



环形对撞机中高粒度读出时间投影室技术 研究进展

祁辉荣

中国科学院高能物理研究所

中国物理学会高能物理分会第十二届代表学术年会 广州

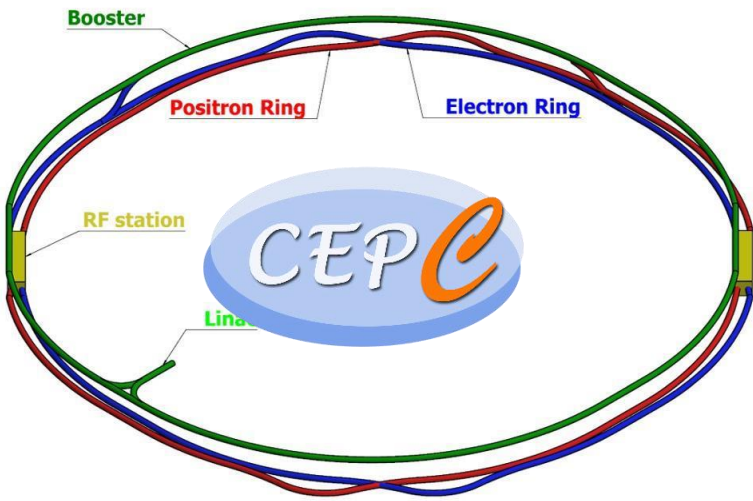
July 15, 2026

报告内容

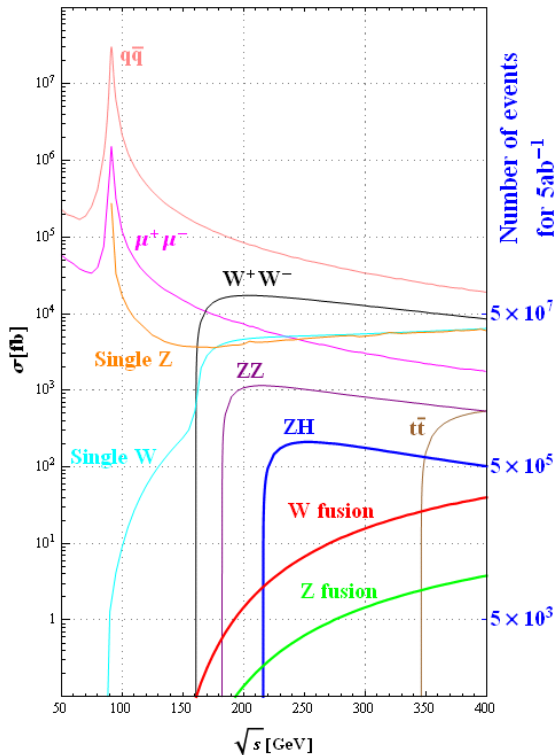
- 环形正负电子对撞机物理需求
- 时间投影室技术
- TPC应用于正负电子对撞机研究进展
- 小结

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	$L / \text{IP} [\times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}]$	5.0	115	16	0.5
	$\int L dt [\text{ab}^{-1}, 2 \text{ IPs}]$	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	$L / \text{IP} [\times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}]$	8.3	192	26.7	0.8
	$\int L dt [\text{ab}^{-1}, 2 \text{ IPs}]$	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



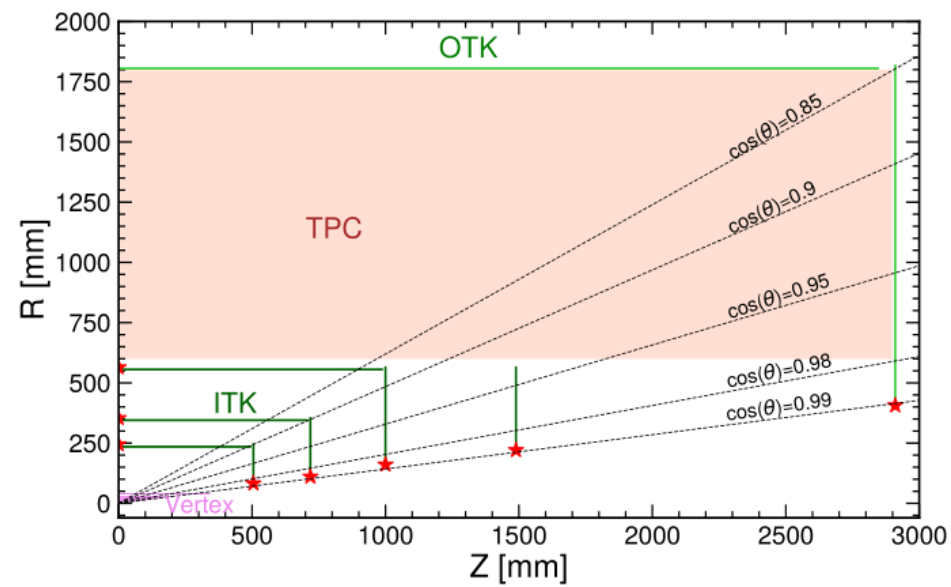
- Precision Higgs Physics at CEPC ([CPC V43, No.4 \(2019\) 043002](#))
- Flavor Physics at CEPC([arXiv:2412.19743](#))
- New Physics Search at CEPC([arXiv:2505.24810](#))

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：

- 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
- 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~3%

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



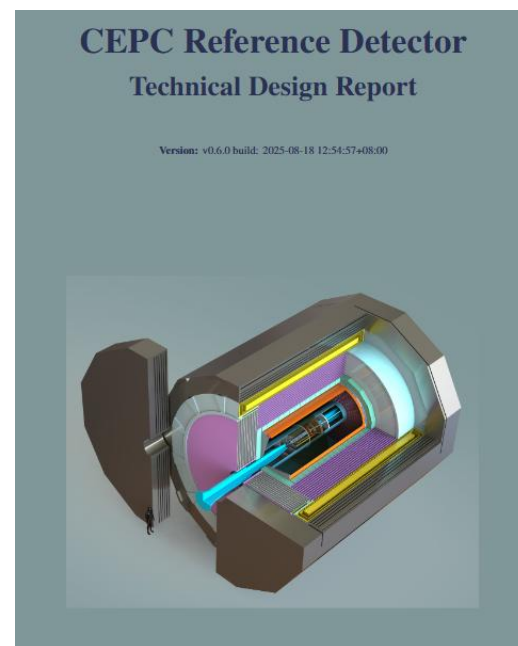
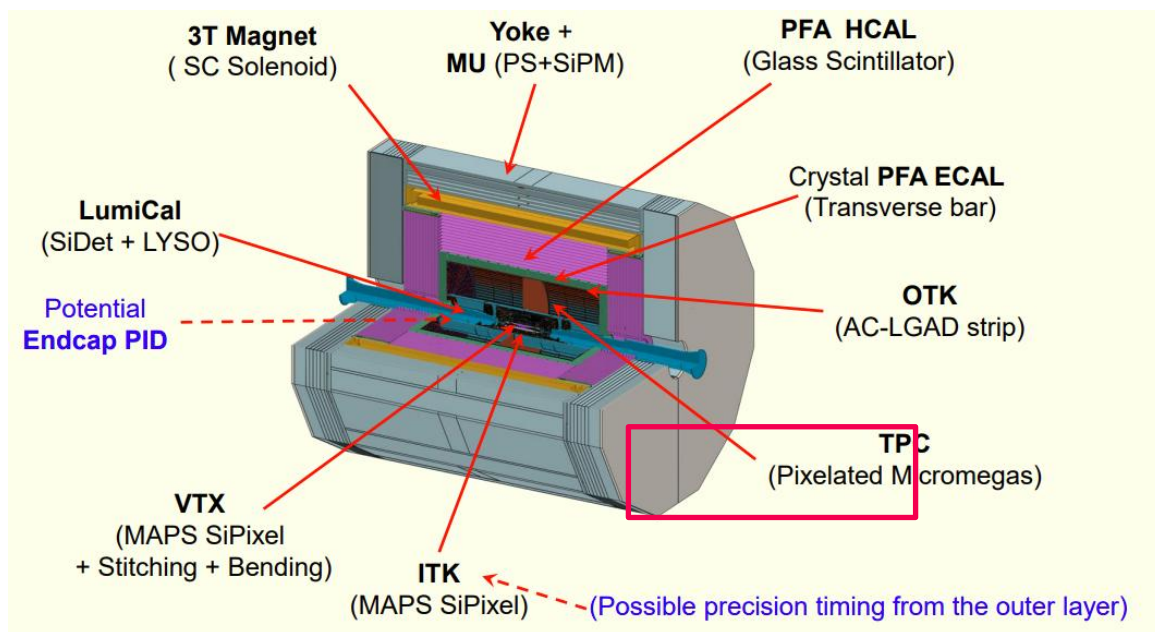
Sub-system	Key technology	Key Specifications
Vertex	6-layer CMOS SPD	$\sigma_{r\phi} \sim 3 \text{ }\mu\text{m}$, $X/X_0 < 0.15\%$ per layer
Tracking	CMOS SPD ITK, AC-LGAD SSD OTK, TPC + Vertex detector	$\sigma\left(\frac{1}{P_T}\right) \sim 2 \times 10^{-5} \oplus \frac{1 \times 10^{-3}}{P \times \sin^{3/2} \theta} \text{ (GeV}^{-1}\text{)}$
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:

- 极低质量($\sim 0.1X_0$), 精确位置测量($\sim 100\mu\text{m}$), 动量分辨高, 优异模式识别能力(Pattern Recognition)
- 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(Particle Identification)
- 在许多大型粒子物理实验(ALICE, STAR)作为主径迹探测器, 现为CEPC Ref-TDR中的**基准主径迹探测器**



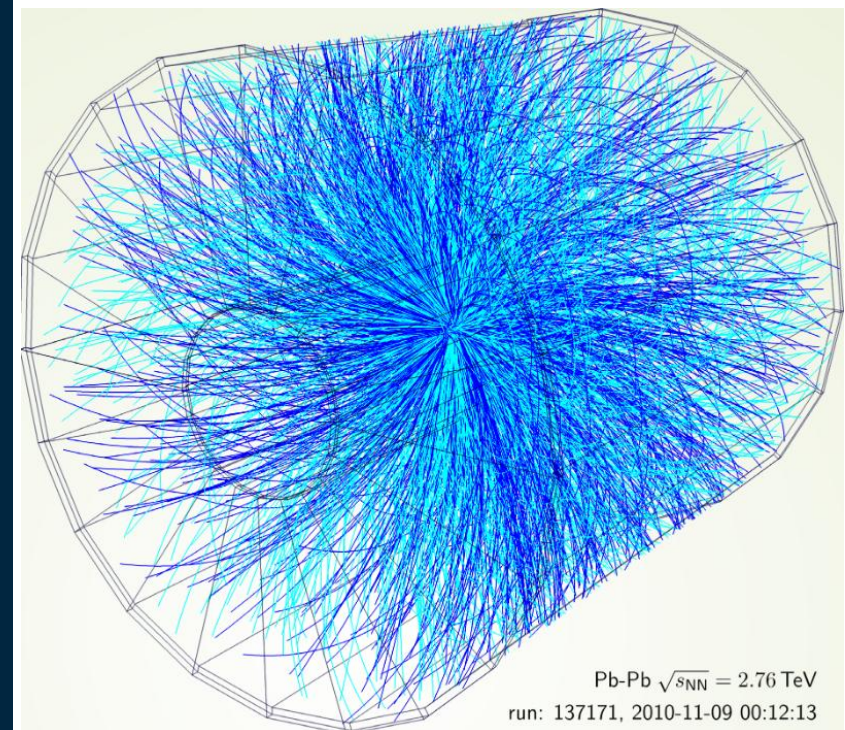
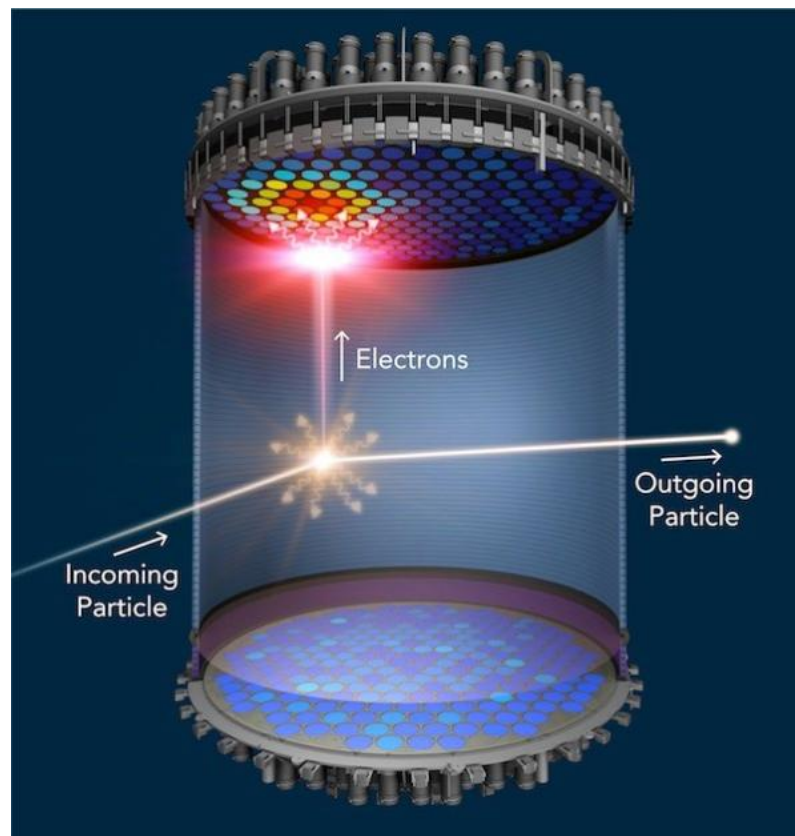
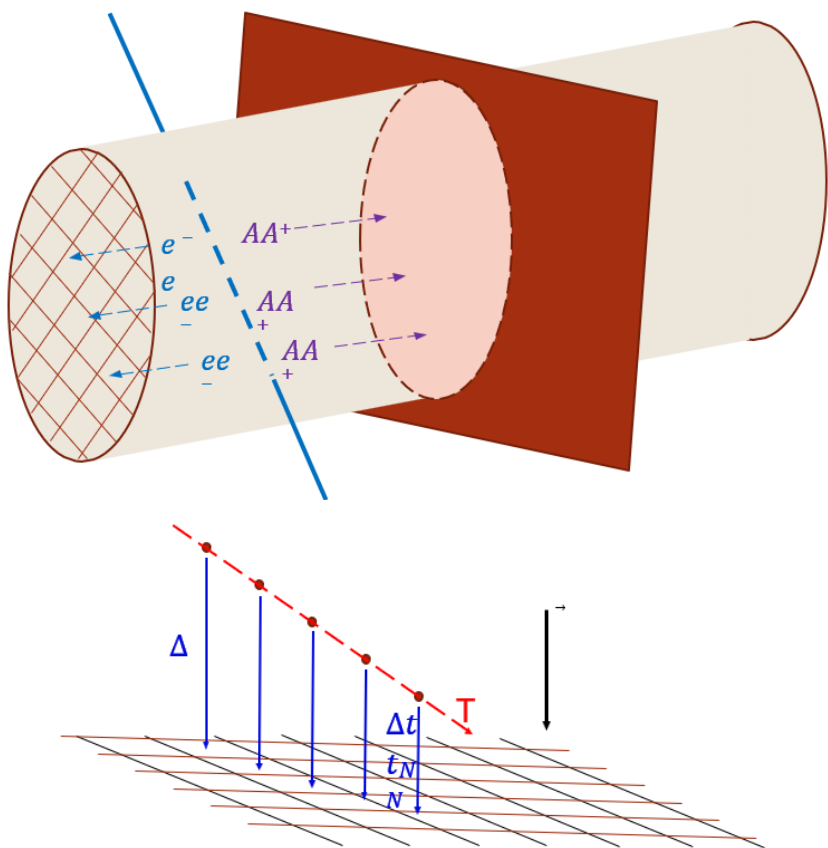
CEPC Detector layout in CEPC ref-TDR

■ TPC应用于正负电子对撞机的研究进展

- 整体结构设计
- 束流本底研究
- 原型机研制进展

什么是Time Projection Chamber

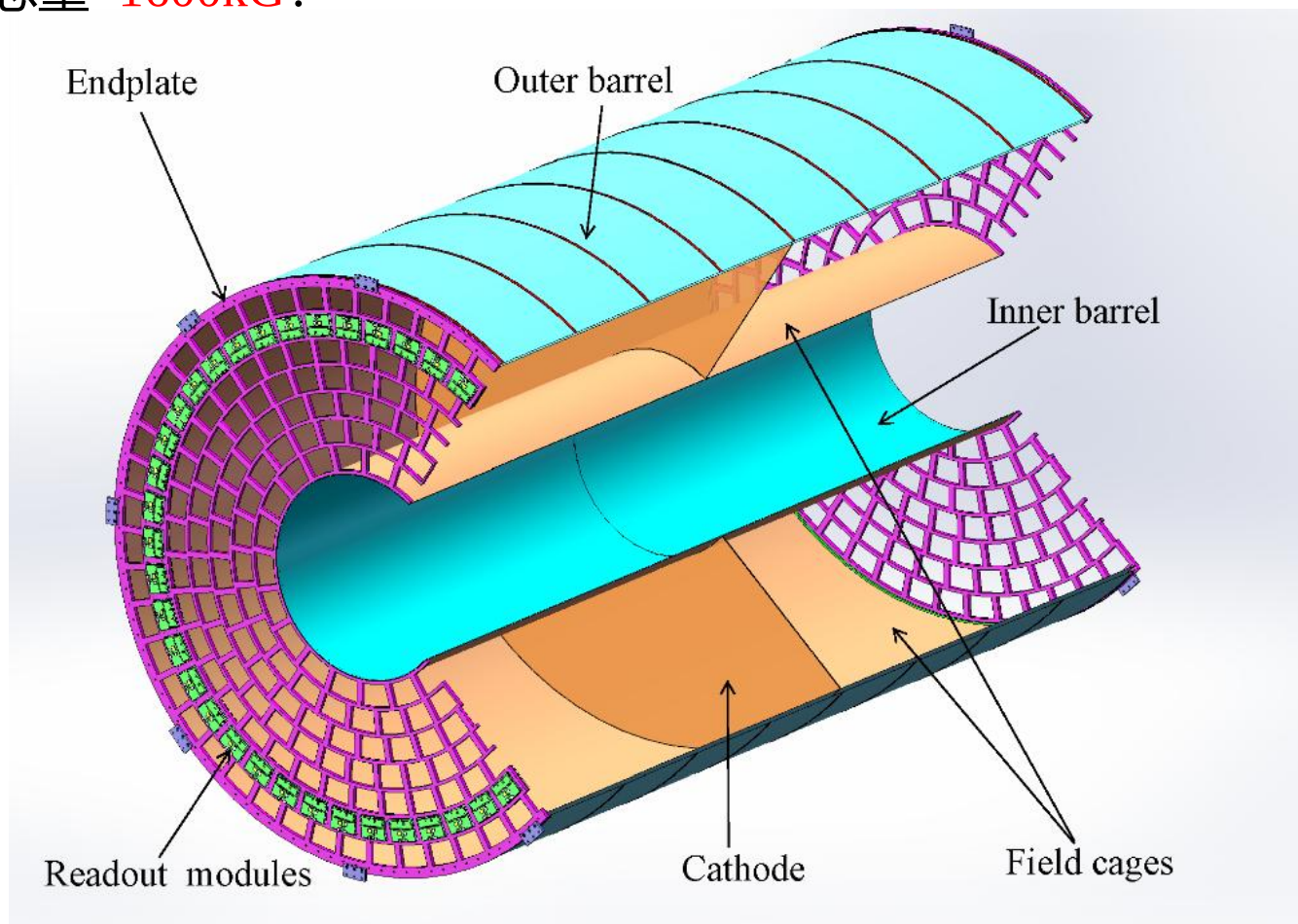
- 1974年，第一次被David R. Nygren (LBNL) 研制
- 应用于各种高能物理实验（对撞机实验、暗物质实验、中微子实验等）



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)作为筒部材料
- 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

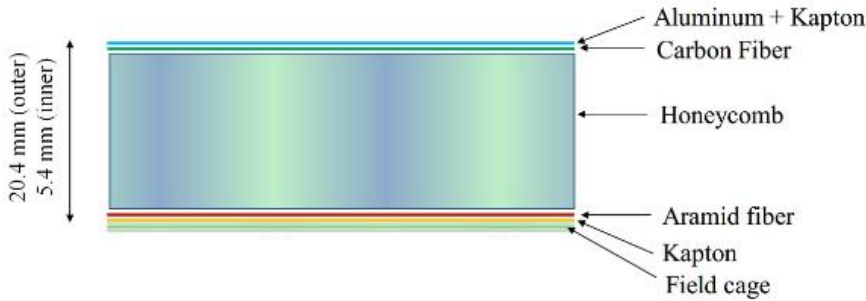


CEPC TPC整体设计

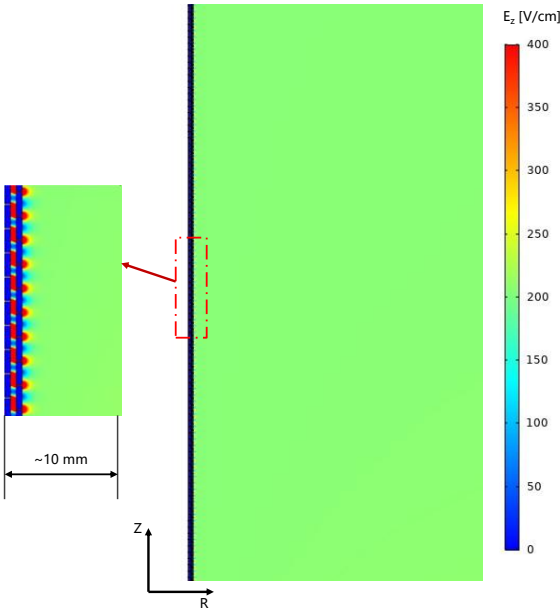
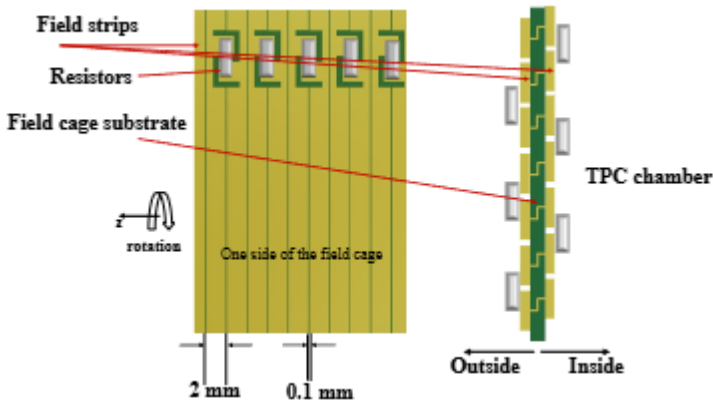
TPC筒部设计

- TPC筒部超轻碳纤维材料(QM55)作为筒部材料，筒部总物质量<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



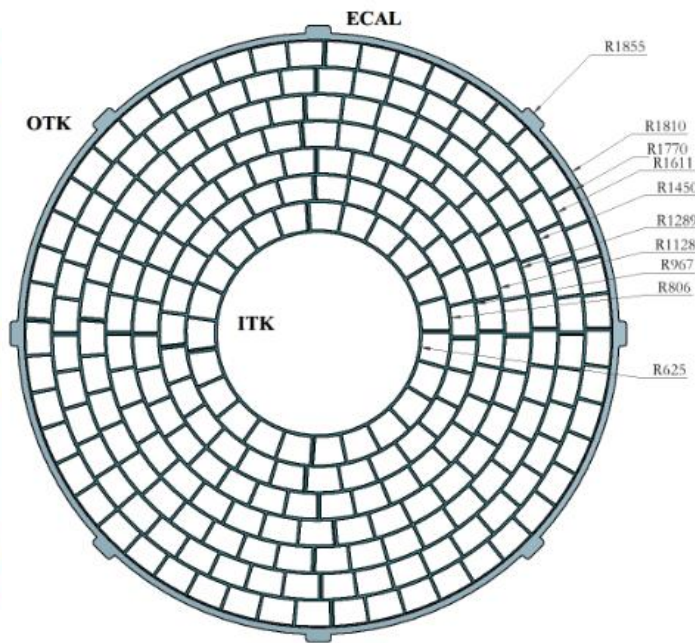
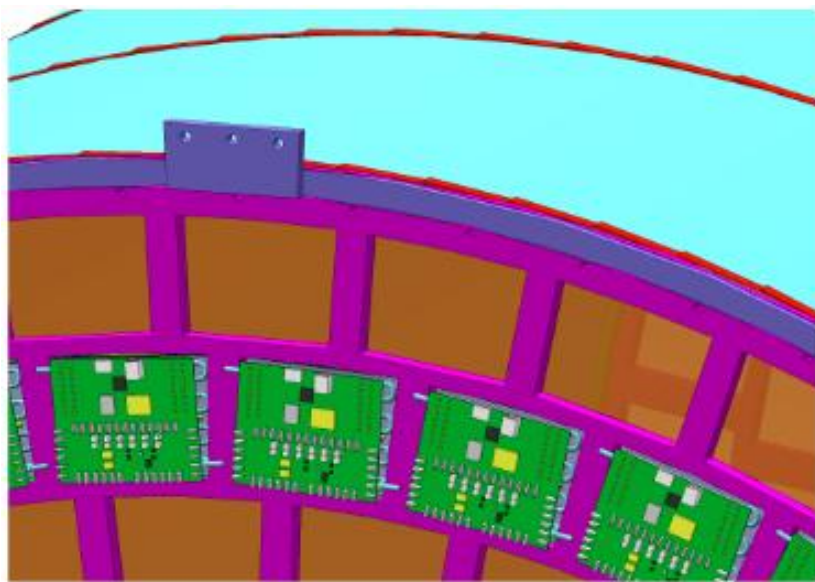
CEPC TPC筒部设计



CEPC TPC场笼设计及电场模拟

TPC端盖设计

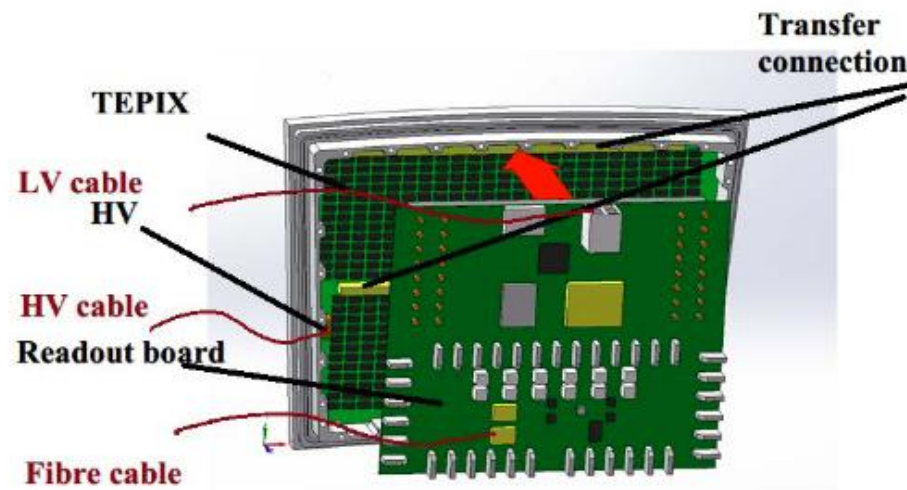
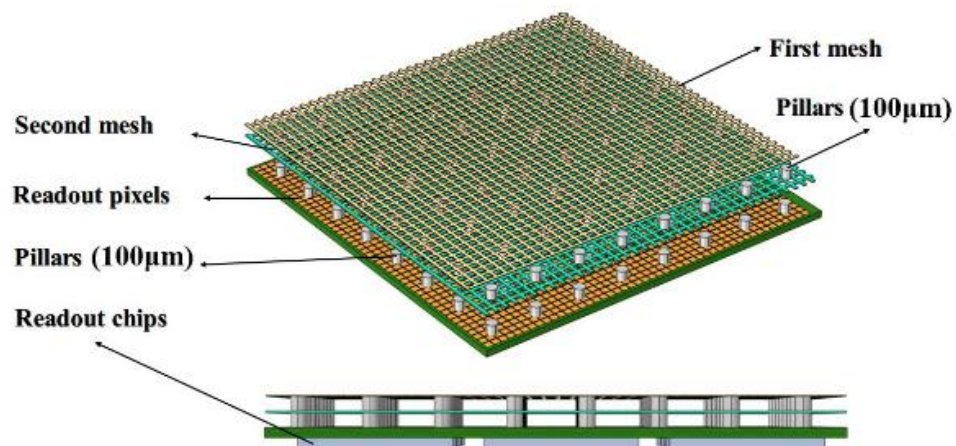
- 端盖共 $248 \times 2 = 496$ 个模块，O-ring与端盖密封，总物质量 $\sim 15\% X_0$
 - 模块集成微结构气体探测器，读出像素，前端电子学，冷却；易于安装和维护
- 端盖一共7层，三种不同尺寸模块，实现端盖 $\sim 96\%$ 灵敏区覆盖



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 $(500\mu m)^2$
- 前端为自主研制低功耗ASIC芯片：**TEPIX**（180nm制程），端盖总功耗 $\sim 10kW/\text{端盖}$
- 复合光缆提供每个模块的高低压供电，接地以及读出

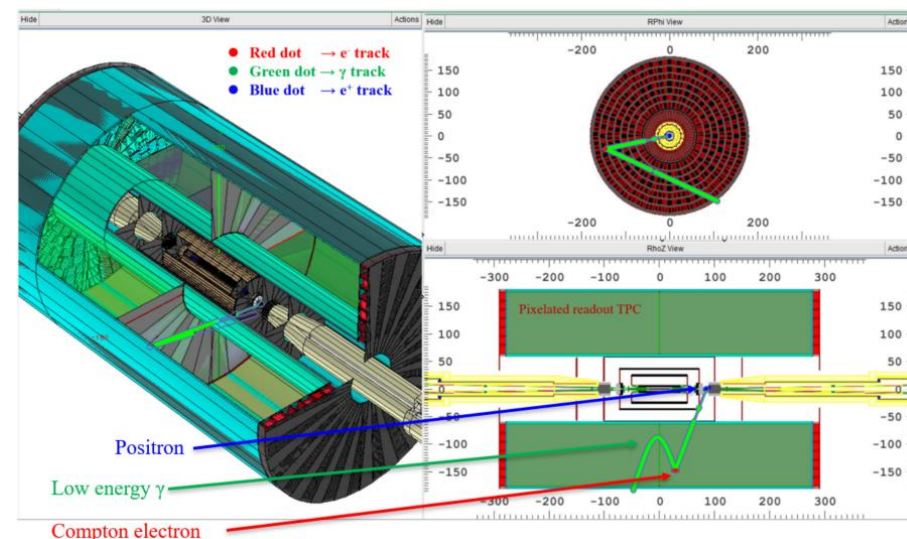


TPC端盖设计，双层Micromegas抑制IBF

■ TPC束流本底研究

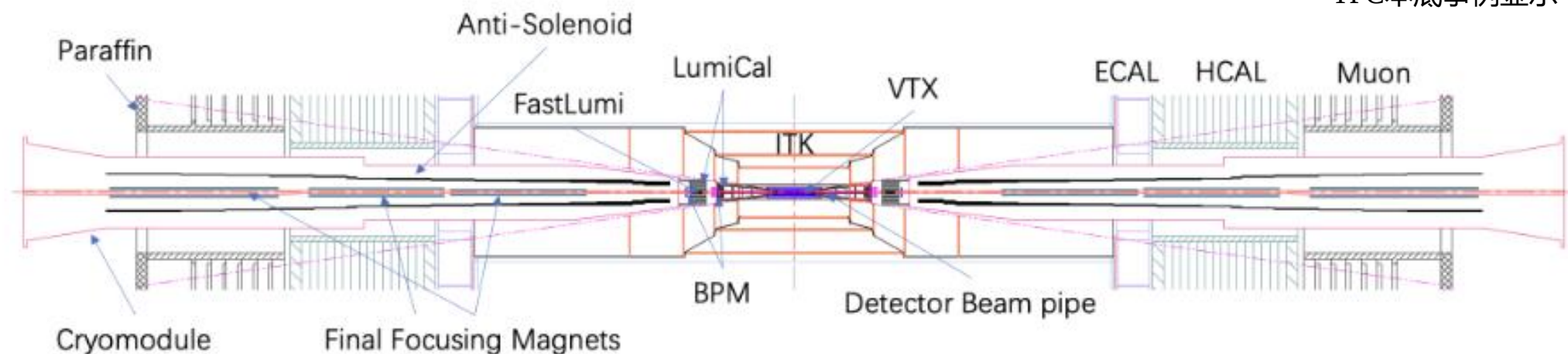
CEPC Machine-Detector Interface设计

- 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

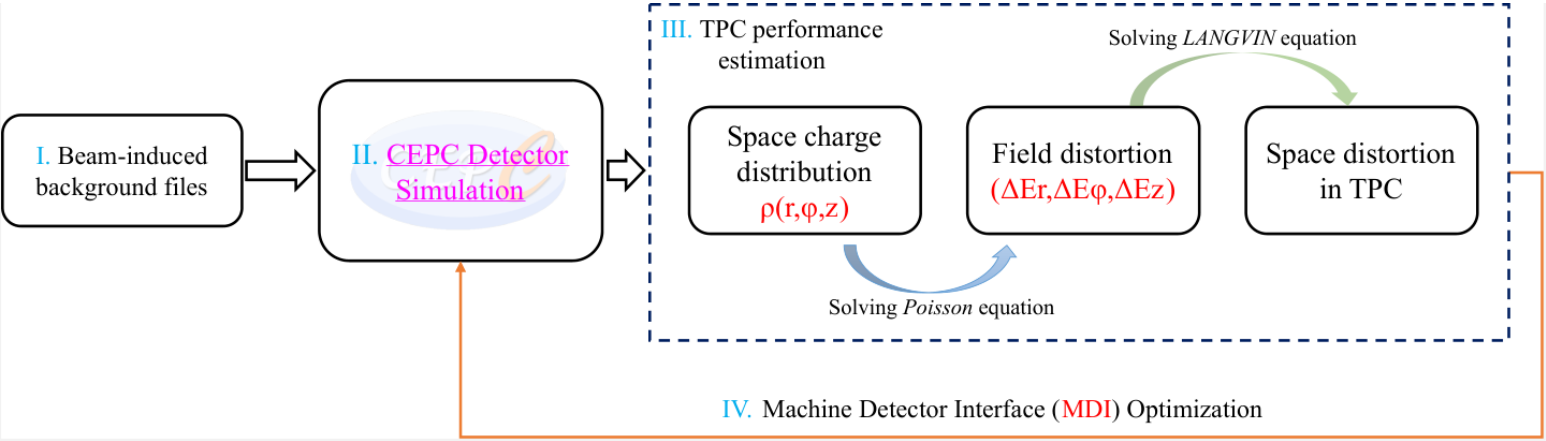
■ 研究目的：评估束流本底对TPC性能的影响并进行优化

- 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）

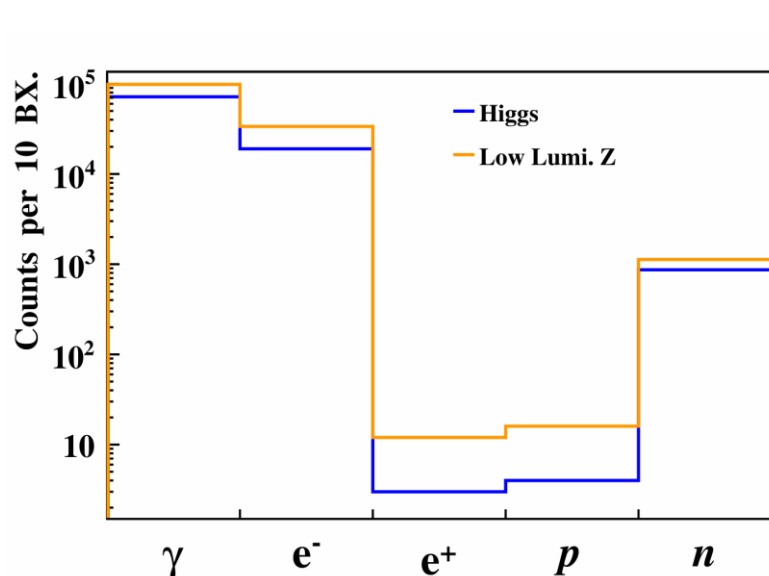
Backgrounds	Generation	Tracking	
Pair production	Guinea-Pig++	SAD	Luminosity related (BS files)
Beam-Gas Coulomb (BGC)	BGC in SAD		Single-Beam (Lost maps)
Beam-Gas Bremsstrahlung (BGB)	PyBGB		
Beam-Thermal Photon (BTH)	PyBTH		
Touschek Scattering (TSC)	TSC in SAD		



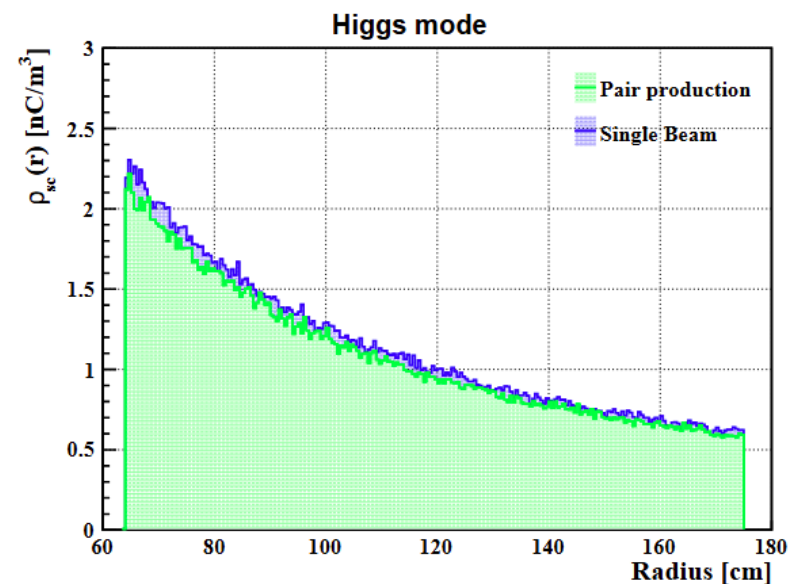
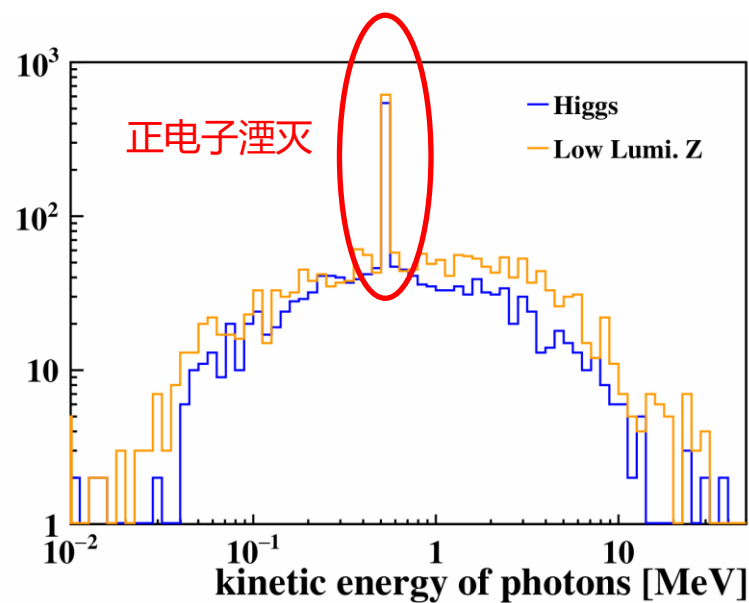
TPC束流本底模拟流程

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 ($\sim \text{MeV}$) 导致, 主要由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 $\sim 2\text{-}3 \text{ nC/m}^3$ ($\text{Gain} \times \text{IBF} \sim 1$)



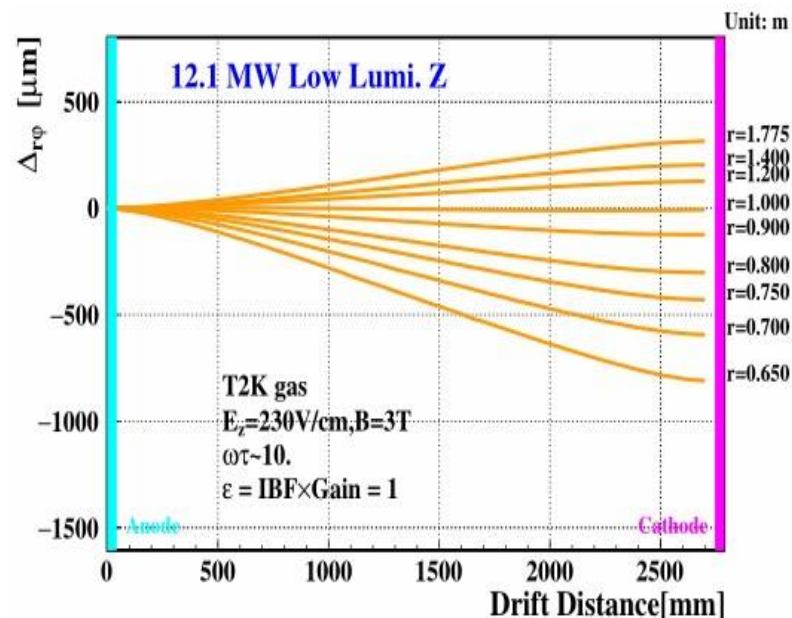
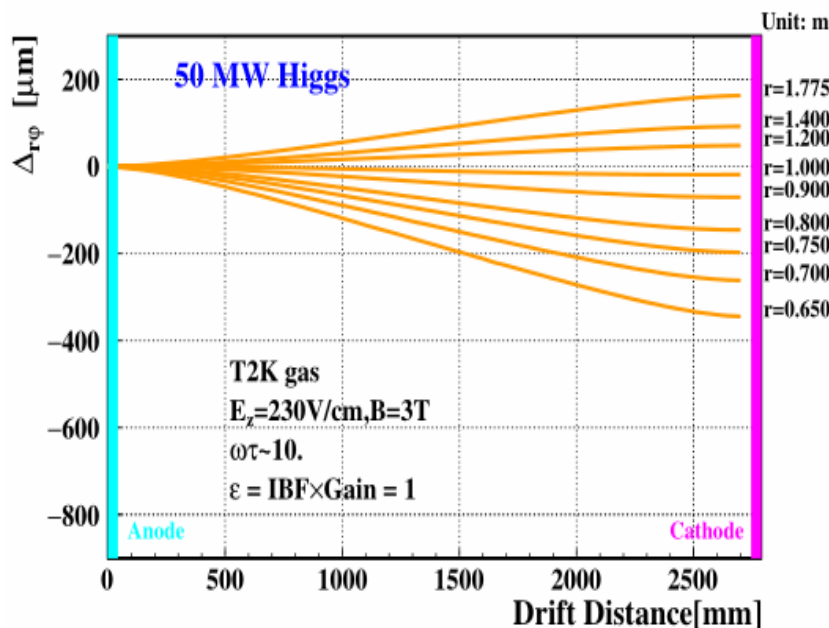
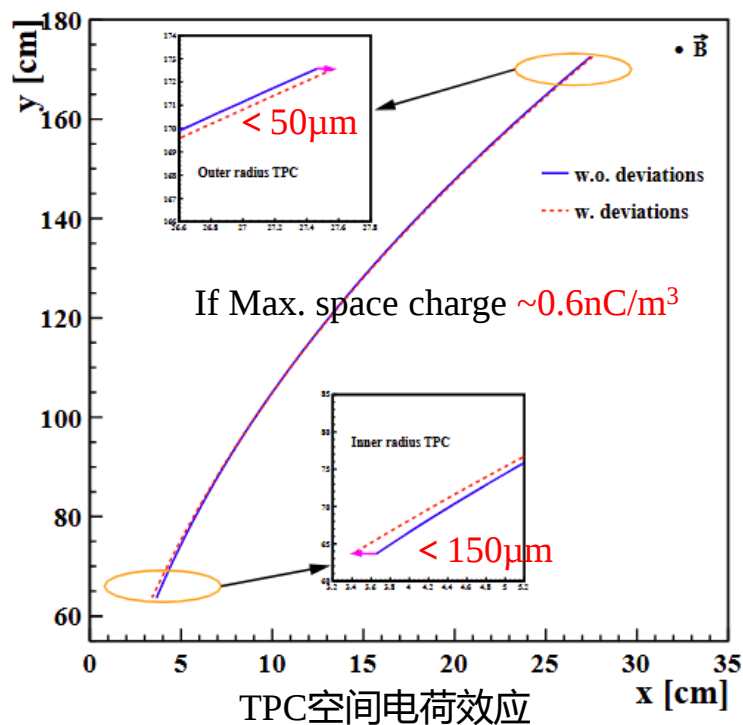
[10.1016/j.nima.2025.170776](https://doi.org/10.1016/j.nima.2025.170776)



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

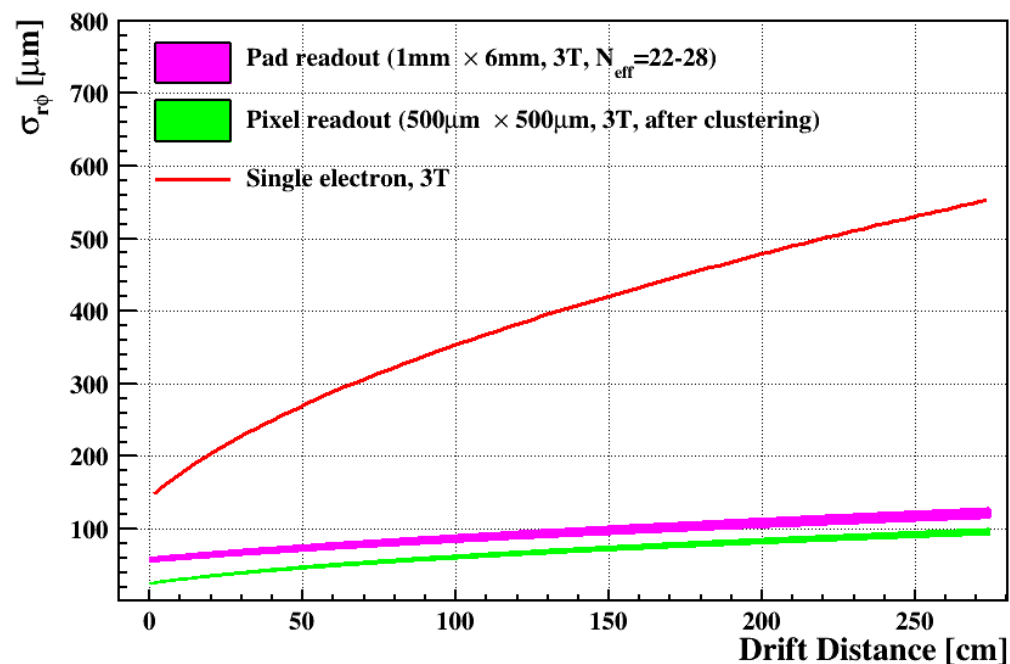
- 完成对MDI区域的初步优化，减少低能光子进入TPC：
 - 优化加速器组件，束流管材料，增加屏蔽，显著降低TPC中空间电荷密度
 - 优化后，Higgs和Low-Z模式下TPC中最大空间电荷均 $\leq 0.6 \text{ nC/m}^3$ ，引入额外的电子漂移偏差 $< 150 \mu\text{m}$
 - MDI优化，评估对动量测量的影响



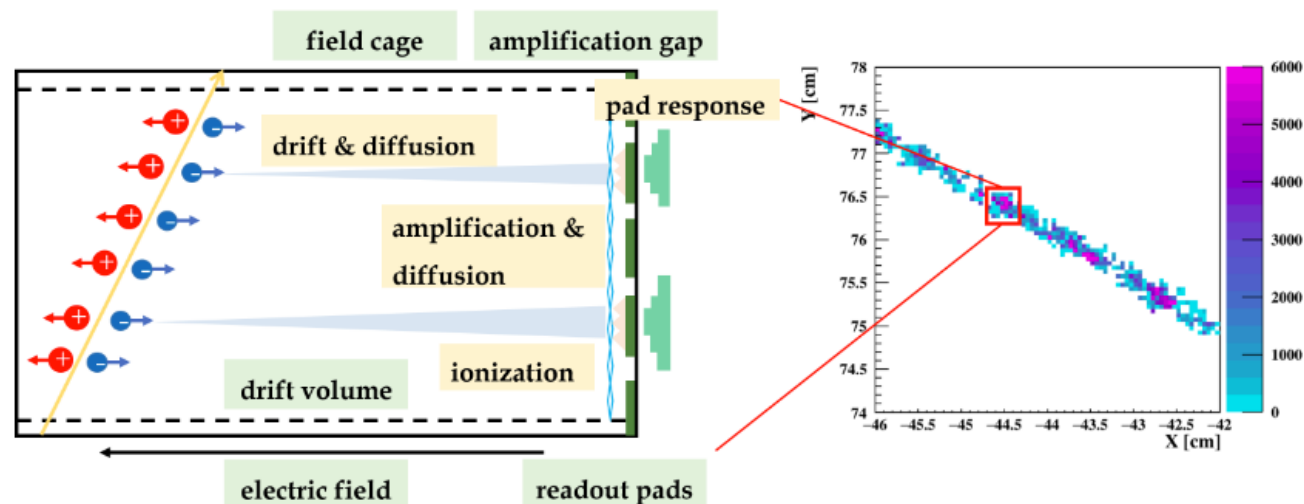
TPC径迹探测性能研究

■ 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 $\sim 1\%$ ， $\sigma(1/P_T) \sim 1.5 \times 10^{-4} (\text{GeV}/c)^{-1}$ @ $1\text{GeV}/c - 100\text{GeV}/c$



TPC空间位置分辨与动量分辨性能模拟



CEPC TPC全模拟研究框架

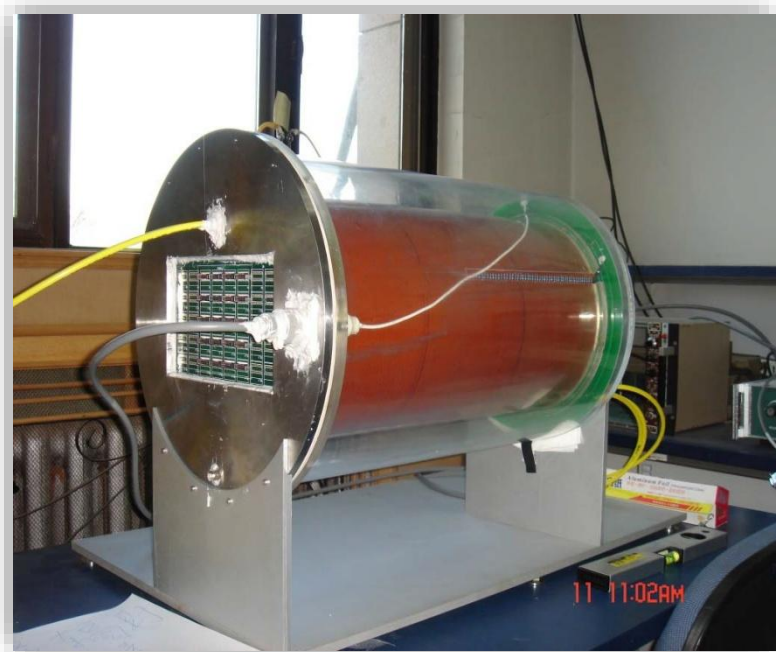
TPC原型机实验研究

- 位置分辨率 $<80\mu\text{m}$ ：优于国际同类原型机性能，且集成激光系统
- 粒子鉴别 $dE/dx \sim 3.4\%$ ：优于国际同类原型机 $dE/dx \sim 4\%$ (提升难度极大)
- 国际上首次实验解决连续对撞正离子抑制物理需求 (0.1%)

二十年坚持

满足物理需求 + 自主研制

解决不同紫外光作用机制
解决复合读出模块优化
解决紫外光99%穿透率
解决基准光分光位置标定
解决复杂机械基准集成
解决基准噪声控制与修正
解决国际技术共性难点
国际合作做重要贡献



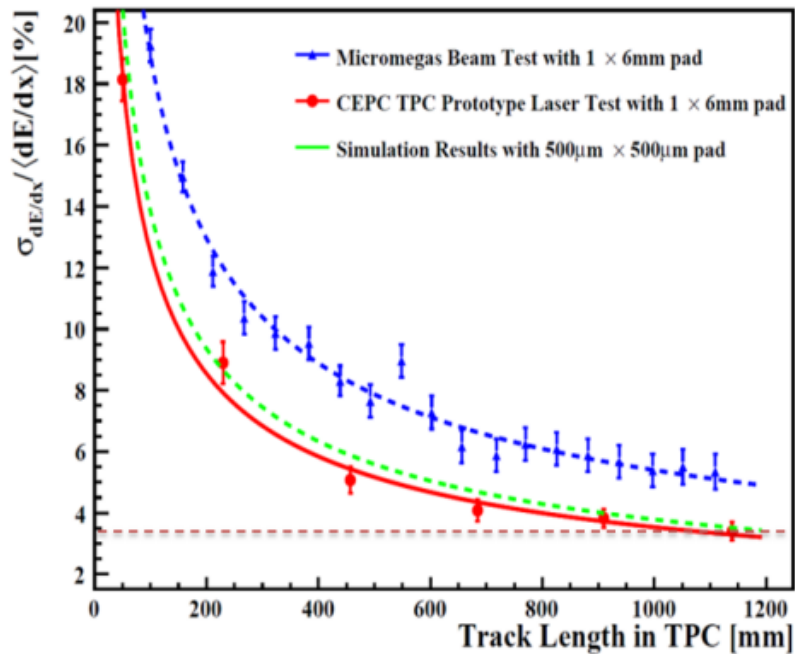
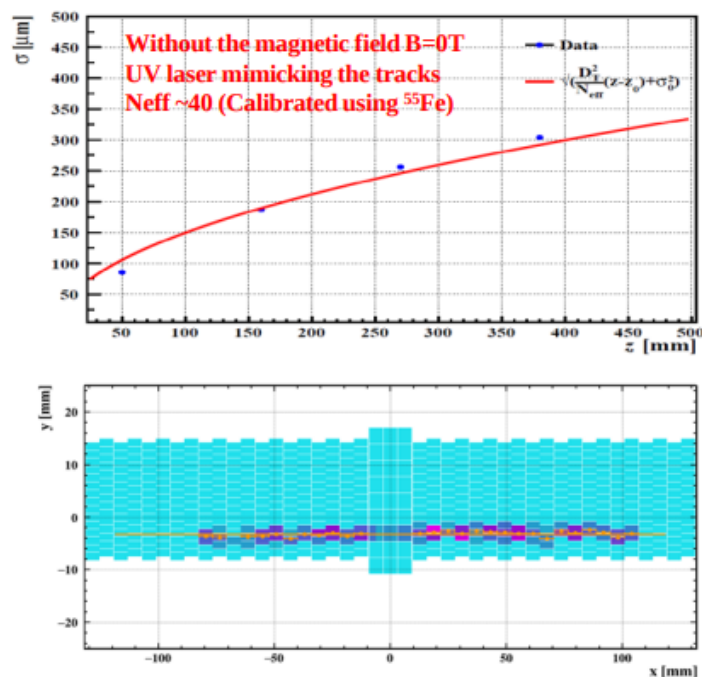
研制国内首台GEM读出TPC原型机



研制国内首台集成激光系统TPC原型机

TPC原型机实验研究

- 传统pad型读出TPC→高颗粒度像素型读出TPC实验研究
 - 已完成集成266nm紫外激光径迹TPC原型机研制
 - 空间位置分辨: $\sigma_{\phi} < 100\mu\text{m}$ @50mm漂移距离, 满足CEPC Higgs运行模式
 - dE/dx分辨: $< 3.6\%$ @1.2 m径迹长度 (CEPC Ref-TDR)



Publications by CEPC TPC group in 2018-2025:

- <https://doi.org/10.1088/1748-0221/20/02/P02025>
- <https://doi.org/10.1088/1748-0221/20/04/P04011>
- <https://doi.org/10.1016/j.nima.2025.170776>
- <https://doi.org/10.1088/1748-0221/18/08/E08002>
- <https://doi.org/10.22323/1.449.0553>
- <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.167241>
- <https://doi.org/10.1109/NSS/MIC44867.2021.9875566>
- <https://doi.org/10.1109/NSS/MIC44845.2022.10399097>
- <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/09/C09065>
- <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/05/P05005>
- <https://dx.doi.org/10.1142/S0217751X20410146>
- <https://doi.org/10.1088/1674-1137/41/5/056003>
- <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/02/T02001>
- <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/07/P07005>
- <https://doi.org/10.1016/j.nima.2025.170776>
- <https://doi.org/10.1088/1748-0221/20/04/P04011>
- <https://doi.org/10.7538/yzk.2024.youxian.0916>

TPC研制前沿现状

TPC technology detector for e+e- collider

Pad readout TPC

- To meet Higgs physics
- $1\text{mm} \times 6\text{mm}$ of Pad
- $< 100\text{mW}/\text{cm}^2$
- dE/dx



Pixelated readout TPC

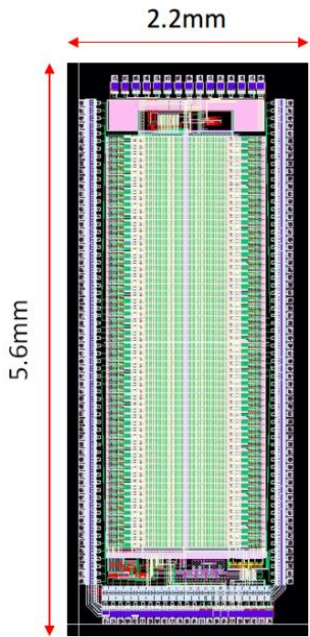
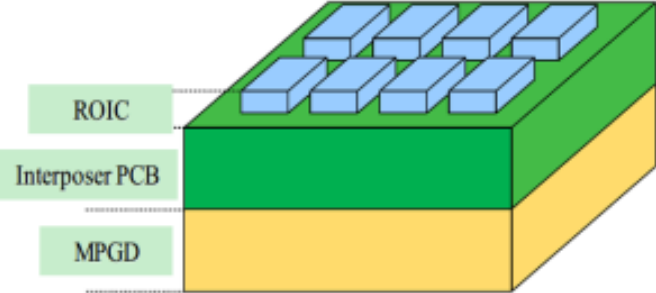
- To meet Low-lumi Z physics
- TPX3 and TPX4
- $\sim 1\text{W}/\text{cm}^2$
- $dN/dx + dE/dx$

ILD 合作组2026年会报告 + CERN DRD1 合作组1st、3rd、6th年会报告
(Huirong Qi and Maxim Titov)

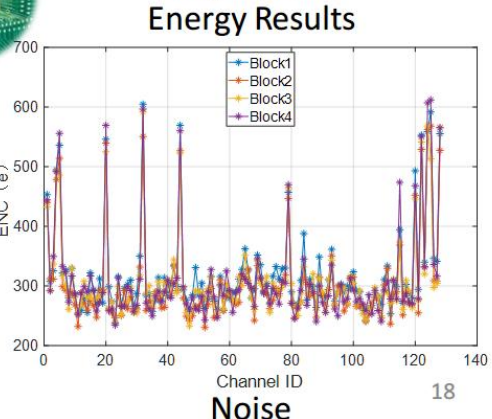
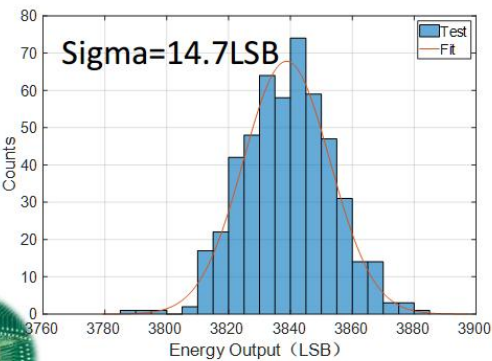
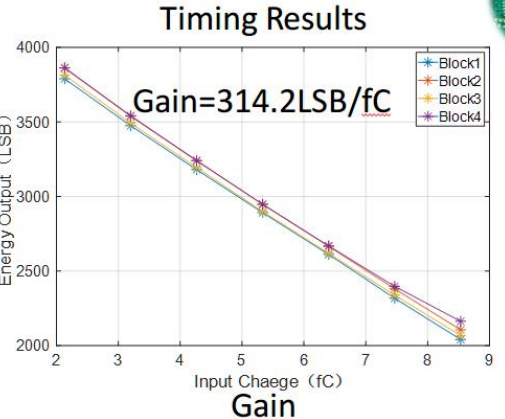
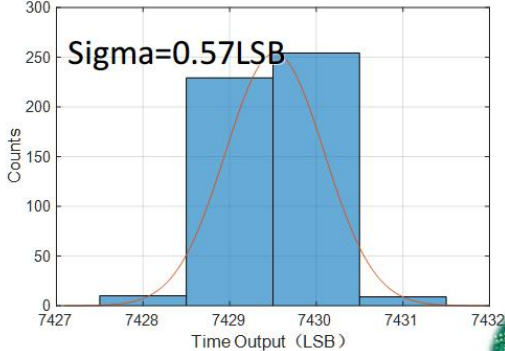
像素型TPC原型机实验研究——前端电子学

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



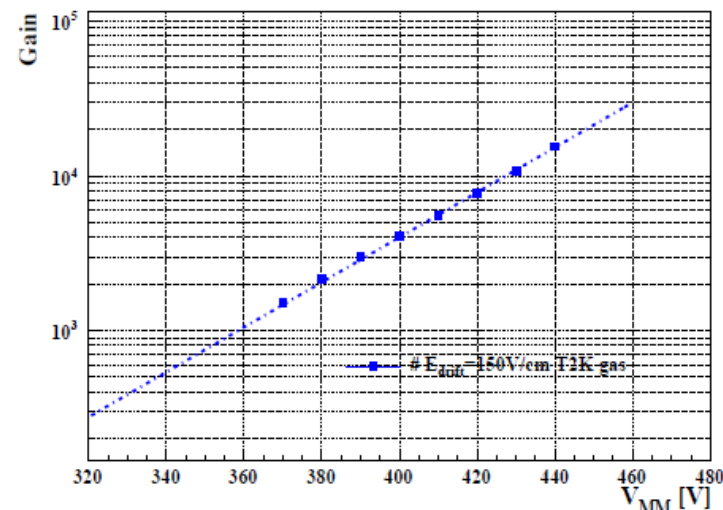
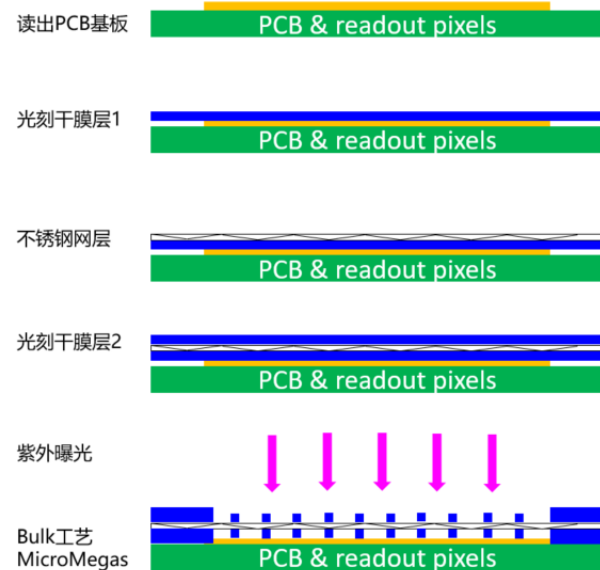
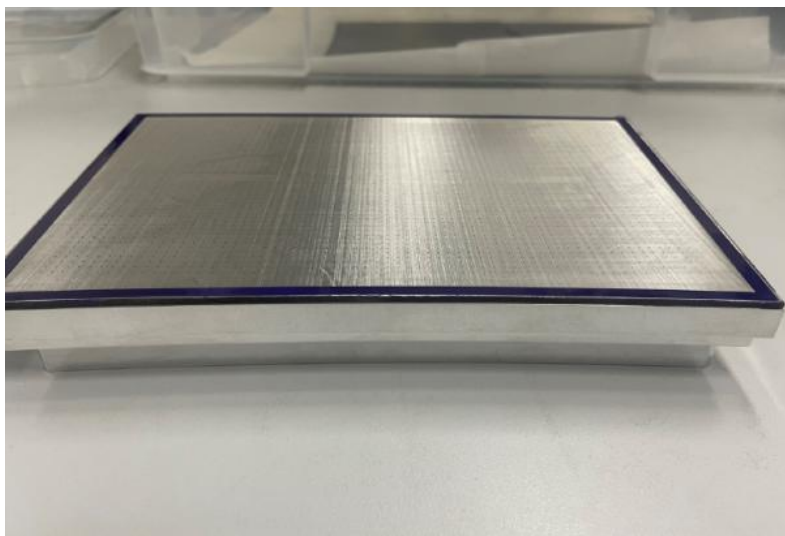
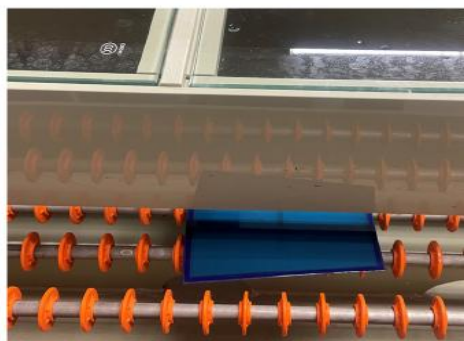
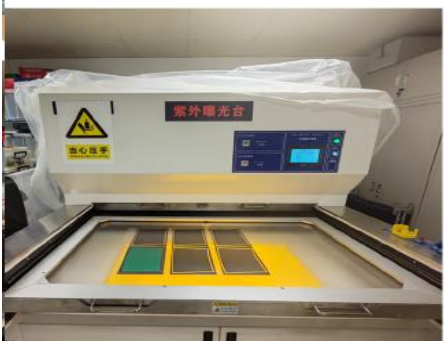
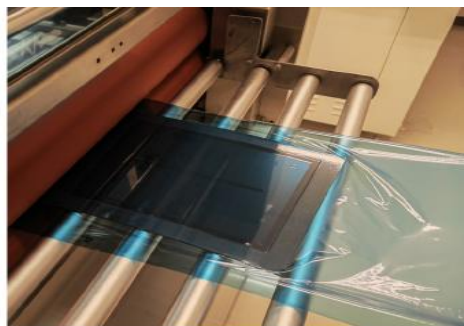
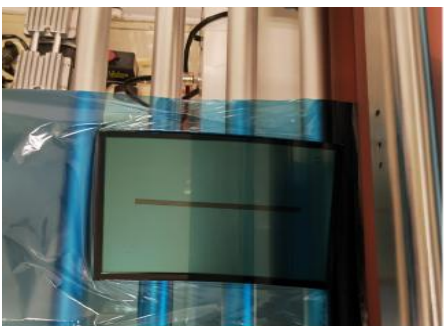
Parameter	Spec
Number of channels	128
Power Consumption	Analog<30mW
	Digital<30mW
ENC	~300 e(high gain)
Dynamic Range	25fC(high gain)
	150fC(low gain)
INL	<1%
Time Resolution	<10ns



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
- ◆ 开展探测器电子学联调, 激光和束流实验



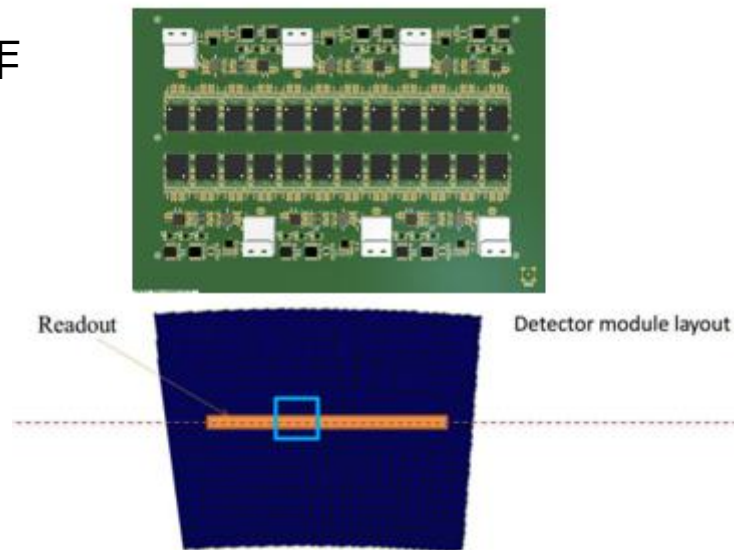
实验进展- 像素型TPC模块测试

■ 与清华大学团队合作，完成对像素型读出芯片TEPIX的测试，确定芯片可正常工作

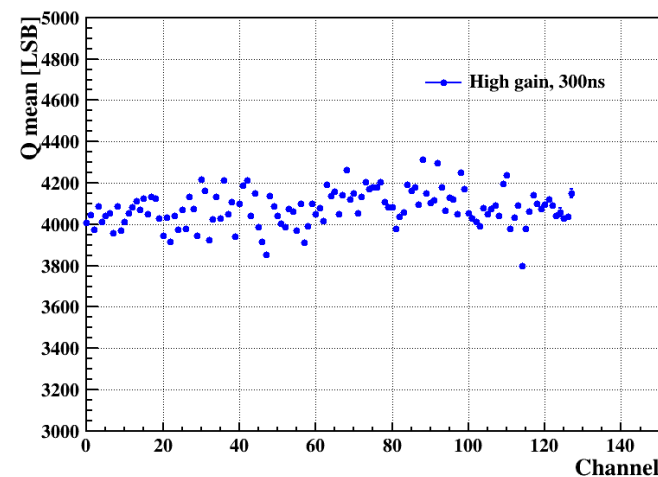
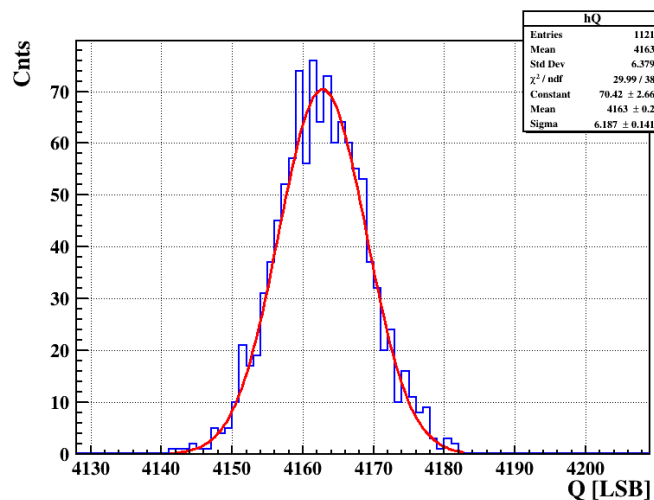
- 注入方波信号，外触发模式，芯片正常输出数据至上位机保存

■ 基于TEPIX芯片和DAQ数据格式，完成离线数据处理程序的初步开发

- 实现芯片数据的解包和各通道读取分析
- 芯片幅度分布方差小于10LSB，各个通道一致性好于5%



芯片测试系统



输出通道幅度分布（左）以及各通道一致性测试结果(右)

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！