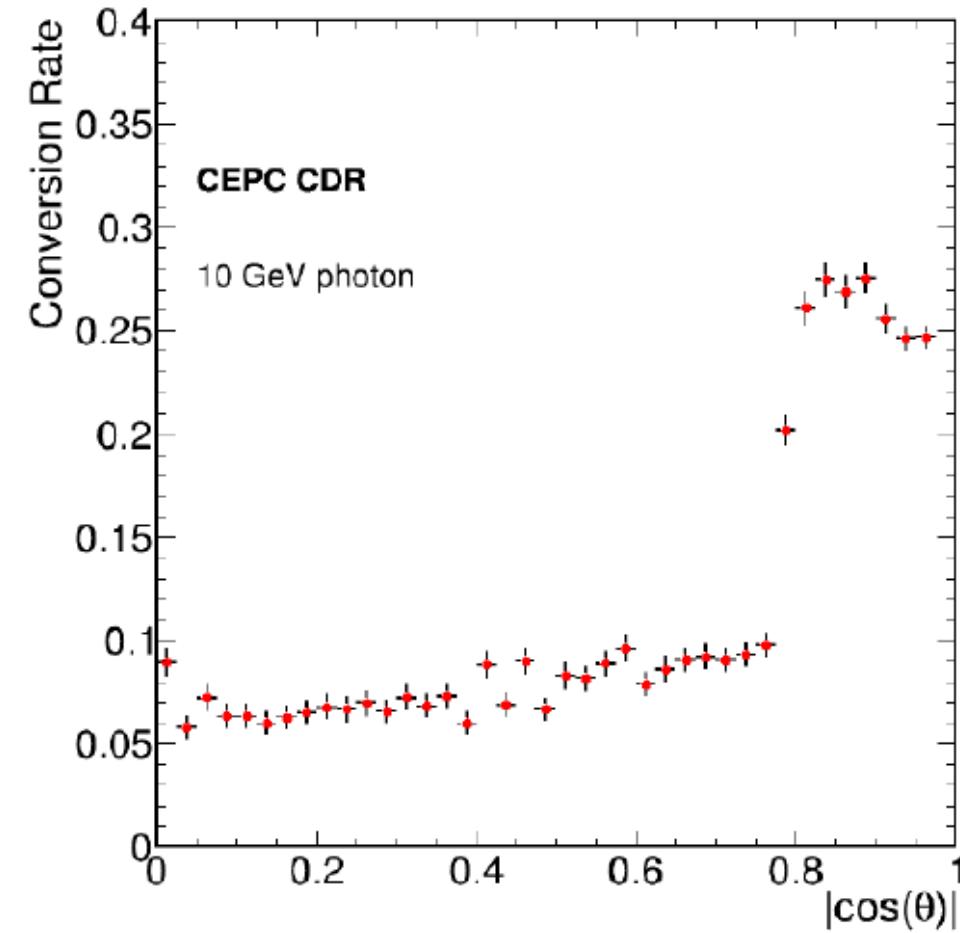
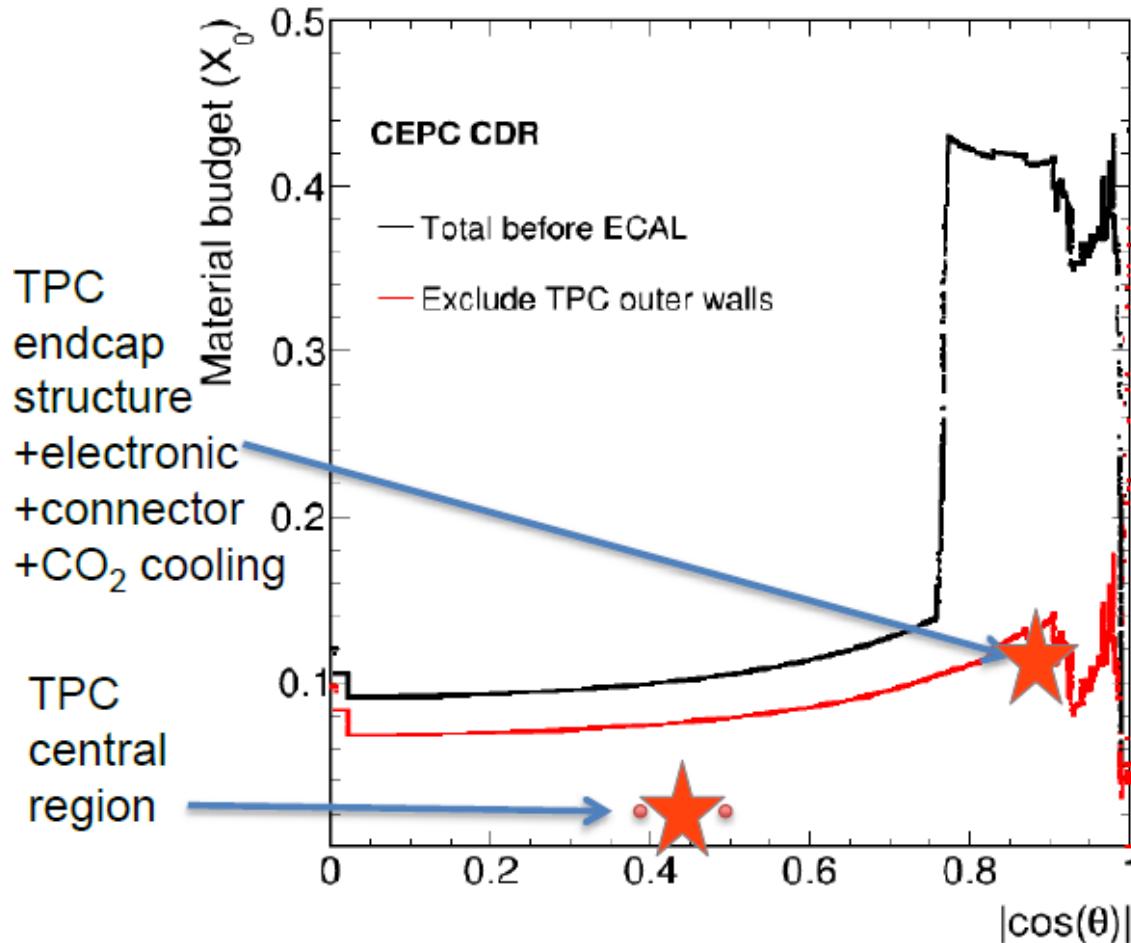
Performance of TPC detector prototype integrated  
with UV laser tracks for the circular collider

<https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.167241>



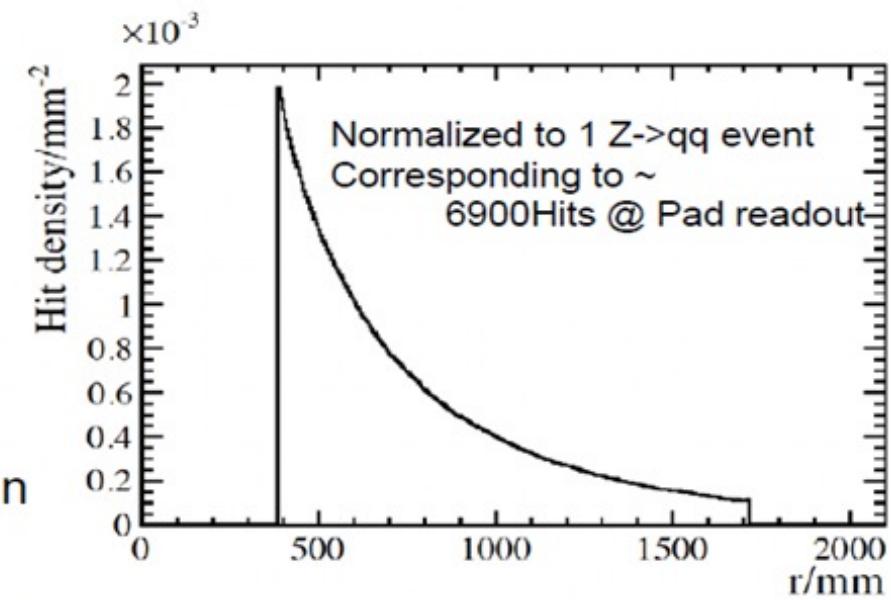
# 时间投影室TPC高对撞亮度目标的可行性 – 物质量 (OK)

- TPC探测器桶部典型的物质量需求  $< 0.1X_0$  (CEPC CDR)
- 大Pad型读出可以实现 $< 0.1 X_0$  (桶部),  $< 0.4 X_0$  (端盖段)
- 小像素型读出方案**小于**大Pad型的读出物质量 (Bump bond的连接采用)



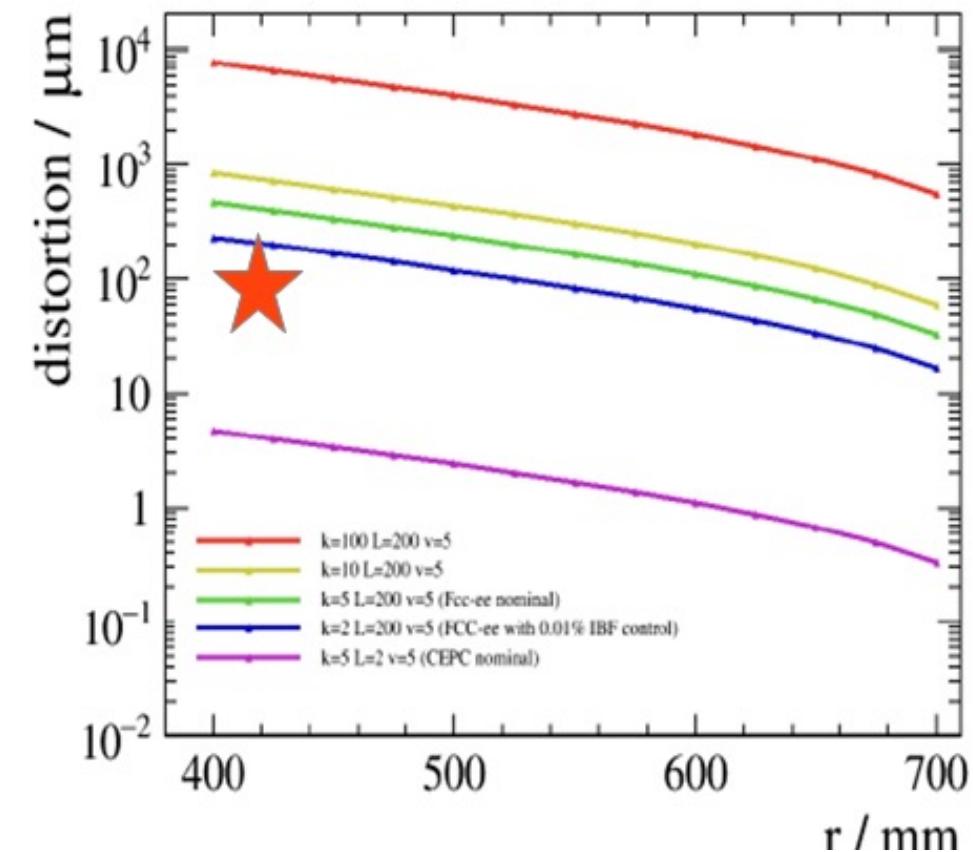
# 时间投影室TPC高对撞亮度目标的可行性 – 占空比 (OK)

- 时间投影室在高计数率下的事例占空比 (Voxel Occupancy) 可行性研究
- 无论大尺寸Pad型读出还是小尺寸像素型读出，时间投影室测量三维事例占空比都可以满足
  - Low voxel occupancy :  $1 \times 10^{-5}$  to  $1 \times 10^{-6}$
  - At  $2 \times 10^{36}$  with Physics event only, even bunch distribution
    - Pad readout ( $1 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ ), inner most occupancy  $1 \times 10^{-4}$
    - Pixelated readout ( $55 \mu\text{m} \times 55 \mu\text{m}$ ), much LOWER inner most occupancy  $\sim 1 \times 10^{-6}$
  - Pixelated readout can easily handle a high hits rate at Z pole.
    - The test beam showed GridPix TPC prototype can handle up to 2.6M hits/s per chip
    - Reconstruction algorithm with high Pile Up need to be developed.



# 时间投影室TPC高对撞亮度目标的可行性 – 正离子反馈影响 (OK, 还需优化)

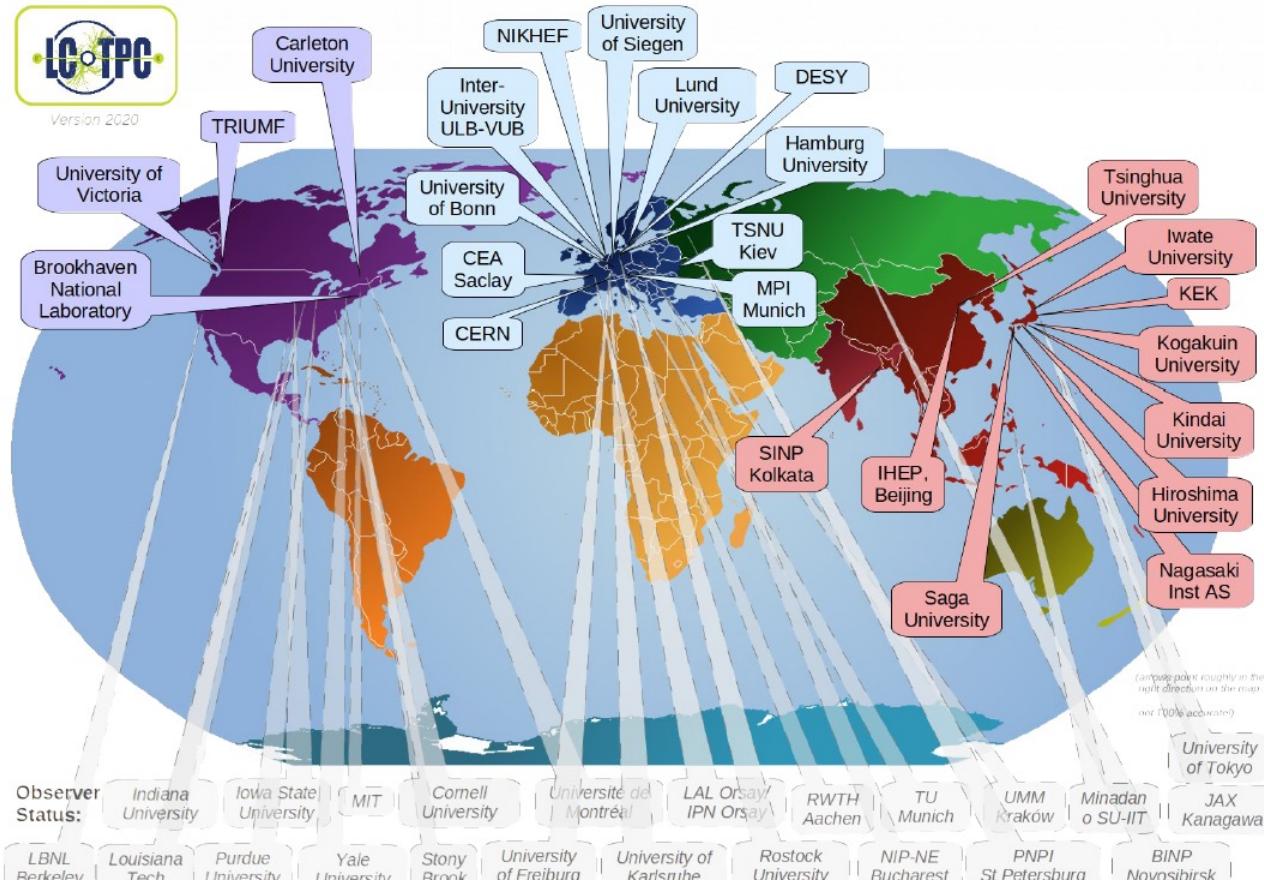
- 正离子反馈带来的影响可以通过探测器增益的优化和正离子反馈率的控制
  - Higgs物理目标的时候没有任何问题
  - 对撞亮度目标:  $\text{Lumi} \sim 2 \times 10^{36}$
  - 实验和模拟分析结果显示需要至少控制
    - $\text{IBF} \times \text{Gain} \sim 1$
    - 位置畸变, 靠近内桶:  $\text{Distortion} < 100 \mu\text{m}$  (Z 物理)
- 对于内桶部分设计**需优化**研究
  - 标定方法的集成
    - Laser alignment system
    - $Z \rightarrow \mu\mu$  event
    - ALICE TPC / LEP TPC 可借鉴参考
  - MDI的优化 (CEPC MDI Study Group)
    - Beam background 优化



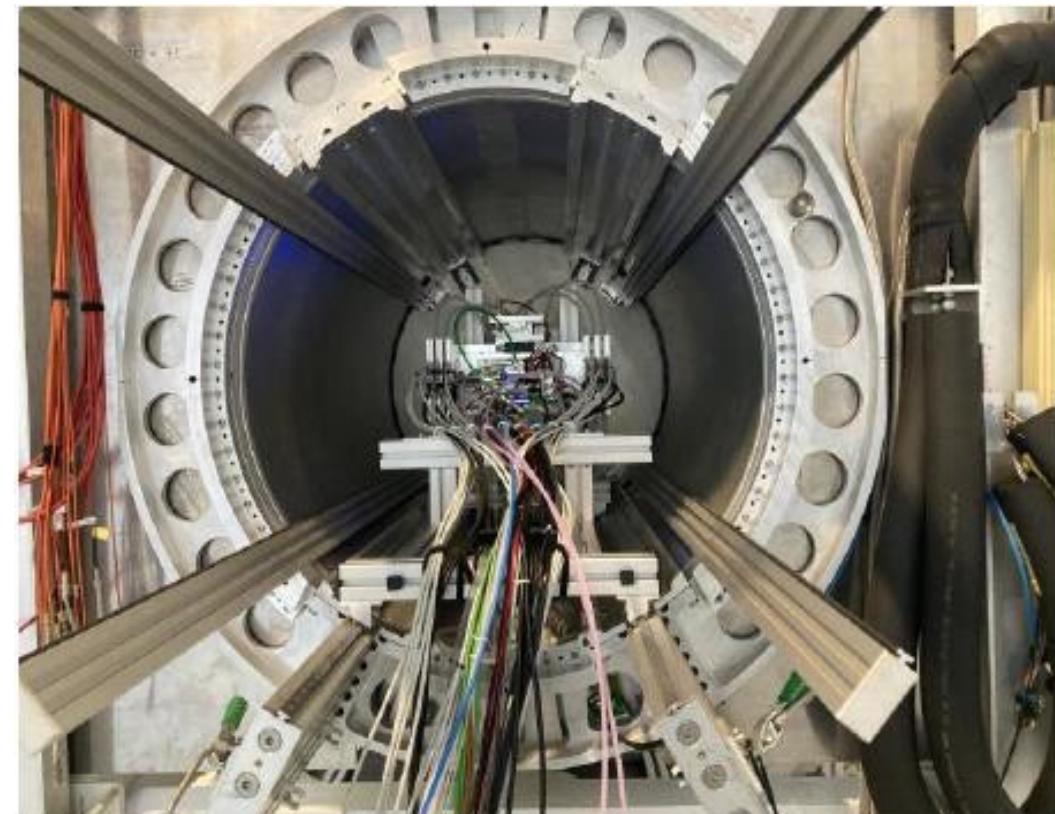
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/07/P07005>

# 国际合作和时间投影探测技术研究计划

- LCTPC国际合作组保持良好的研究活力，为时间投影室技术研究提供交流平台
- 高能物理研究所2016年12月成为合作组成员，并于2020年成为**亚洲区发布负责机构**
- 与T2K、ALICE以及相关e+e-对撞机的可能应用研究，推动MPGD的技术应用



LCTPC国际合作组



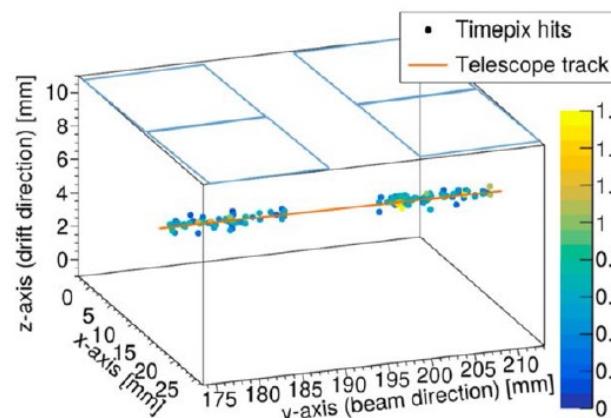
德国DESY 1.0T的桶型磁场

# 国际合作和时间投影探测技术研究计划

- 结合低功耗的读出技术方案，实现小像素型读出型时间投影室TPC的原型机研究
- 200  $\mu\text{m}$ -500  $\mu\text{m}$ 的小读出单元尺度，在空间上实现更好的粒子鉴别能力 ( $dN/dx+dE/dx$ )
- 已开始模拟研究和小像素读出型的时间投影室TPC原型机实验研究

## In Space

- Challenging of the low power consumption electronics (>40mV/fC needed at 2000 of gas gain)
- Pixelated readout
- the reasonable pixilation reveals the underlying cluster structure in 3D chamber



空间上实现更高 $dN/dx+dE/dx$

Bump bond pixelated readout with Micromegas detector	Module size	To be addressed by R&D
<ul style="list-style-type: none"><li><math>\geq 300 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}</math></li><li>Developed the readout chip by Deng Zhi (Tsinghua)</li><li>Developed the Micromegas detector sensor at IHEP</li><li>Development of the new module and prototype</li></ul>	1-2 $\text{cm}^2$ 100 $\text{cm}^2$	<ul style="list-style-type: none"><li>Research on pixelated readout technology realization</li><li>Optimization of cluster profile and pad size</li><li>Study of the '<math>dN_{cl}/dx</math>'</li></ul>
		<ul style="list-style-type: none"><li>Study the distortion using UV laser tracks and UV lamp to create ions disk</li><li>In-situ calibration with UV Laser system</li><li>Study of the '<math>dE/dx+dN_{cl}/dx</math>'</li></ul>

Micromegas detector  
Pixelated readout  
PCB board  
Readout chip

Design+assembled +Produced at IHEP

Bump bond

Design+commissioning at IHEP/Tsinghua

Tsinghua University  
University

Huirong Qi

21

- 面向CEPC的高径迹探测器的物理需求，开展了基于时间投影室技术的物理分析和模拟研究，给出正离子反馈可行性及物理需求
- 通过开展时间投影室读出模块研究和集成UV紫外激光的原型机研究，研制了一套500mm漂移长度的时间投影室原型机，为CEPC的物理目标，实验确证、分析了时间投影室的关键技术问题和主要性能指标
- 随着正负电子对撞机对撞亮度 (Z pole) 的不断提高，模拟和实验分析了时间投影室技术需要优化改进的技术目标，国际LCTPC合作下，开展相关正负电子对撞机小像素型读出时间投影室技术研究

谢谢！

