



时间投影室应用于环形正负电子对撞机研究进展

余信, 祁辉荣, 王建春

——代表高能物理研究所TPC研究小组

- 1、中国科学院高能物理研究所
- 2、核探测与核电子学国家重点实验室
- 3、中国科学院大学

第十三届全国先进气体探测器研讨会 上海

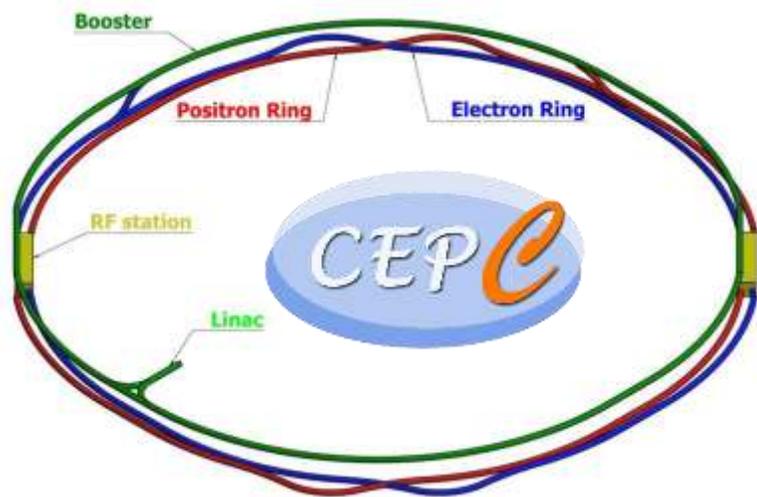
Aug 21, 2025

报告内容

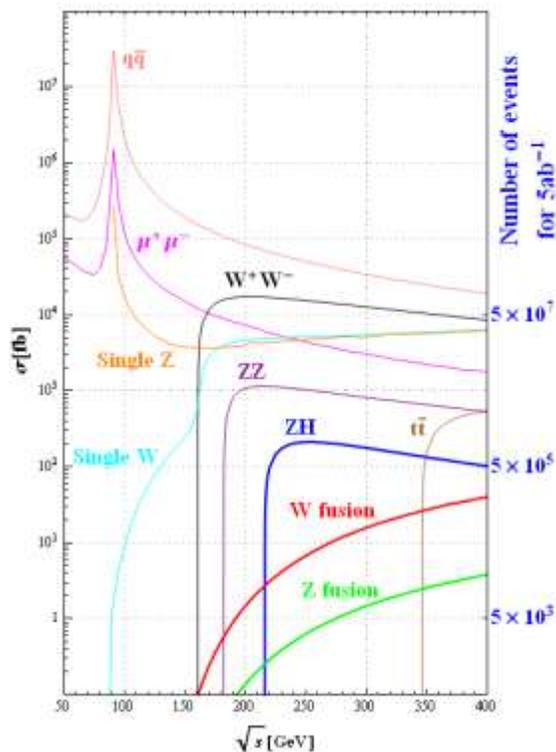
- 环形正负电子对撞机物理需求
- 时间投影室技术
- TPC应用于正负电子对撞机研究进展
- 小结

环形正负电子对撞机

- **粒子物理重要里程碑**：2012年LHC发现标准模型最后一块拼图——**希格斯玻色子**
- 希格斯粒子成为探测新物理的**关键探针**
- **CEPC**作为下一代高亮度的Higgs,W/Z工厂，精确研究Higgs性质，检验粒子物理标准模型，探索新物理



<https://ihep.cas.cn/dkxzz/cepc/>



Operation mode		ZH	Z	W ⁺ W ⁻	t \bar{t}
\sqrt{s} [GeV]		~240	~91	~160	~360
Run Time [years]		10	2	1	5
30 MW	L / IP [$\times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$]	5.0	115	16	0.5
	$\int L dt$ [ab^{-1} , 2 IPs]	13	60	4.2	0.65
	Event yields [2 IPs]	2.6×10^6	2.5×10^{12}	1.3×10^8	4×10^5
50 MW	L / IP [$\times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$]	8.3	192	26.7	0.8
	$\int L dt$ [ab^{-1} , 2 IPs]	21.6	100	6.9	1
	Event yields [2 IPs]	4.3×10^6	4.1×10^{12}	2.1×10^8	6×10^5



- Precision Higgs Physics at CEPC ([CPC V43, No.4 \(2019\) 043002](#))
- Flavor Physics at CEPC([arXiv:2412.19743](#))
- New Physics Search at CEPC([arXiv:2505.24810](#))

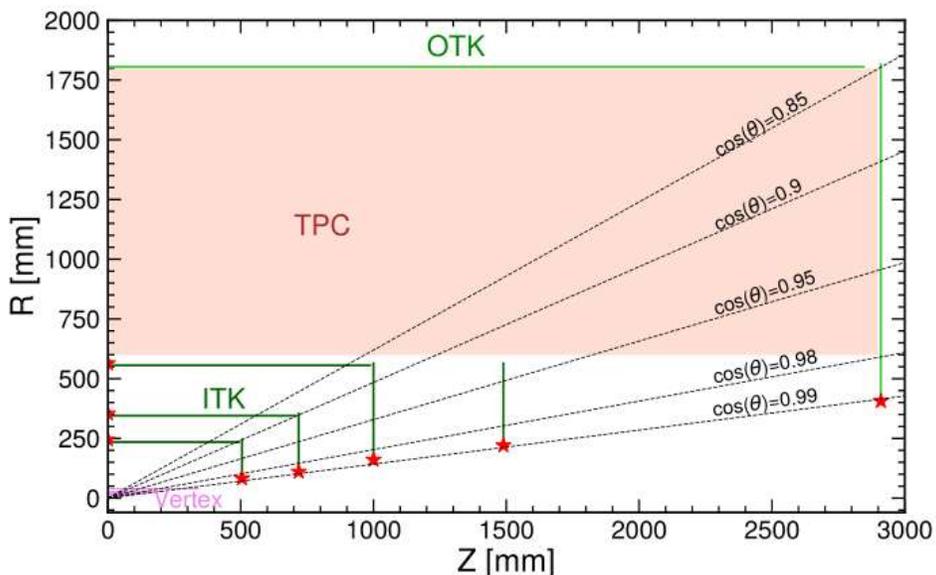
CEPC径迹探测物理需求

■ CEPC作为下一代高亮度的Higgs,W/Z top工厂:

● 径迹探测系统: 硅(VTX,ITK,OTK)+气体探测器(TPC)组成

➢ 实现带电粒子径迹探测 $\sigma(1/P_T) \sim 2 \times 10^{-5} (\text{GeV}/c)^{-1}$, TPC自身动量分辨 $\sigma(1/P_T) \sim 10^{-4} (\text{GeV}/c)^{-1}$

➢ 实现带电粒子鉴别PID $\sim 3\%$



Sub-system	Key technology	Key Specifications
Vertex	6-layer CMOS SPD	$\sigma_{r\phi} \sim 3 \mu\text{m}$, $X/X_0 < 0.15\%$ per layer
Tracking	CMOS SPD ITK, AC-LGAD SSD OTK, TPC + Vertex detector	$\sigma\left(\frac{1}{P_T}\right) \sim 2 \times 10^{-5} \oplus \frac{1 \times 10^{-3}}{P \times \sin^{3/2} \theta} (\text{GeV}^{-1})$
Particle ID	dN/dx measurements by TPC Time of flight by AC-LGAD SSD	Relative uncertainty $\sim 3\%$ $\sigma(t) \sim 30 \text{ ps}$
EM calorimeter	High granularity crystal bar PFA calorimeter	EM resolution $\sim 3\%/\sqrt{E(\text{GeV})}$ Effective granularity $\sim 1 \times 1 \times 2 \text{ cm}^3$
Hadron calorimeter	Scintillation glass PFA hadron calorimeter	Support PFA jet reconstruction Single hadron $\sigma_E^{had} \sim 40\%/\sqrt{E(\text{GeV})}$ Jet $\sigma_E^{jet} \sim 30\%/\sqrt{E(\text{GeV})}$

CEPC径迹探测系统组成及物理需求

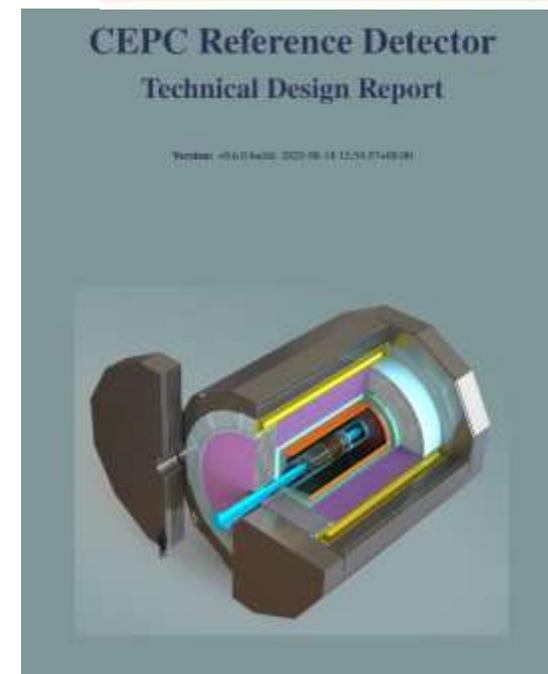
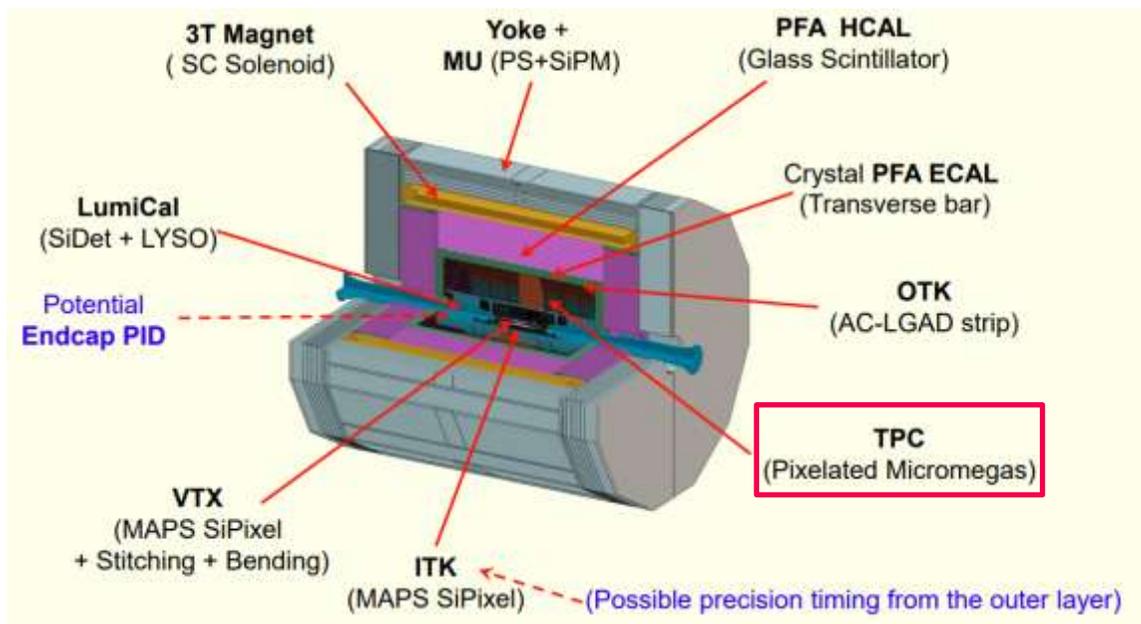
时间投影室技术

■ 时间投影室技术优势:

- 极低物质质量($\sim 0.1X_0$), 精确位置测量($\sim 100\mu\text{m}$), 提供带电粒子能损 dE/dx 或原初电离簇团 dN/dx 信息, 提供粒子鉴别(PID)
- 在许多大型粒子物理实验([ALICE](#),[STAR](#))作为主径迹探测器, 目前已被选为**CEPC Ref-TDR**中的**基准主径迹探测器**
- 加速器技术设计报告(TDR)已经发布, CEPC运行: **10年Higgs@3T** → 2年Z-pole@2T → 1年W

Calibration: Low luminosity Z at 3T
 Approximately $10^{35}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
 1%-20% of high luminosity Z

Subsystem	Supported By
Barrel Yoke	Base
Magnet	Barrel Yoke
Barrel HCAL	Barrel Yoke
Barrel ECAL	Barrel HCAL
TPC+ Barrel OTK	Barrel ECAL
ITK	TPC
Beampipe+VTX+LumiCal	ITK
Endcap Yoke	Base
Endcap HCAL	Barrel HCAL
Endcap ECAL+OTK	Barrel HCAL



CEPC Detector layout in CEPC ref-TDR

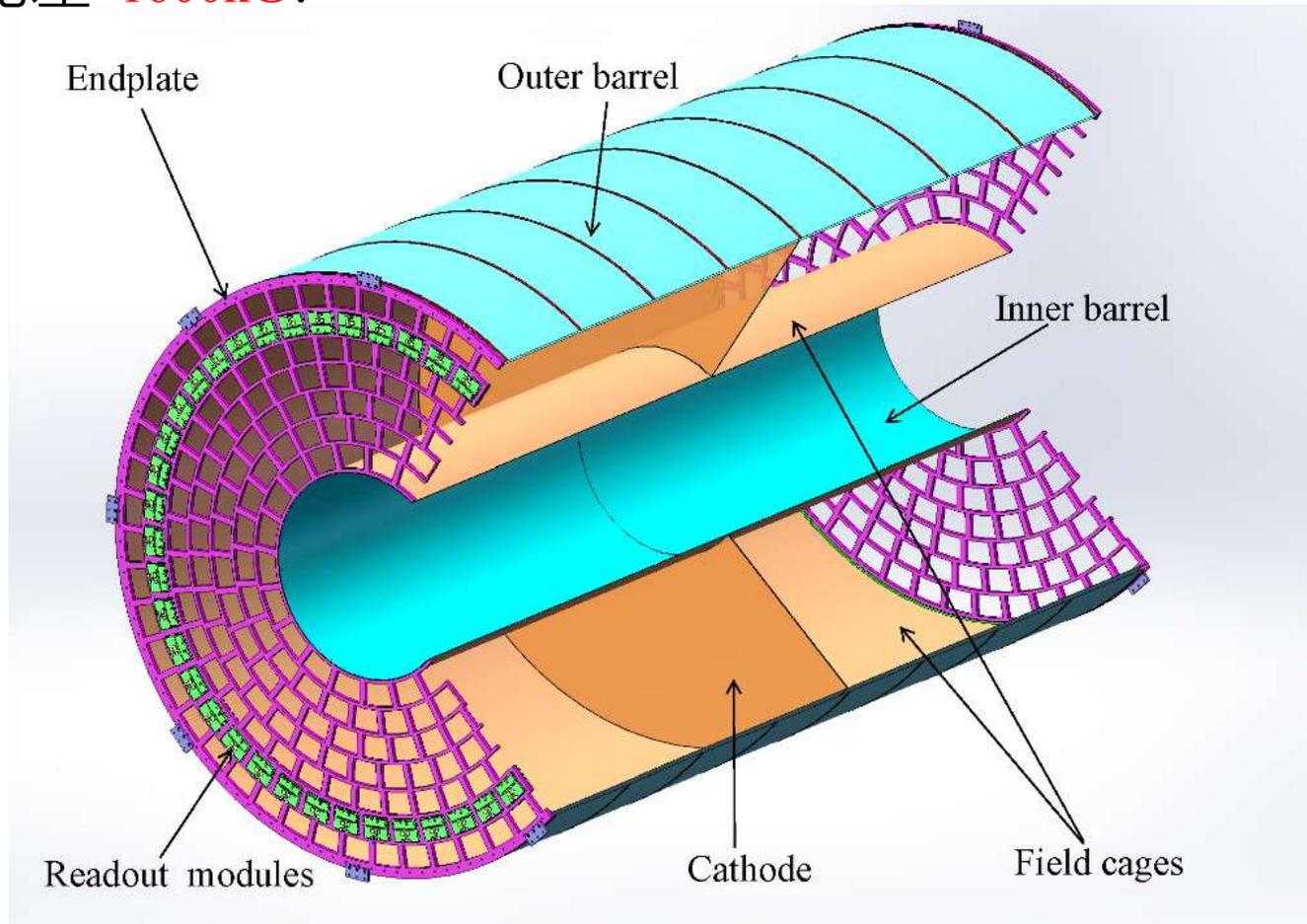
■ TPC应用于正负电子对撞机的研究进展

- 整体结构设计
- 有限元分析
- 束流本底研究
- 原型机研制进展

TPC整体设计

■ TPC包括一个大尺寸圆柱腔体和读出端盖组成,总重~1600kG:

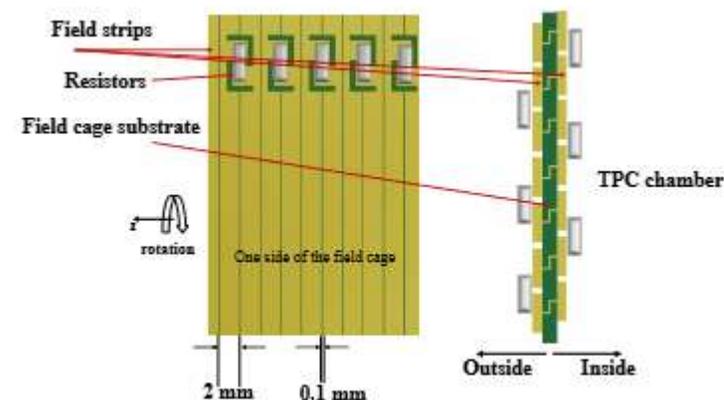
- 内径~0.6m, 外径~1.8m, 半长2.9m
- 超轻碳纤维材料(QM55)作为桶部材料
- 端盖采用双层Micromegas+ $(500\mu\text{m})^2$ 像素读出
- 248Modules/端盖, 3.3×10^7 读出通道/端盖
- 工作气体为T2K($\text{Ar}/\text{CF}_4/\text{iC}_4\text{H}_{10}=95/3/2$)
- 漂移电场~230V/cm, 3T磁场抑制横向扩散



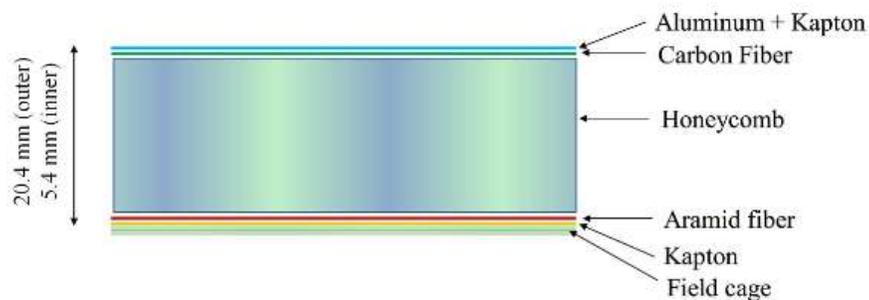
CEPC TPC整体设计

TPC桶部设计

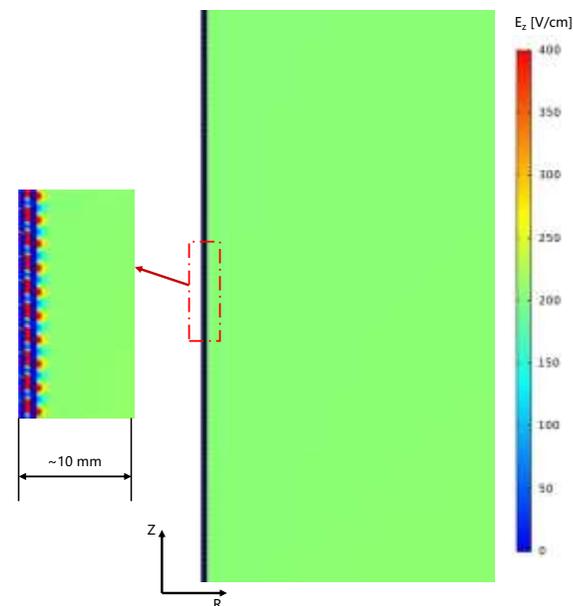
- 超轻碳纤维材料(QM55)作为桶部材料, 总物质量 $<1.1\%X_0$
- TPC场笼采用**窄条带+双面镜像条**设计方案, 解决场笼边缘不均匀问题
 - 铜条宽度2mm, 间隙0.1mm
 - 弓形设计局部增大条带间隙, 确保分压电阻焊接正常
 - 场笼边缘1.5mm, 漂移电场畸变3%, 边缘3mm, 电场恢复至设计值



Component	Layers	X [cm]	X_0 [cm]	X/X_0 [%]
TPC outer wall				
Faraday cage shield	Aluminum	0.005	8.9	0.06
Faraday cage shield substrate	Polyimide	0.005	28.6	0.02
Outer wall support cylinder	Carbon fiber	0.002	25.28	0.08
Outer wall support cylinder	Nomex honeycomb	1.96	800	0.25
Outer wall support cylinder	Aramid paper	0.001	35	0.03
Insulating layer	Polyimide	0.001	28.6	0.03
Mirror strips layer	Copper	0.001	1.6	0.07
Field cage substrate	Polyimide	0.005	28.6	0.02
Field strips layer	Copper	0.001	1.6	0.07
Glue	Epoxy	0.002	35.3	0.06
TPC inner wall				
Field strips layer	Copper layer	0.001	1.6	0.07
Field cage substrate	Polyimide	0.005	28.6	0.02
Mirror strips layer	Copper	0.001	1.6	0.07
Insulating layer	Polyimide	0.001	28.6	0.03
Inner wall support cylinder	Aramid paper	0.001	35	0.03
Inner wall support cylinder	Nomex honeycomb	0.46	800	0.06
Inner wall support cylinder	Carbon fiber	0.020	25.28	0.08
Faraday cage shield substrate	Polyimide	0.005	28.6	0.02
Faraday cage shield	Aluminum	0.005	8.9	0.06
Glue	Epoxy	0.002	35.3	0.06



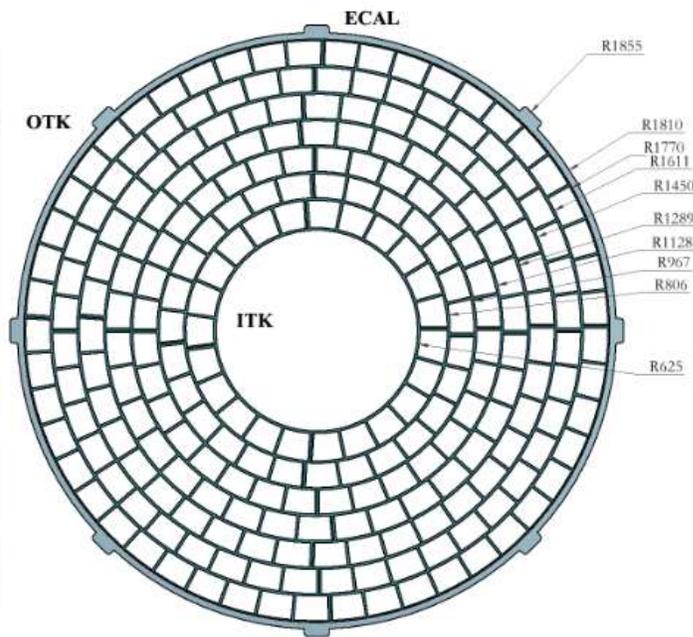
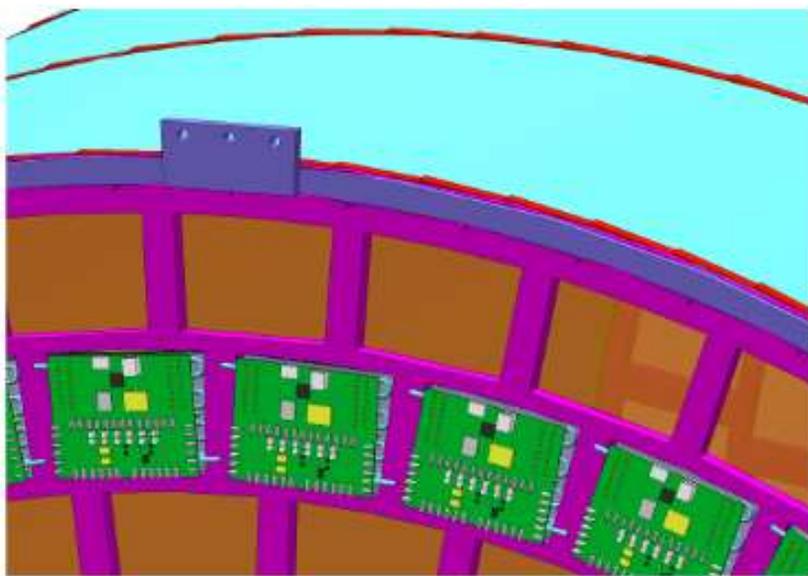
CEPC TPC筒部设计



CEPC TPC场笼设计及电场模拟

TPC端盖设计

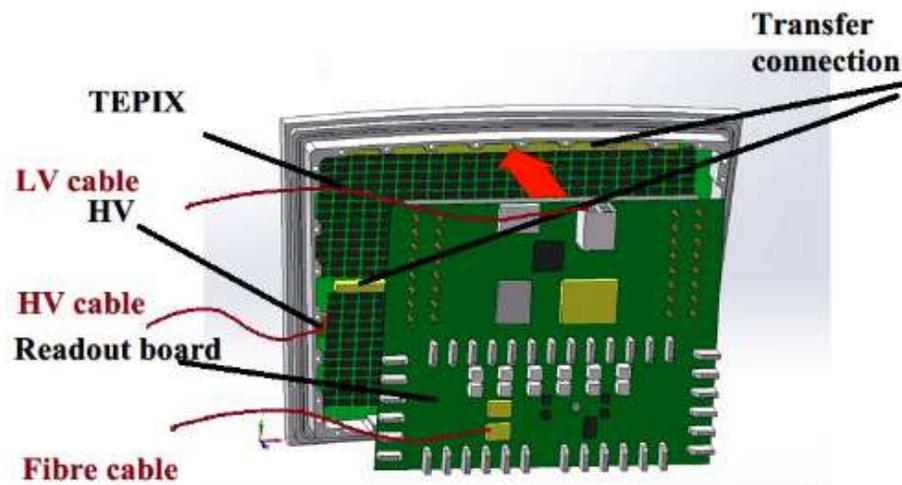
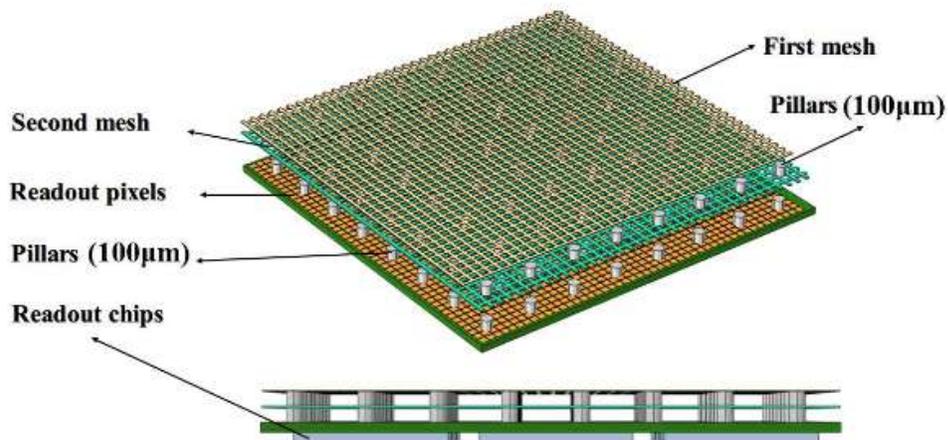
- 端盖共 $248 \times 2 = 496$ 个模块，O-ring与端盖密封，总物质量 $\sim 15\%X_0$
 - 模块集成微结构气体探测器，读出像素，前端电子学，冷却；易于安装和维护
- 端盖一共7层，三种不同尺寸模块，实现端盖 $\sim 96\%$ 灵敏区覆盖



Readout layer	Dimensions(mm)	Channels/module
Layer1,2 (in)	$201 \times 160 \times 80$	128640
Layer3,4	$206 \times 164 \times 80$	135136
Layer5,6,7(out)	$206 \times 164 \times 80$	141284
7 layers, 3.3×10^7 channels		

TPC读出模块设计

- 每个模块采用**双层Micromegas**读出，并抑制IBF至原初电离水平($IBF \times Gain < 1$)
- 采用高粒度像素型读出，读出pixel大小($500\mu\text{m}$)²
- 前端为自主研发低功耗ASIC芯片：**TEPIX**（180nm制程），端盖总功耗~10kW/端盖
- 复合光缆提供每个模块的高低电压供电，接地以及读出



TPC端盖设计，双层Micromegas抑制IBF

TPC端盖和桶部有限元分析(FEA)

◆ TPC通过端盖支撑与Ecal相接，并为OTK(~300Kg)提供支撑

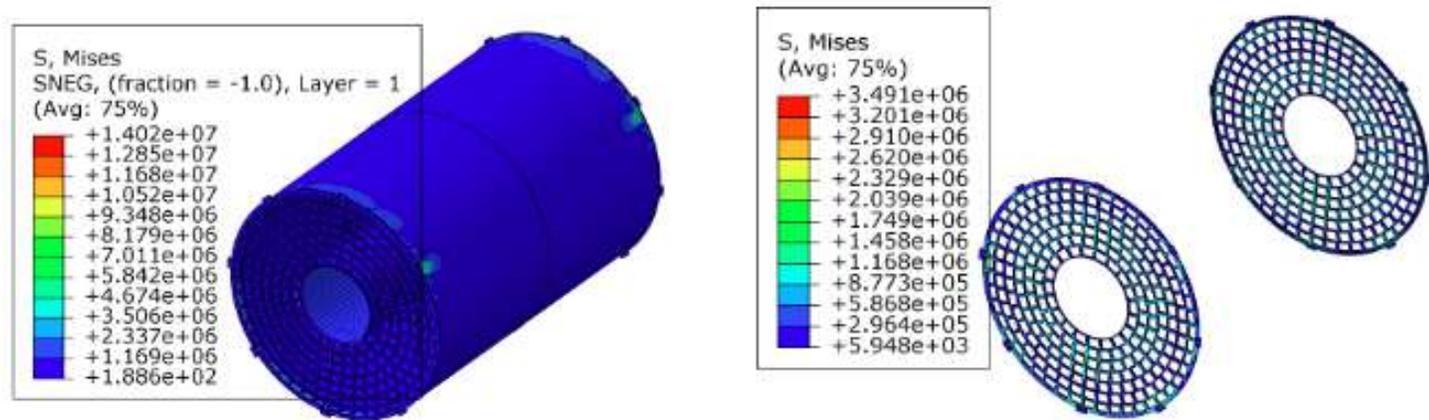
◆ 应力FEA结果：

- ◆ 端盖最大应力**3.5MPa**
- ◆ 筒部最大应力**14Mpa**，与端盖连接处

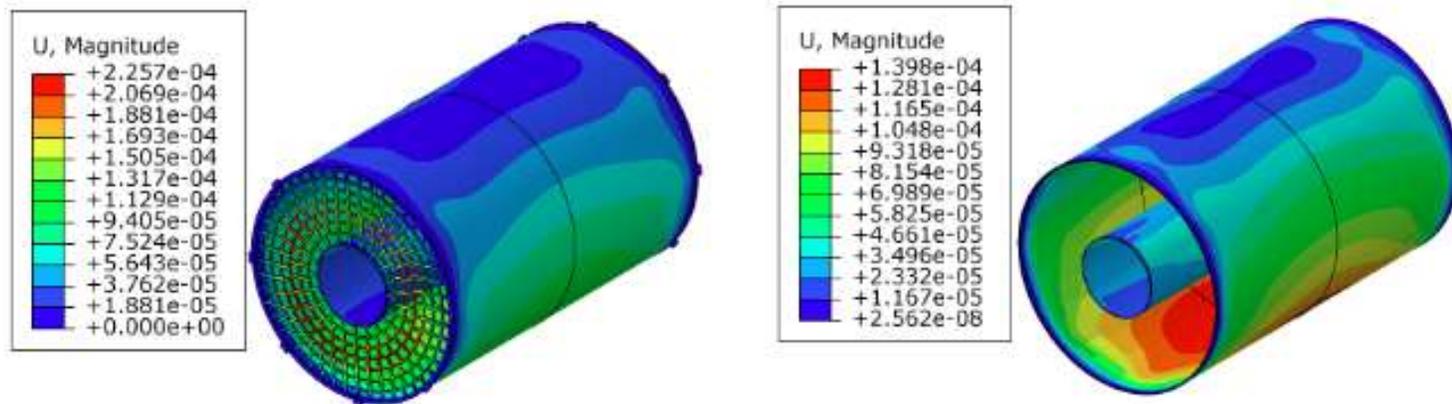
◆ 形变分析结果：

- ◆ 端盖最大形变~**226 μ m**
- ◆ 筒部最大形变~**140 μ m**

◆ 超轻桶部设计确保TPC**结构稳定**，应力与形变在接受范围内



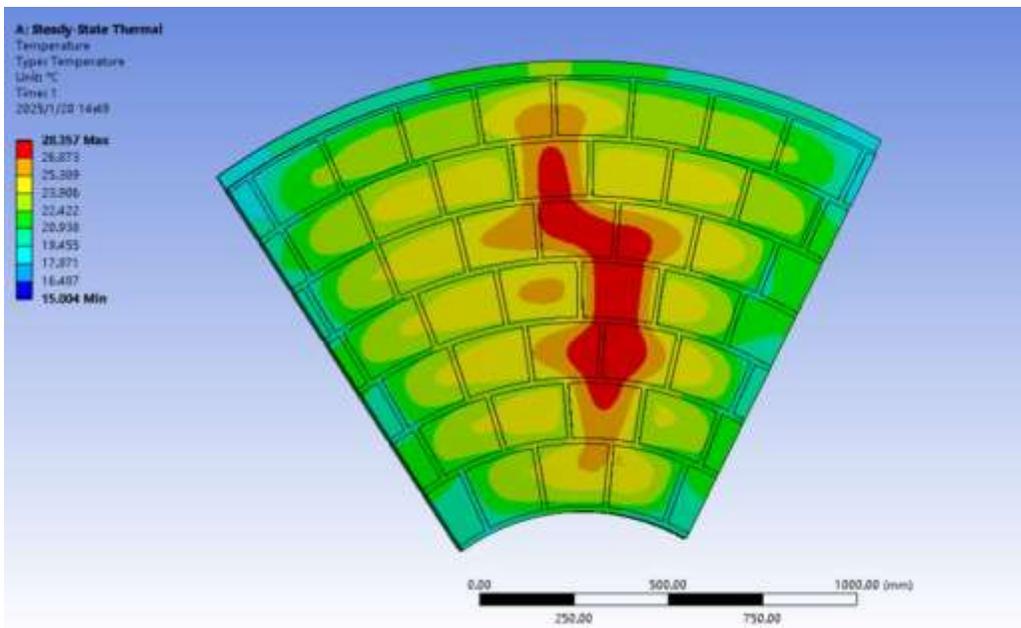
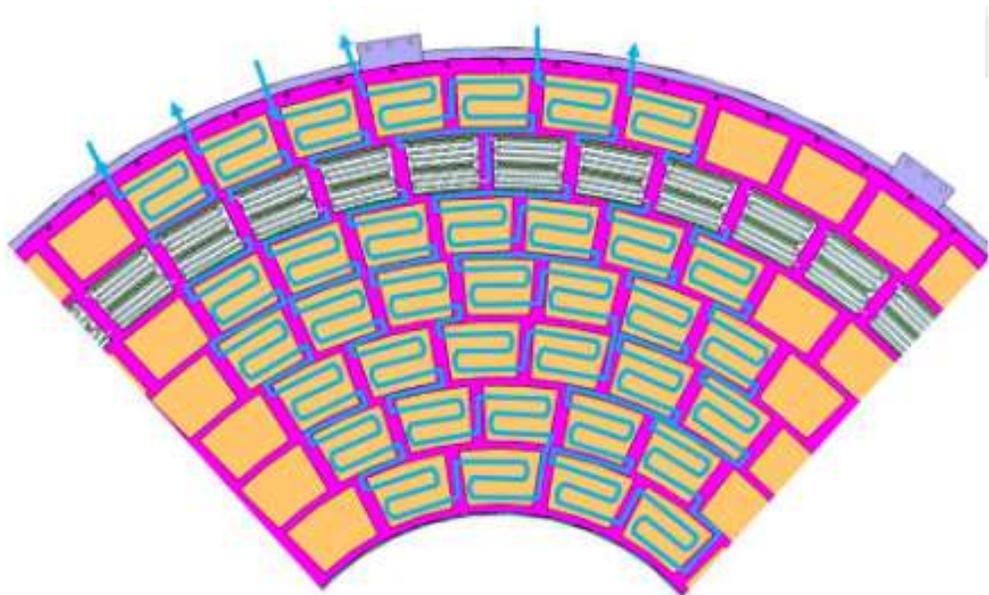
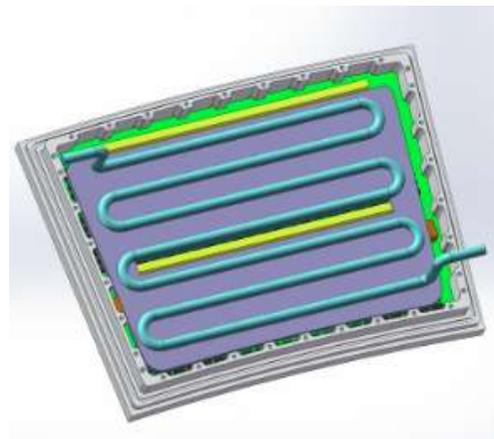
TPC筒部和端盖应力有限元分析



TPC筒部和端盖形变有限元分析

TPC端盖冷却系统设计

- 循环水冷系统维持温度低于 28°C ，保证前端电子学正常工作：
 - 每个端盖18个冷却回路，每个回路连接14个读出模块， Φ 向覆盖 $\sim 20^{\circ}$
 - 冷却水流速 1.5m/s ，控制进出口温差在 3.2°C 以内

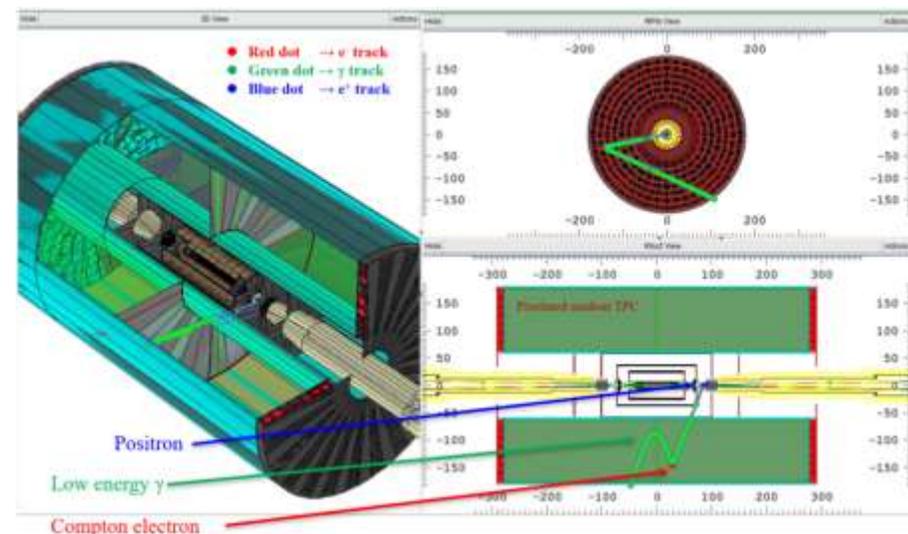


TPC端盖冷却系统设计及发热量有限元分析

■ TPC東流本底研究

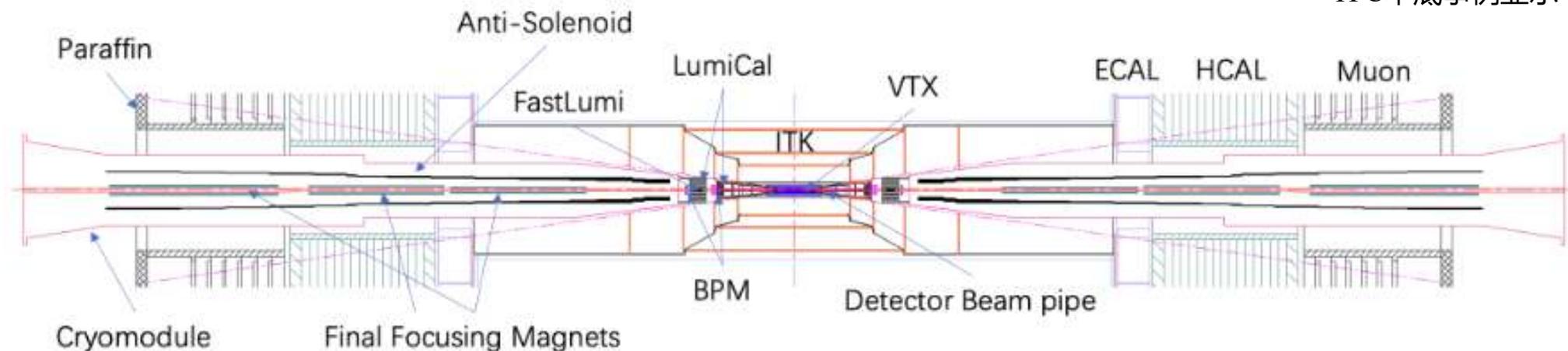
CEPC Machine-Detector Interface设计

- 束流本底主要从机器探测器接口(MDI)区域产生, 进入各个子探测器, 如VTX, ITK, TPC等
- CEPC MDI区域设计:
 - Crossing angle: 33 mrad
 - Z向长度: 对装点 $\pm 7\text{m}$
 - Final focusing magnets: 1.9 m
 - 关键组件: 束流管, LumiCal, BPM, 超导聚焦磁铁



$background e^+ annihilation \rightarrow \gamma(0.511\text{MeV}) \rightarrow Compton e^-$

TPC本底事例显示

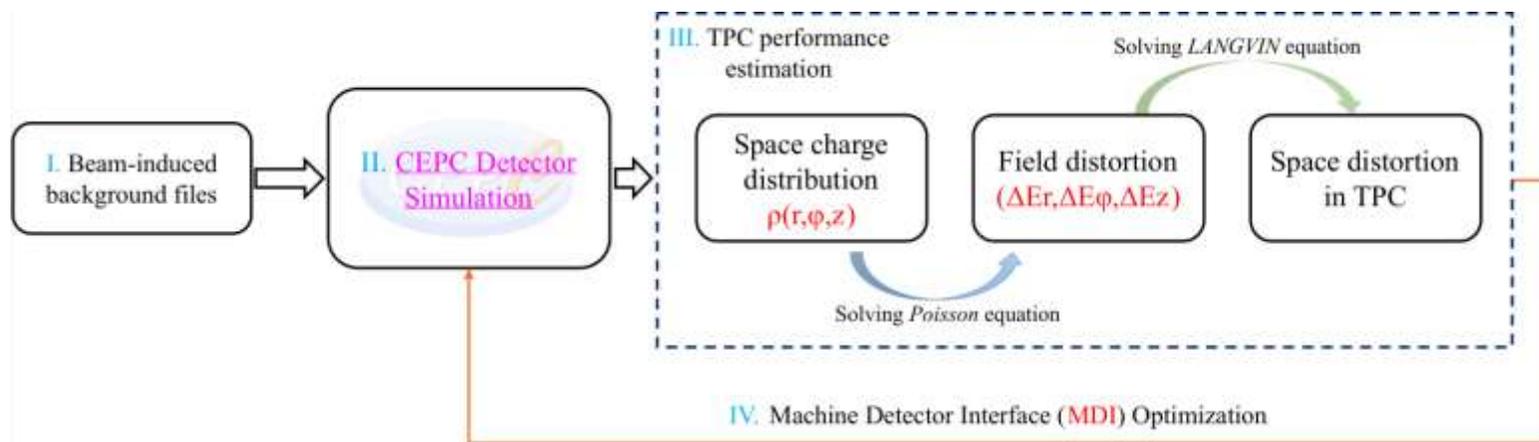


CEPC MDI设计

TPC束流本底模拟流程

- **研究目的**：评估束流本底对TPC性能的影响并进行优化
 - 空间电荷, 径迹畸变
 - 混入信号事例
- 基于[CEPCSW](#)开展了对两种束流本底模拟研究：
 - 本底包括Pair production和四种单束流本底 (BGC,BGB,TSC,BTH)
 - 束流本底模拟：产生子模拟 ([SAD etc.](#)) +探测器模拟 ([Geant4](#))

Backgrounds	Generation	Tracking	
Pair production	Guinea-Pig++	SAD	Luminosity related (BS files)
Beam-Gas Coulomb (BGC)	BGC in SAD		Single-Beam (Lost maps)
Beam-Gas Bremsstrahlung (BGB)	PyBGB		
Beam-Thermal Photon (BTH)	PyBTH		
Touschek Scattering (TSC)	TSC in SAD		

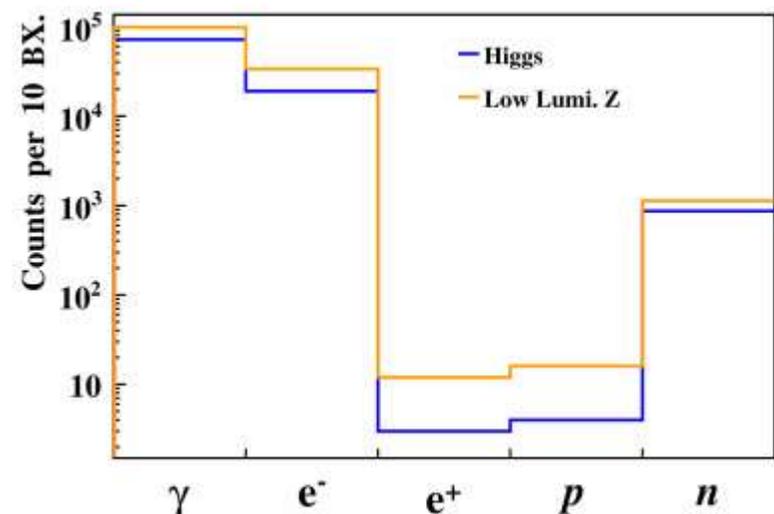
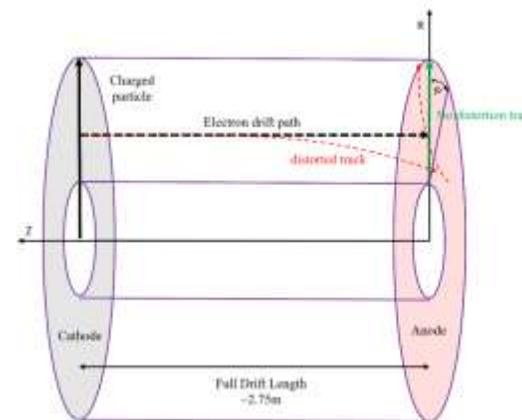


TPC束流本底模拟流程

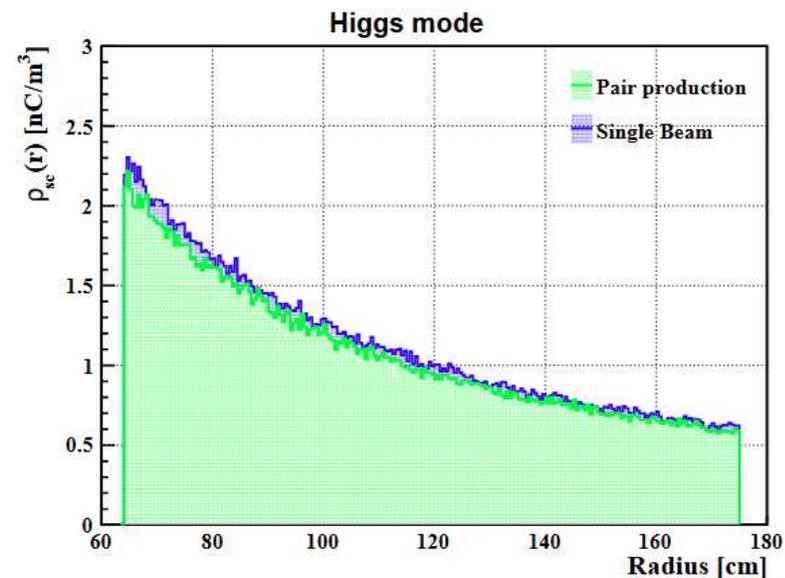
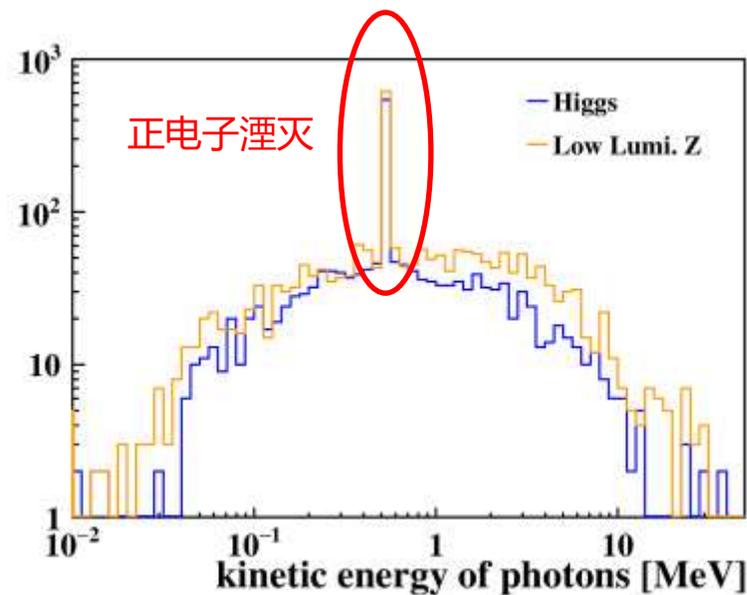
TPC束流本底研究

■ 基于CEPCSW 开展了对两种束流本底模拟研究:

- TPC中空间电荷主要由MDI区域产生的次级低能光子 (\sim MeV) 导致 (束流本底与束流管材料发生韧致辐射和正电子湮灭过程产生)
- TPC最大空间电荷密度接近 \sim 2-3 nC/m³ (Gain \times IBF \sim 1)



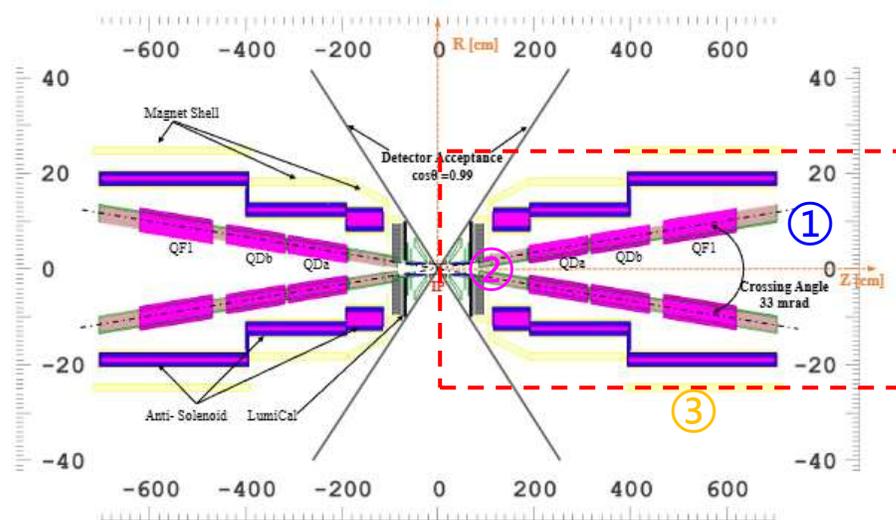
[10.1016/j.nima.2025.170776](https://doi.org/10.1016/j.nima.2025.170776)



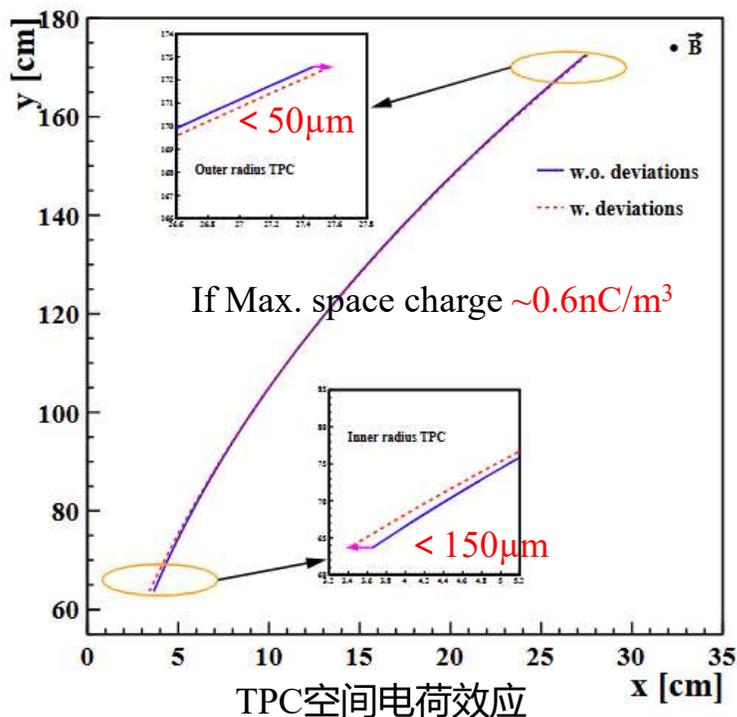
TPC束流本底粒子种类分布, 低能光子能量分布以及空间电荷密度分布

TPC空间电荷效应及进一步优化研究

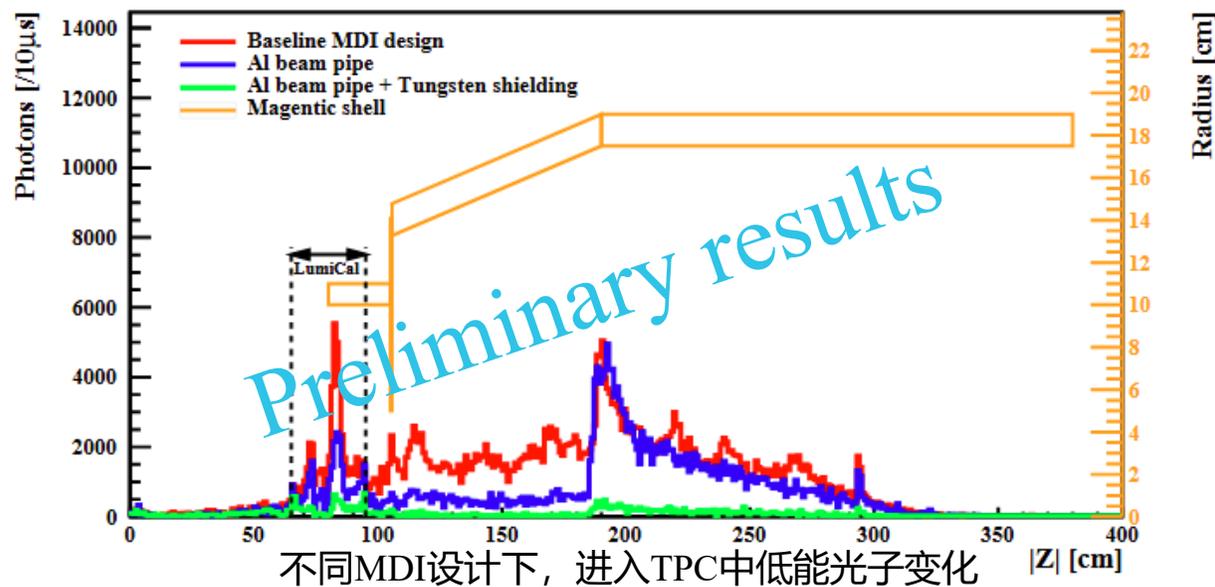
- 完成对MDI区域的初步优化，减少低能光子进入TPC：
 - 优化加速器组件，束流管材料，增加屏蔽，显著降低TPC中空间电荷密度
 - 优化后，Higgs和Low-Z模式下TPC中最大空间电荷均 $\leq 0.6 \text{ nC/m}^3$ ，引入额外的电子漂移偏差 $< 150 \mu\text{m}$
 - 进一步开展MDI优化，评估对动量测量的影响以及修正算法开发



CEPC MDI区域设计



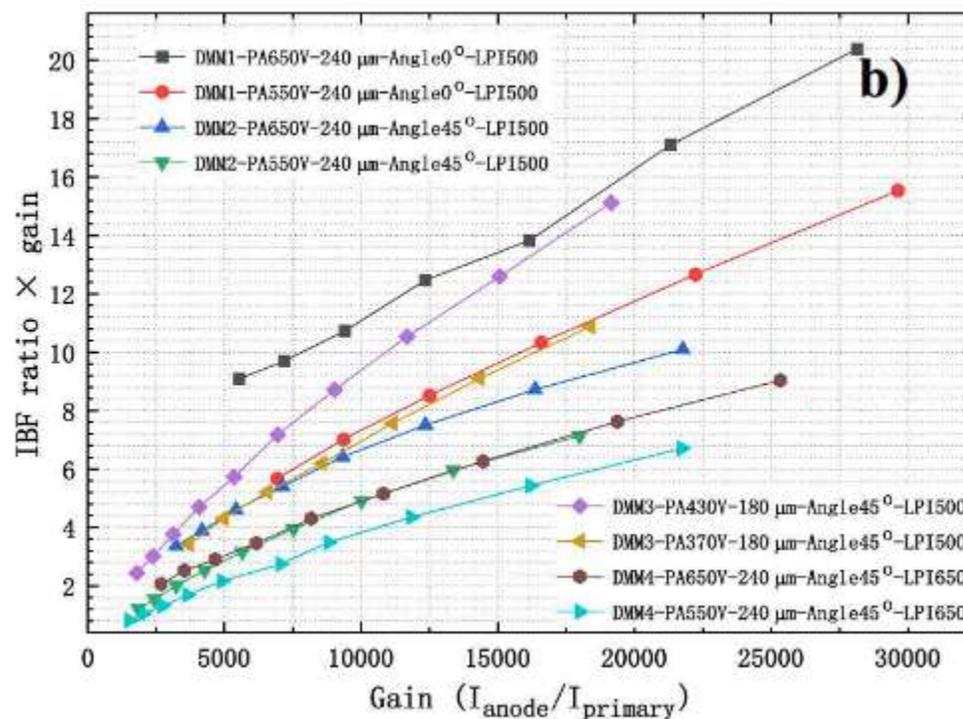
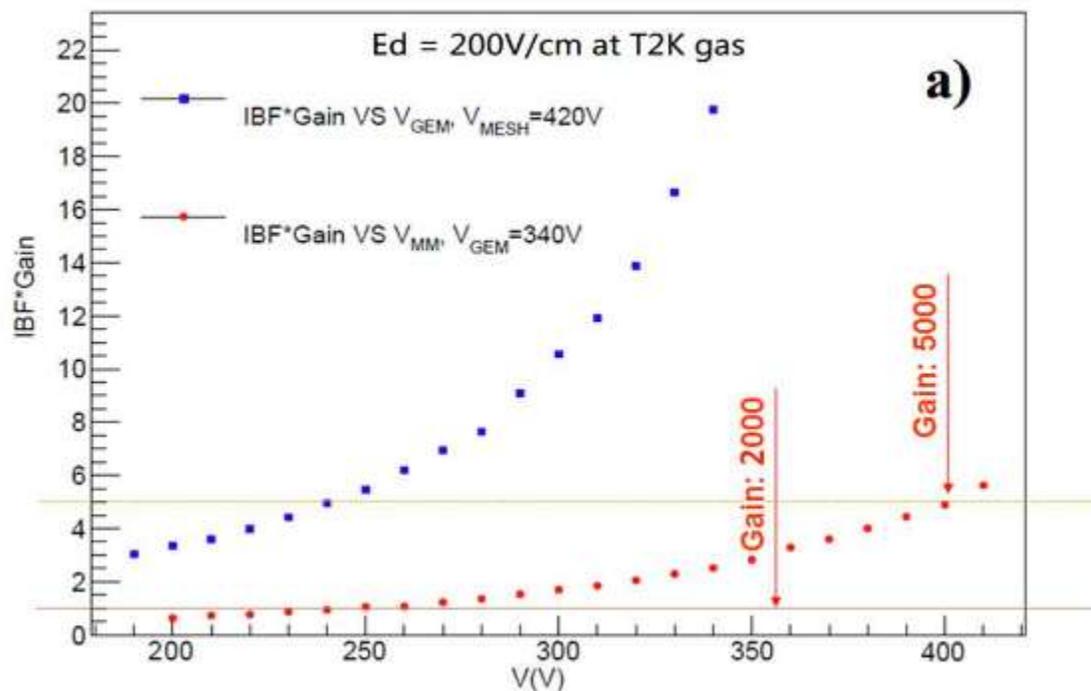
TPC空间电荷效应



不同MDI设计下，进入TPC中低能光子变化

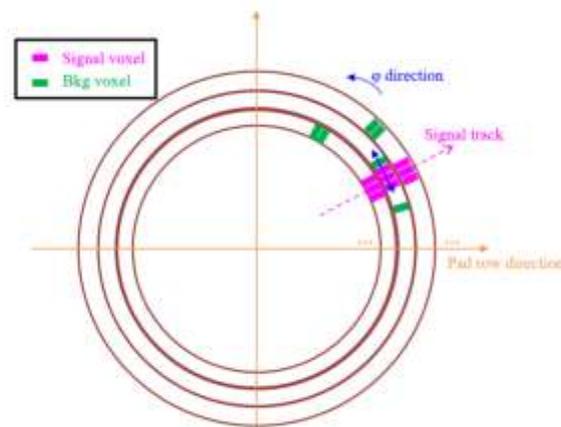
TPC读出模块IBF研究

- GEM+MicroMegas混合型读出模块成功研制：
 - $IBF \times Gain \sim 1$ @ $Gain=2000$ (原初离子水平)
 - 可实现在探测器工作中正离子反馈抑制
- 其他正离子反馈抑制方案：Double-MicroMegas(DMM), 石墨烯技术(Graphene)

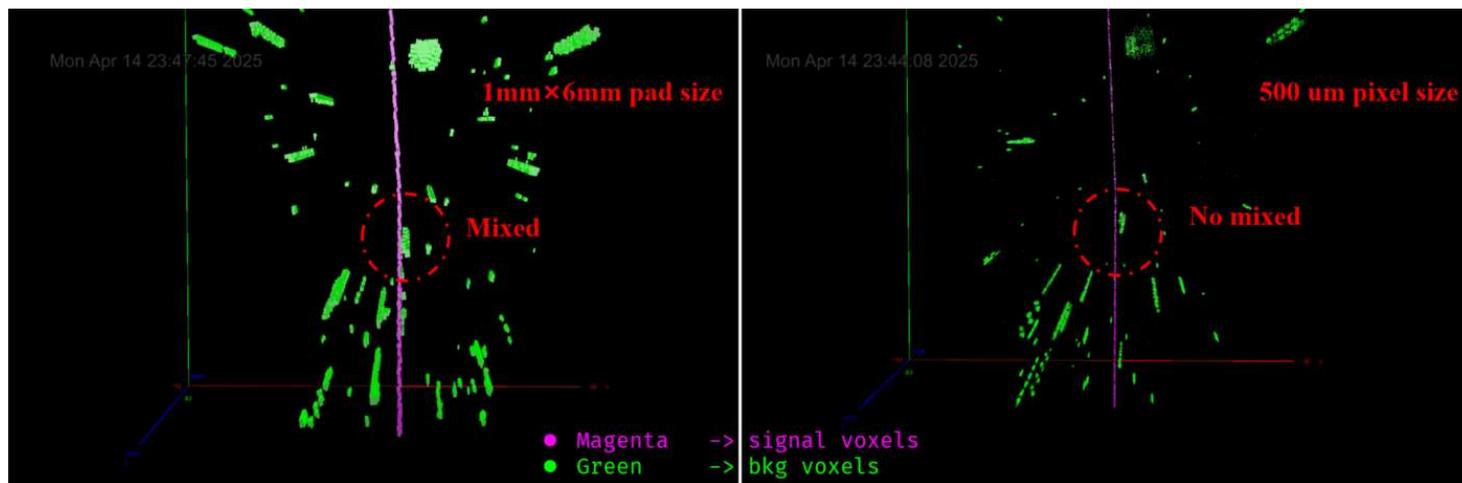
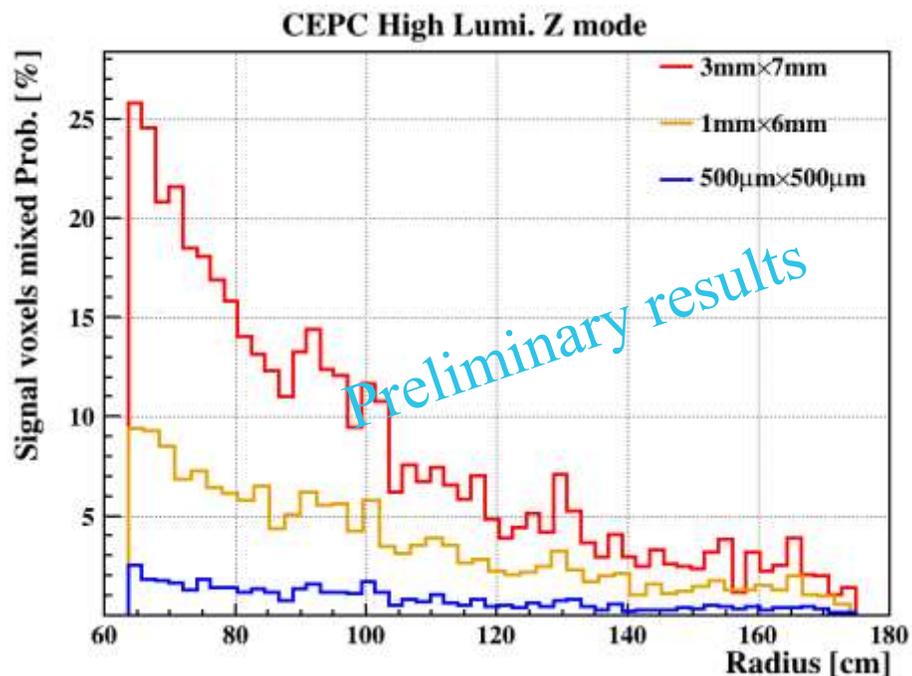


下一步研究计划：信号本底混合研究

- 实现对TPC中信号电子与束流本底电子进行同时漂移，扩散，3D体素化以及混合等过程
- CEPC不同运行模式下TPC不同pad大小的信号体素 (voxel) 混合入本底的概率
 - 信号体素混合概率: $\text{Number of mixed voxels} / \text{Total signal voxels}$
- 相比于传统pad读出, $500 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$ 像素读出, 在5倍安全因子下, 对于高亮度Z-pole模式, 信号混合概率 $<3\%$



信号本底体素搜寻示意图

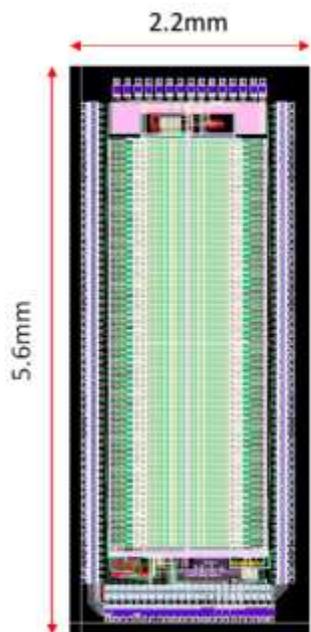
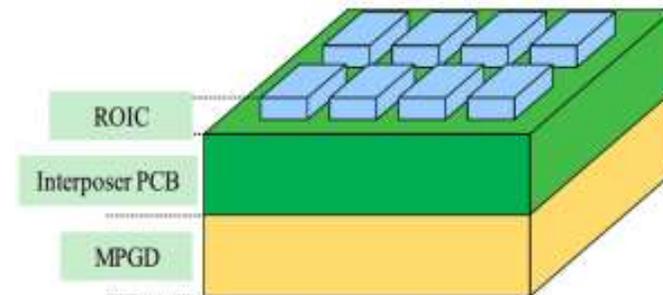


信号径迹: Pion , $20\text{GeV}/c$, $\theta=85^\circ$, High Lumi. Z模式下, 不同pad大小混入本底的概率

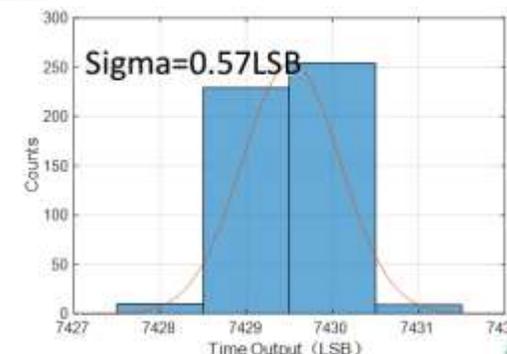
像素型TPC原型机实验研究——前端电子学

像素型TPC前端低功耗ASIC芯片TEPIX研制:

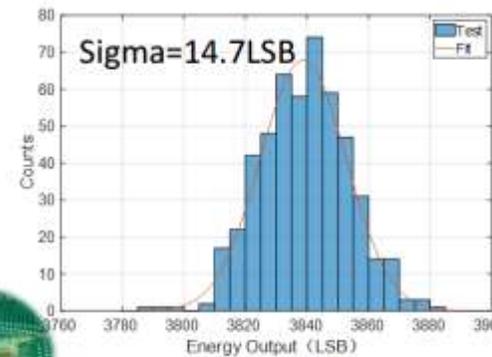
- 180nm制程, 128通道
- 积分非线性INL<1%, 时间精度<1LSB(<10ns), ENC<300e⁻
- 低功耗: ~200 mW/cm² @180nm ➔ 100 mW/cm² @65nm



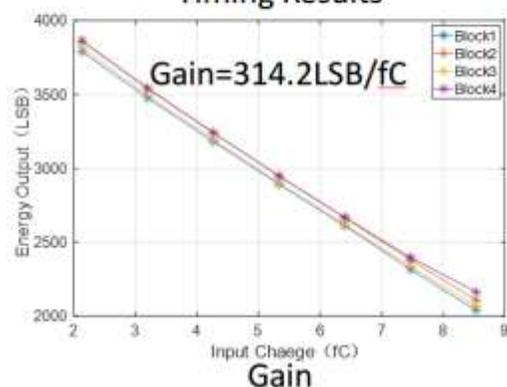
Parameter	Spec
Number of channels	128
Power Consumption	Analog<30mW
	Digital<30mW
ENC	~300 e(high gain)
Dynamic Range	25fC(high gain)
	150fC(low gain)
INL	<1%
Time Resolution	<10ns



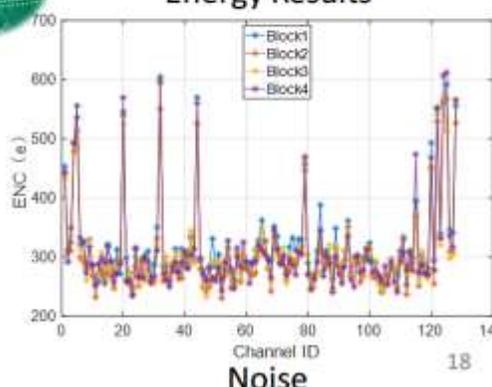
Timing Results



Energy Results



Gain

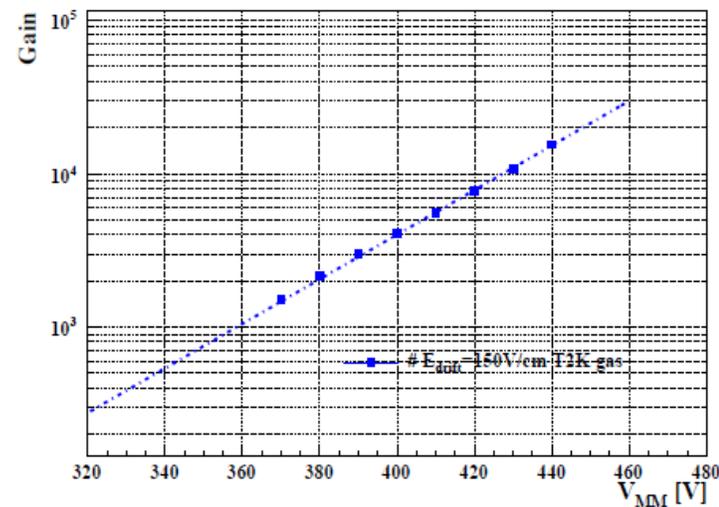
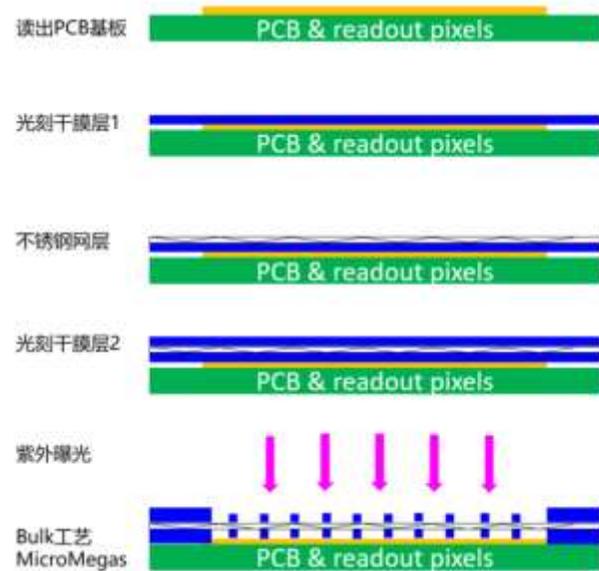
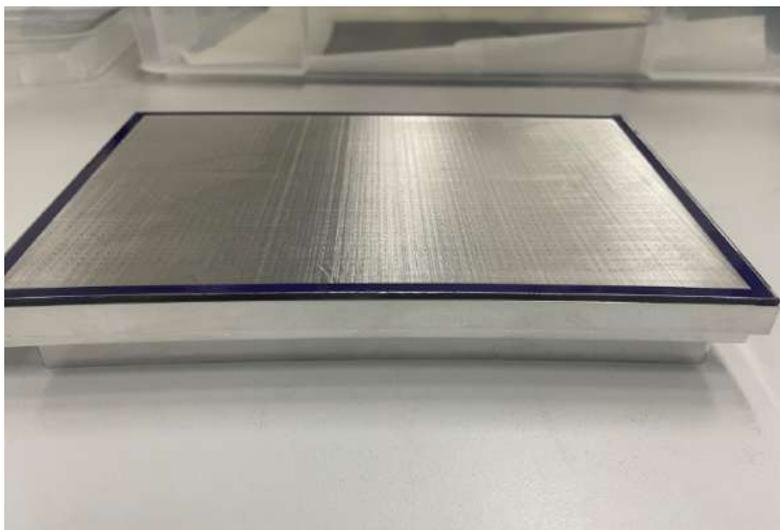
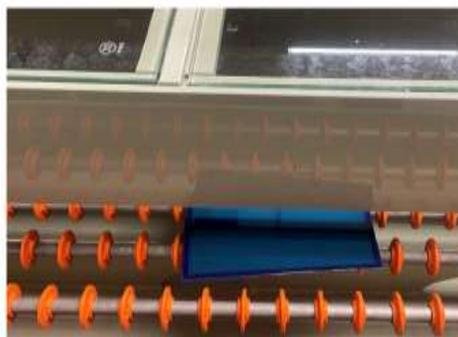
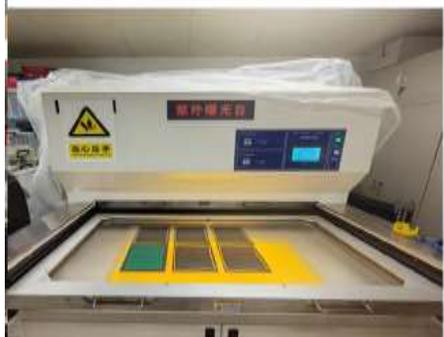
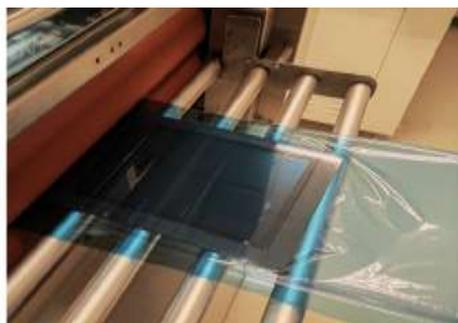


Noise

FEE ASIC: TEPIX芯片测试

像素型TPC原型机实验研究——探测器模块

- ◆ 完成Micromegas探测器批量研制
 - ◆ Pilar高度 $100\mu\text{m}$, Pilar精度好于 $1\mu\text{m}$
- ◆ 在工作气体中工作良好
- ◆ 后续将继续开展探测器电子学联调, 开展激光和束流实验



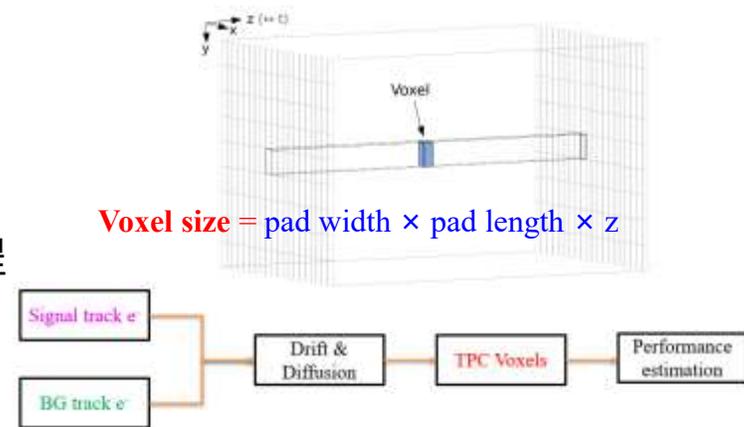
小结

- 完成CEPC TPC整体设计方案，解决筒部，端盖，冷却，与内外子探测器配合等关键技术问题；
- 完成CEPC Ref-TDR文本的撰写；
- 完成了像素型读出模块电子学和探测器的研制，继续开展下一步实验
- 感谢CEPC物理团队，软件模拟团队，MDI团队，机械设计及磁铁团队各位老师的建议和贡献
- 感谢清华大学电子学团队的贡献
- 感谢LCTPC国际合作组和CERN DRD1气体探测器合作组的讨论和贡献

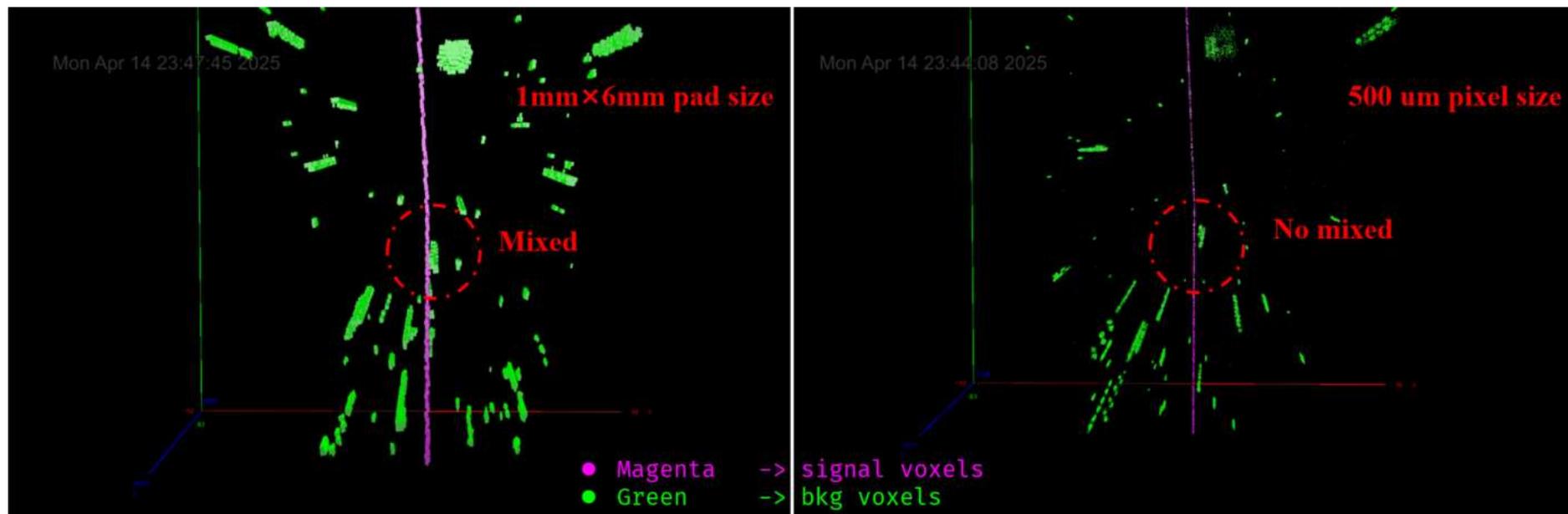
谢谢各位专家提问!

Backup1: TPC信号本底混合研究

- 在像素型TPC模拟软件框架的基础上，完成了信号本底混合功能的开发
 - 集成EDM4hep, PODIO等外部库，可直接读取MDI组提供的束流本底数据
 - 实现对TPC中信号电子与束流本底电子进行同时漂移，扩散，3D体素化以及混合等过程
 - 提供了多种工具，实现对混合后的体素进行可视化，Voxel Occupancy的计算等功能



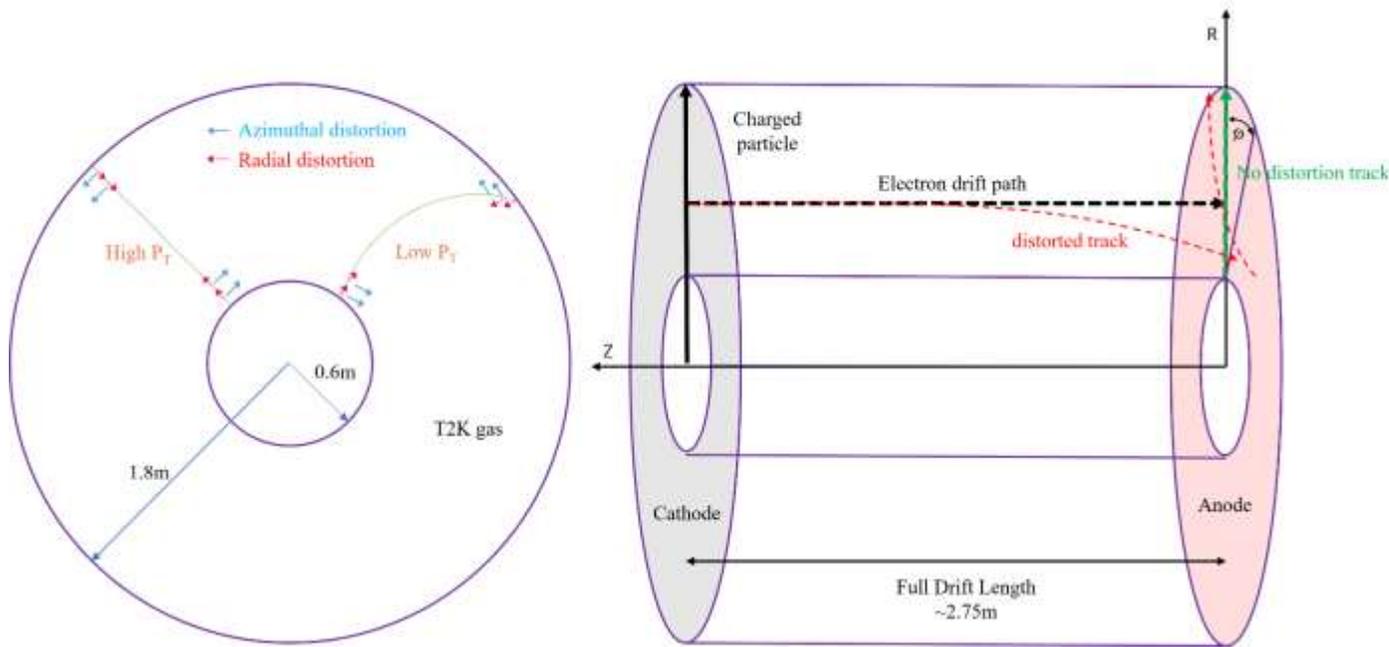
CEPC TPC信号本底混合软件框架



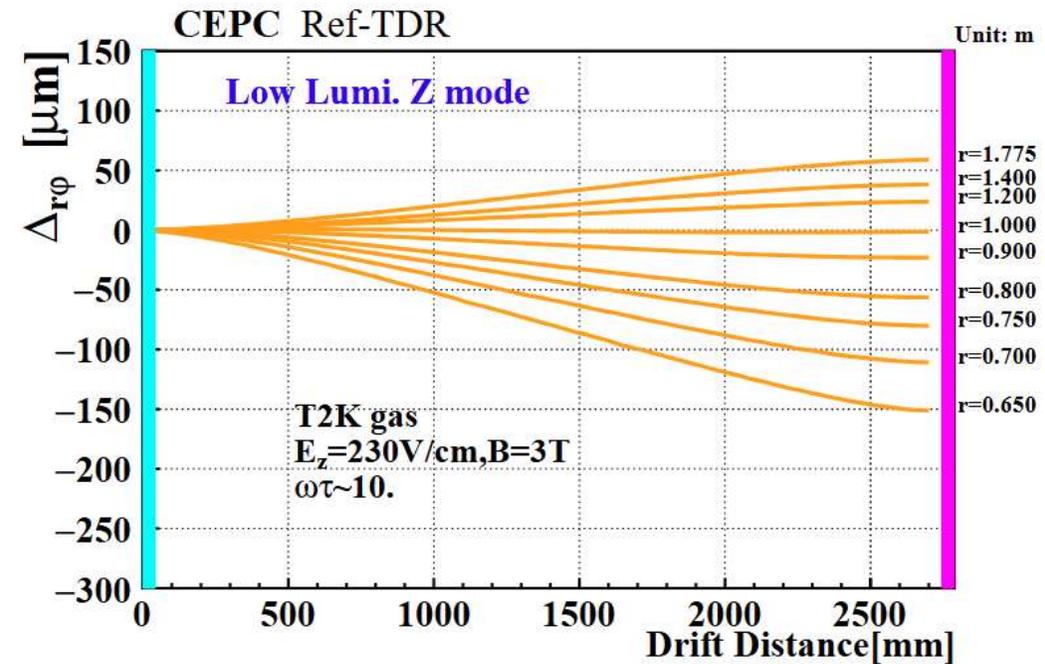
CEPC TPC信号和本底混合后voxels事例显示

Backup2:

- Deviations along electron drifting paths:



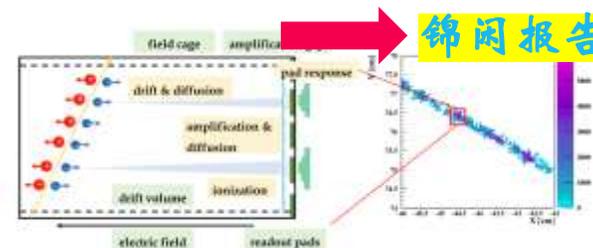
Max. space charge $\sim 0.62 \text{ nC/m}^3$



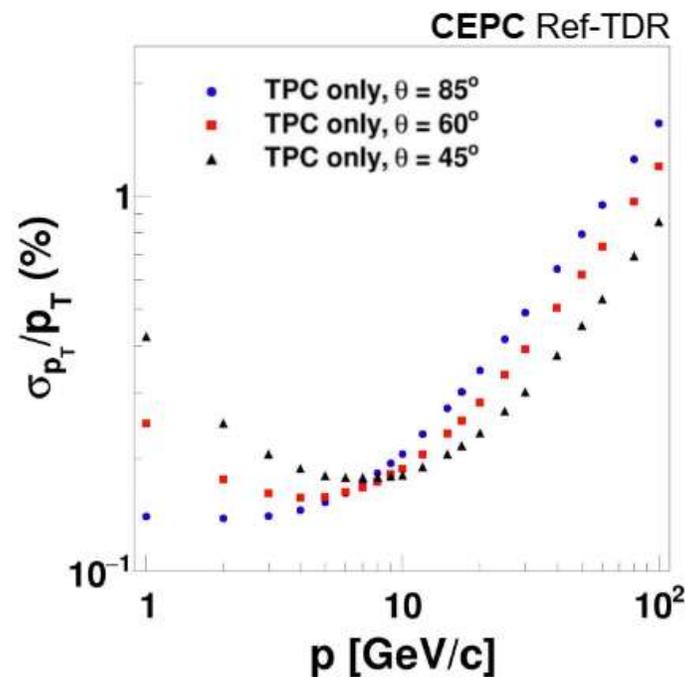
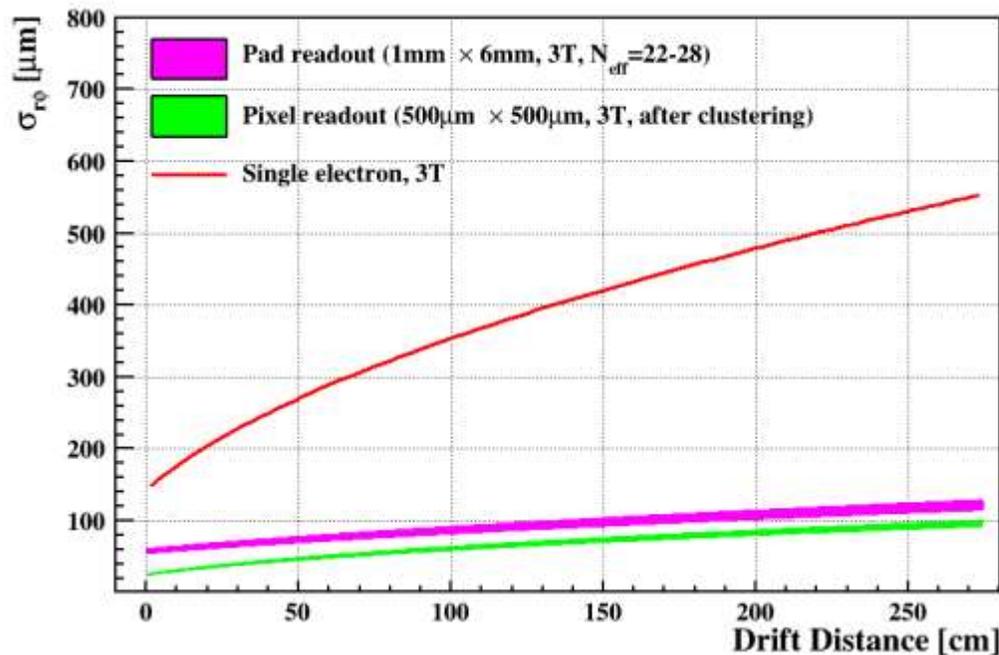
Backup3:

基于像素型读出TPC软件框架，研究了TPC径迹探测和粒子鉴别性能

- 相比于传统pad型读出，高粒度像素型TPC相同径迹长度上位置分辨更好， $\sigma_{r\phi}$ 好于 $100\mu\text{m}@2.75\text{m}$
- 像素型TPC不受径迹与读出pad夹角 ϕ 的影响
- 横动量相对分辨 $\sim 1\%$ ， $\sigma(1/P_T) \sim 1.5 \times 10^{-4} (\text{GeV}/c)^{-1}$ @ $1\text{GeV}/c - 100\text{GeV}/c$



CEPC TPC全模拟研究框架



TPC空间位置分辨与动量分辨性能模拟