

下一代环形正负对撞机中像素型 读出时间投影室技术研究进展

报告人：常悦

祁辉荣，赵光，伍灵慧，余信，张锦闲，邓智，喻纯旭，
王建春，张建，李刚，阮曼奇，纪全，张俊嵩，毛涵钰
及LCTPC国际合作组的贡献

目录

1 环形对撞机实验的物理需求

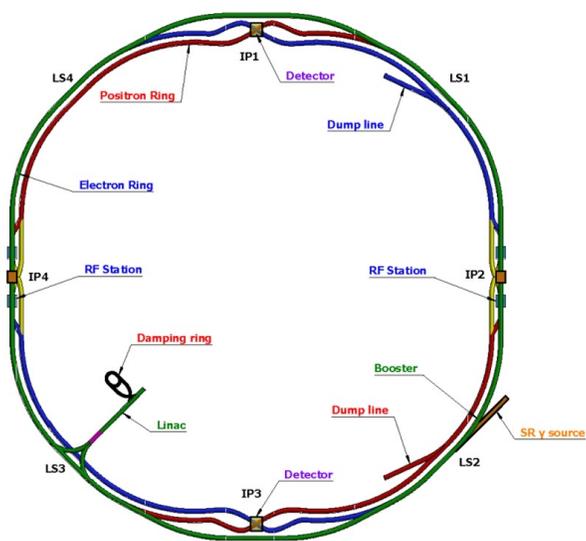
2 像素型TPC的关键技术

3 像素型TPC研究进展

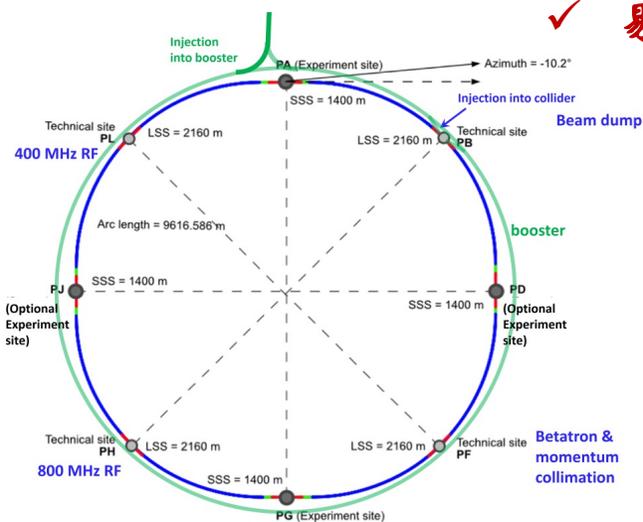
4 小结

环形对撞机实验中的径迹探测器

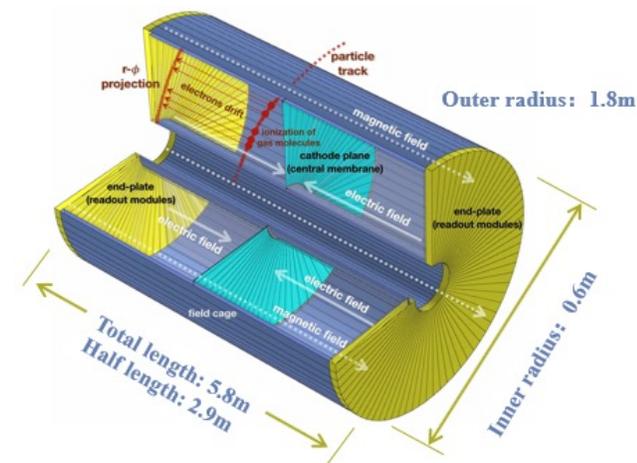
- CEPC作为高亮度Higgs粒子和Z粒子工厂，Z峰值的对撞亮度已达到 $10^{36}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
 - CEPC ref.TDR将于2025发布
 - 需要径迹探测器提供**更高精度、更好的PID能力**
- ✓ 高位置分辨和动量分辨
 - ✓ 粒子鉴别能力
 - ✓ 长径迹重建
 - ✓ 低物质质量、高占空比
 - ✓ 易于安装和更换的设计



Circular Electron Positron Collider CEPC



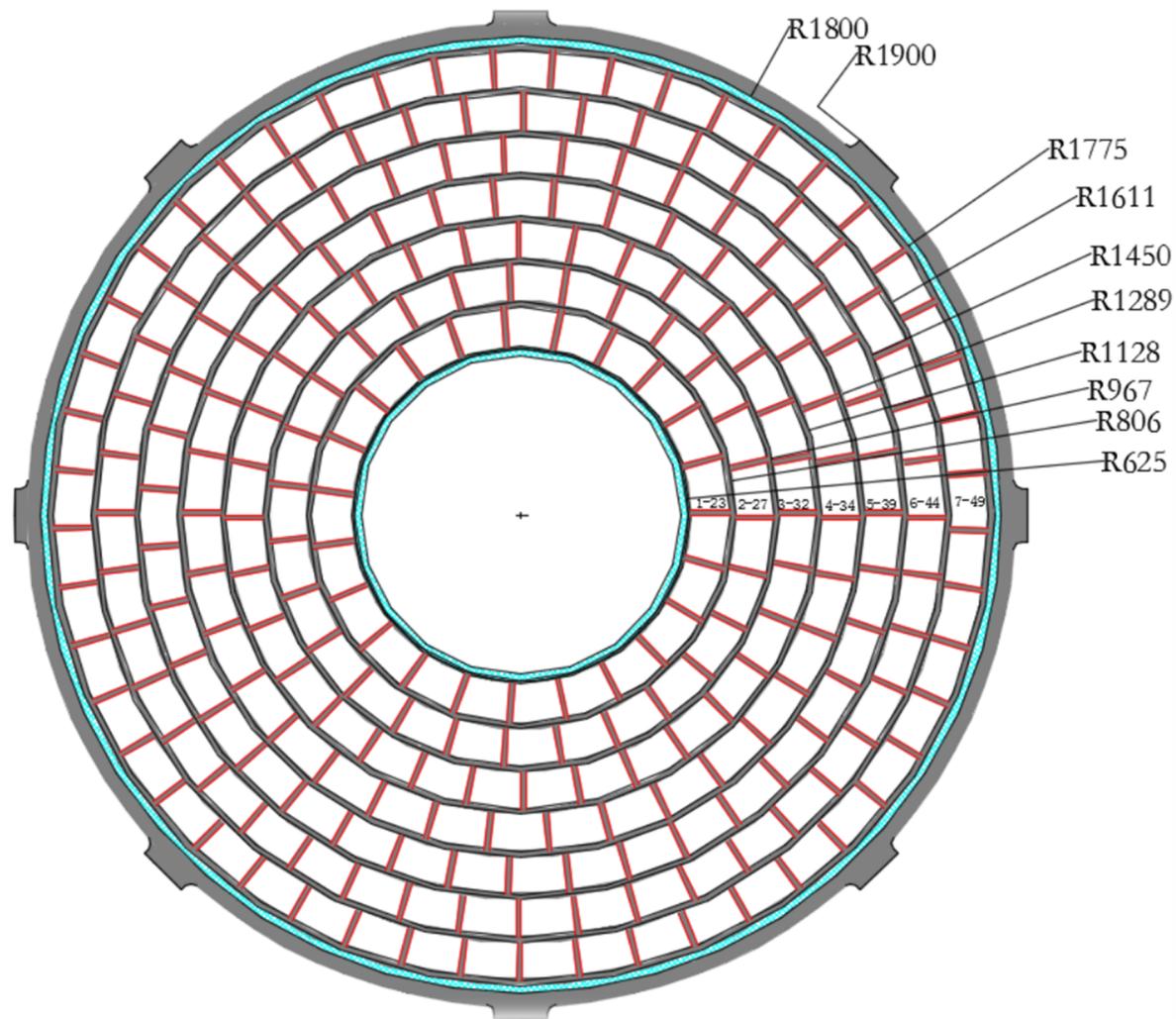
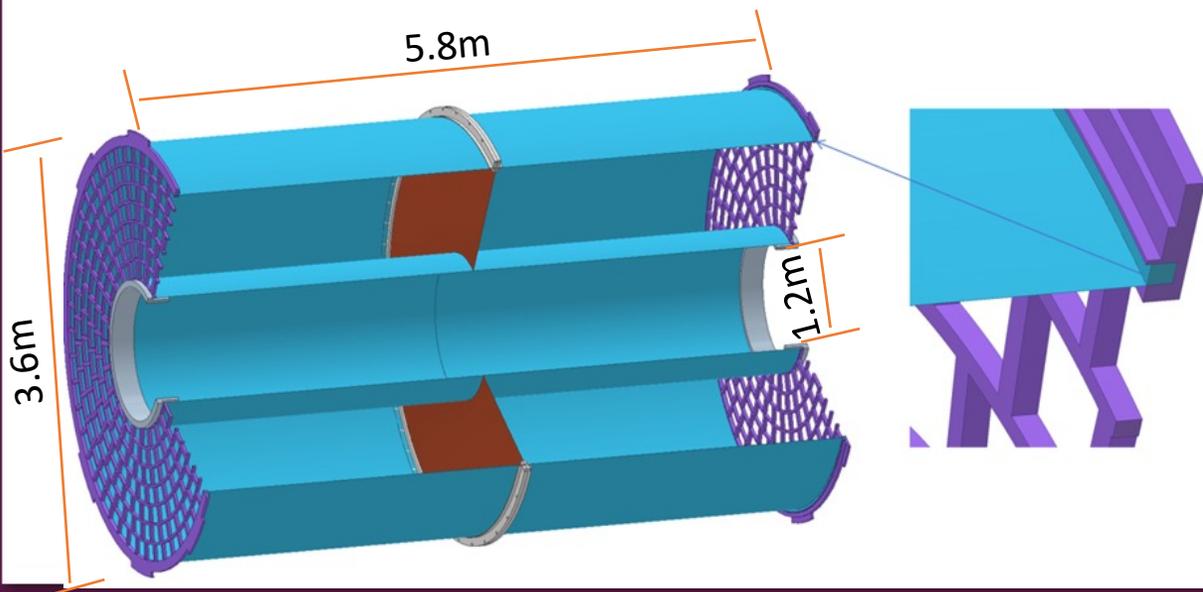
Future Circular Collider (FCC-ee)



CEPC TPC

CEPC ref.TDR 中的基准径迹探测器: Pixelated TPC

TPC detector	Key Parameters
Modules per endcap	248 modules /endcap
Module size	206mm×224mm×161mm
Geometry of layout	Inner: 1.2m Outer: 3.6m Length: 5.8m
Voltage of Cathode	- 62,000 V
Operation gases	T2K: Ar/CF₄/iC₄H₁₀=95/3/2
Total drift time	34μs @ 2.75m
Pixelated detector	Pixelated Micromegas



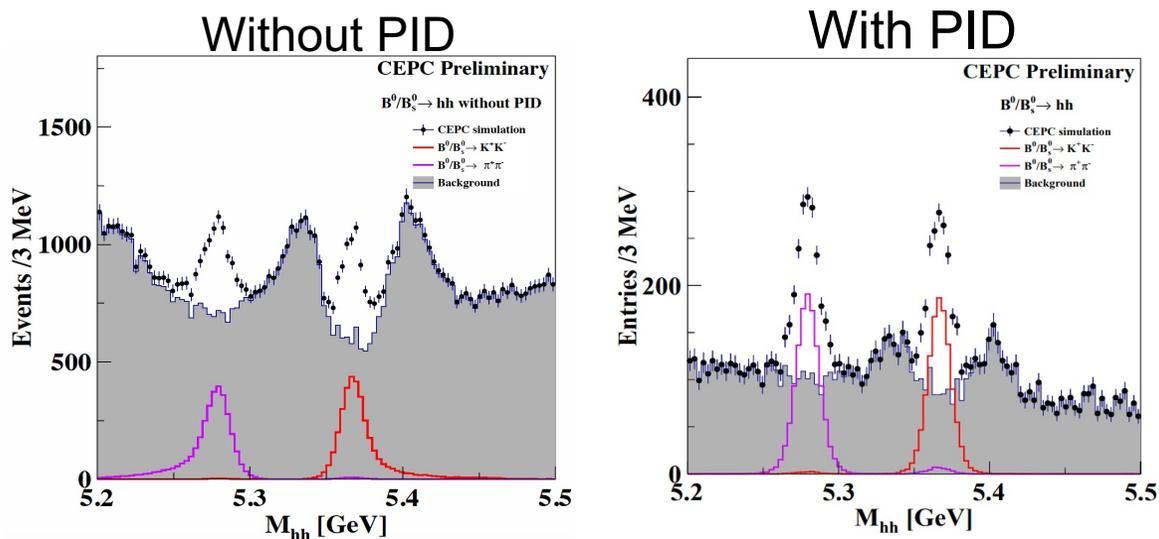
TPC的物理需求

- 提供上千个Hits,满足PFA需求
- 更低物质质量,更高的动量分辨($\sigma_{1/pt} \sim 10^{-4} (\text{GeV}/c)^{-1}$)和位置分辨 ($\sigma_{\text{point}} < 100 \mu\text{m}$)
- 结合dE/dx、dN/dx提供 2%~3% 的分辨率,提升探测器的粒子鉴别能力

dE/dx提升对于味物理研究和jet能量分辨至关重要

TPC在PID提升方面极具优势

用 Delphes 对 B^0/B_s^0 模拟



From Xu Gao

Sub-detector	Key technology	Key Specifications
Silicon vertex detector	Spatial resolution and materials	$\sigma_{r\phi} \sim 3 \mu\text{m}$, $X/X_0 < 0.15\%$ (per layer)
Silicon tracker	Large-area silicon detector	$\sigma(\frac{1}{p_T}) \sim 2 \times 10^{-5} \oplus \frac{1 \times 10^{-3}}{p \times \sin^{3/2} \theta} (\text{GeV}^{-1})$
TPC/Drift Chamber	Precise dE/dx (dN/dx) measurement	Relative uncertainty 3%
Time of Flight detector	Large-area silicon timing detector	$\sigma(t) \sim 30 \text{ps}$
Electromagnetic Calorimeter	High granularity 4D crystal calorimeter	EM energy resolution $\sim 3\%/\sqrt{E(\text{GeV})}$ Granularity $\sim 2 \times 2 \times 2 \text{cm}^3$
Magnet system	Ultra-thin High temperature Superconducting magnet	Magnet field 2 – 3 T Material budget $< 1.5X_0$ Thickness $< 150 \text{mm}$
Hadron calorimeter	Scintillating glass Hadron calorimeter	Support PFA jet reconstruction Single hadron $\sigma_E^{had} \sim 40\%/\sqrt{E(\text{GeV})}$ Jet $\sigma_E^{jet} \sim 30\%/\sqrt{E(\text{GeV})}$

Requirements of Detector and Key Technologies

TPC中的粒子鉴别研究

■ 大尺寸单元的dE/dx研究(pad读出)

优势: 技术成熟

不足: 朗道分布, 受大的波动敏感、

大尺寸单元的dE/dx已没有大幅提升的空间

■ 小尺寸单元的dN/dx研究(像素读出)

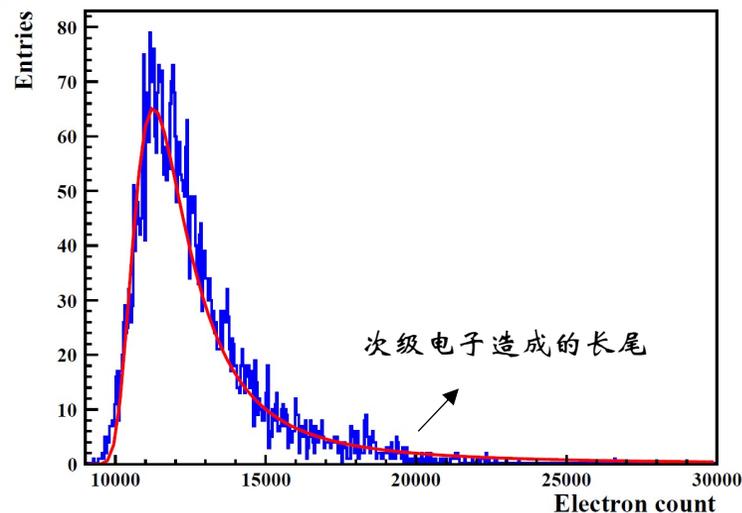
优势: 不受波动影响

$dN/dx + dE/dx$

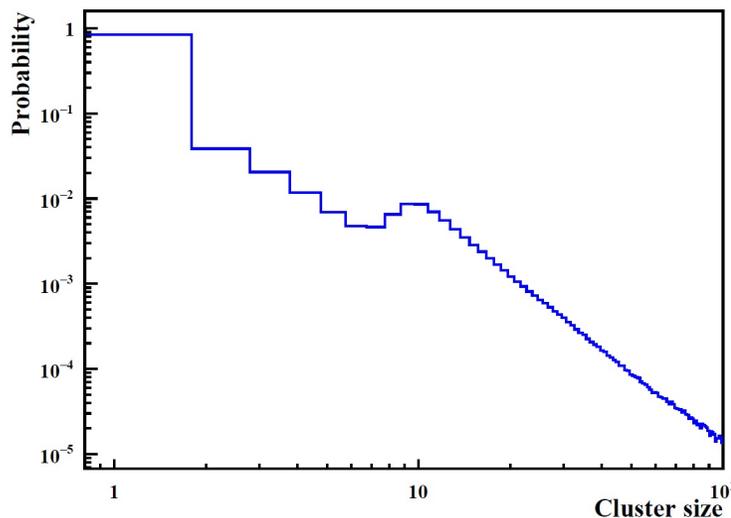
PID提升潜力

难点: 缺乏验证理论 \rightarrow 模拟验证

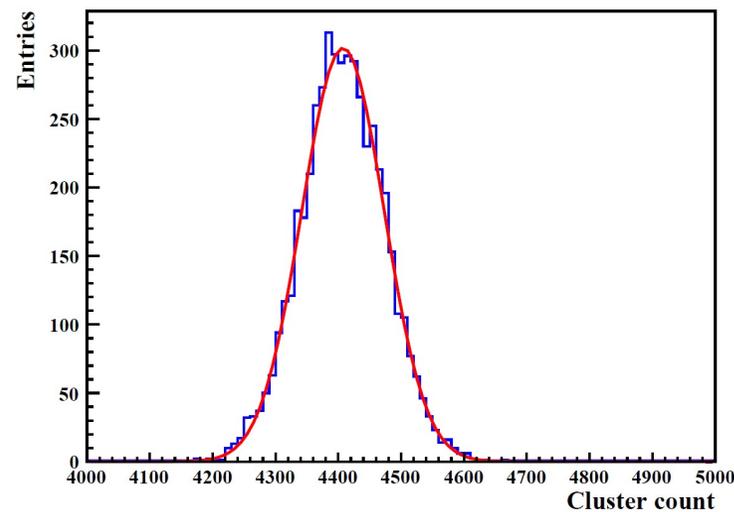
技术实现难度较大 \rightarrow 实验验证



径迹上电子的分布



簇团大小

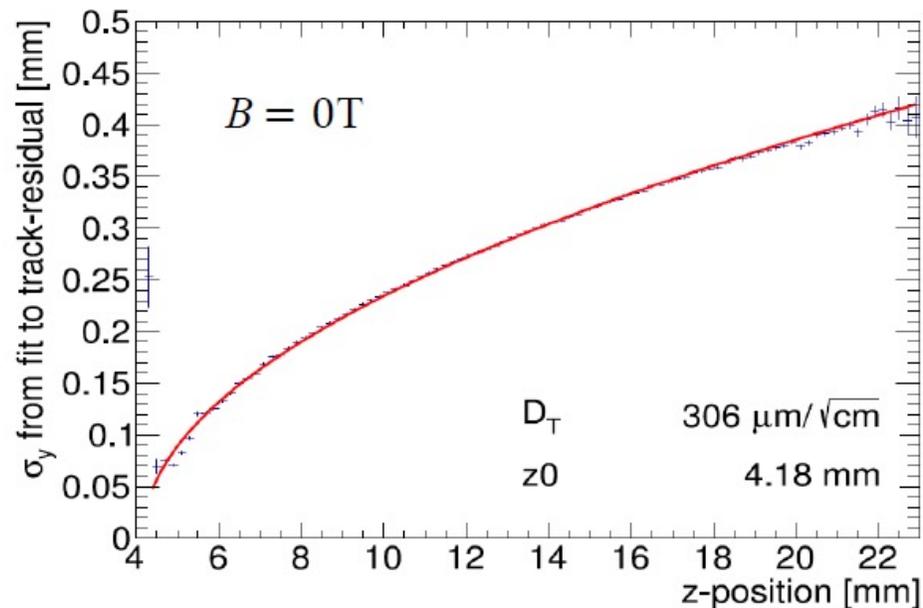


径迹上电离簇团的分布

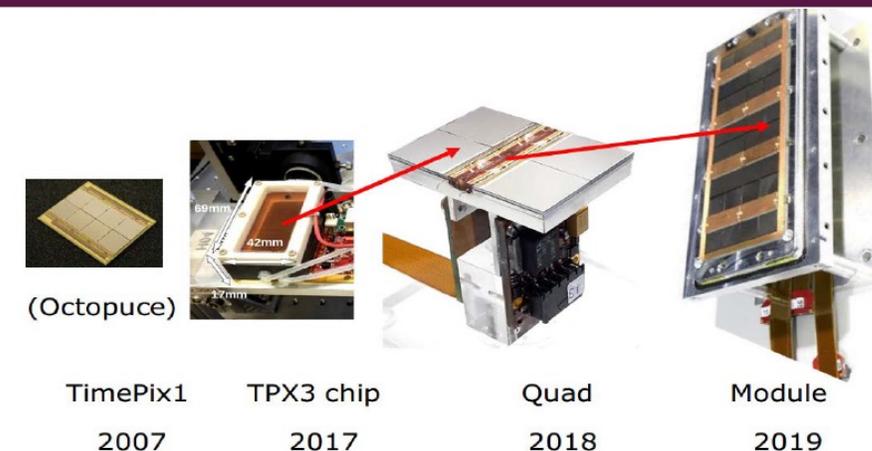
像素型读出实现空间簇团计数研究

- 不需要高采样电子学，仅需簇团空间测量技术
- **Micromegas+像素型读出**→实现空间上的簇团计数
- 加上时间信息→获取簇团的三维信息
- LCTPC基于GridPix开展了55um像素尺寸的研究
初步实现 $dN/dx \sim 2.9\%$ @1T的分辨结果

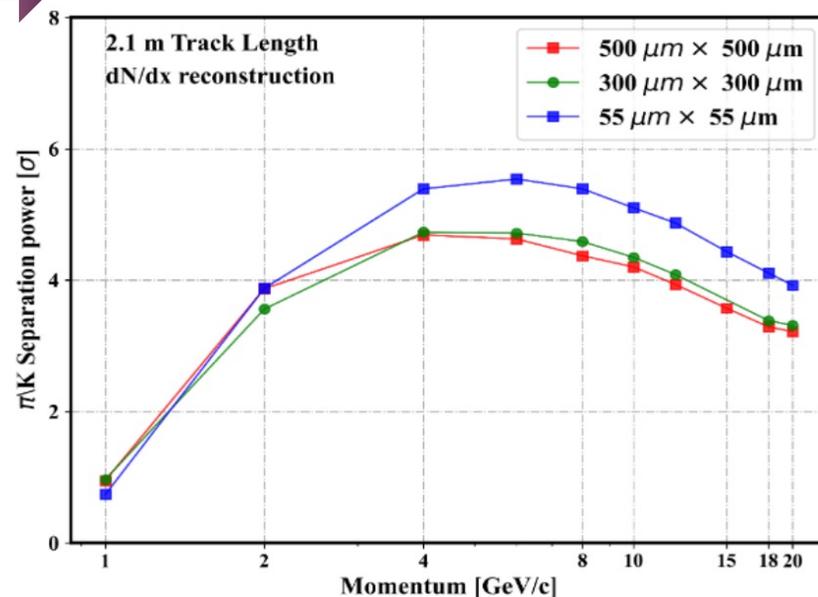
功耗: $2W/cm^2$



Pixelated readout



$300 \sim 500 \mu m$ pixel size & $100 mW/cm^2$



CEPC-Pixelated readout TPC

■ 像素型读出对于高亮度下的CEPC-TPC极具优势

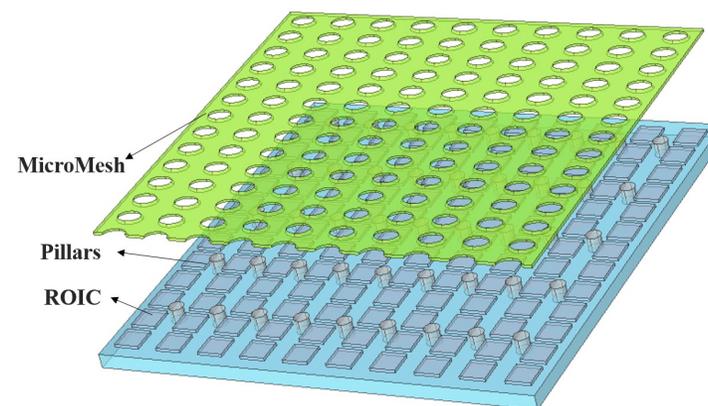
- ✓ $dE/dx + dN/dx$ 提供良好的粒子鉴别能力
- ✓ 2T/3T下提供高空间分辨
- ✓ 高计数率
- ✓ 卓越的双径迹分辨



■ Pixelated-TPC性能优化研究

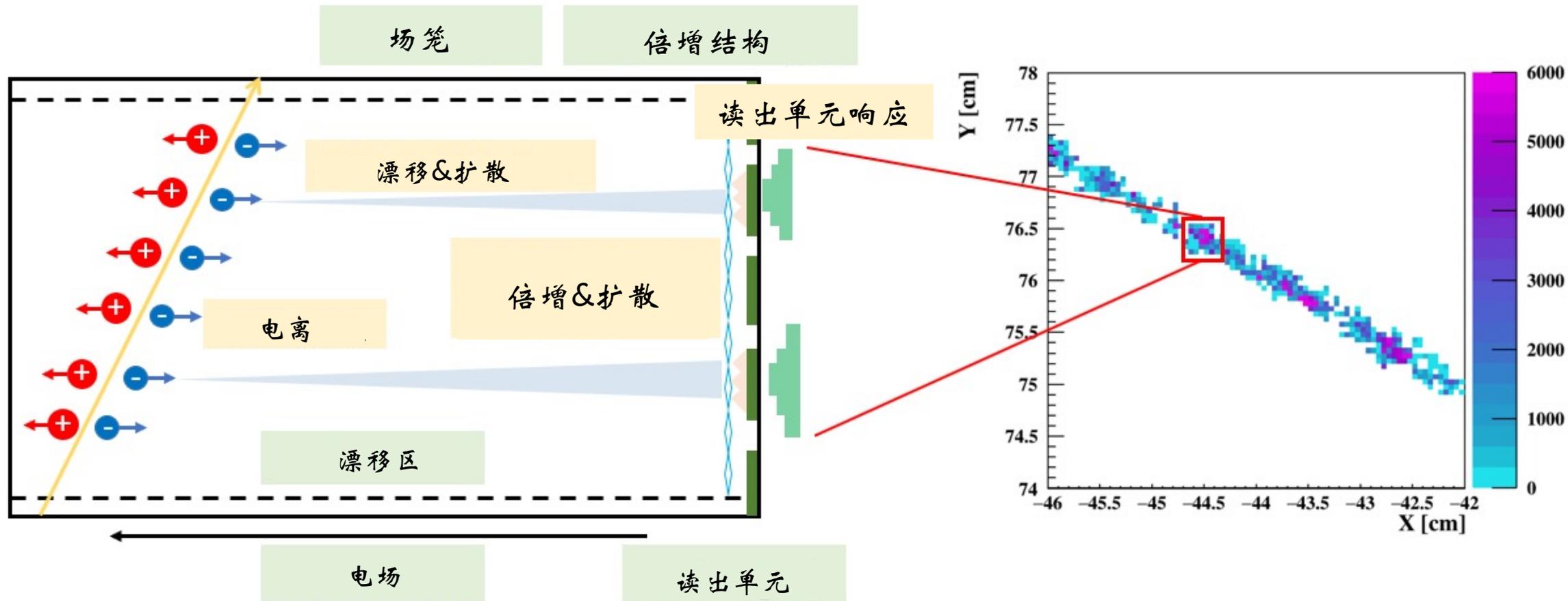
- ✓ 像素尺寸
- ✓ 探测器几何
- ✓ 占空比
- ✓ 读出功耗的控制

Parameters	Higgs run	Z pole run
B-field	3.0 T	2.0 T
Readout size (mm)/All channels	$0.5\text{mm} \times 0.5\text{mm} / 2 \times 3 \times 10^7$	$0.5\text{mm} \times 0.5\text{mm} / 2 \times 3 \times 10^7$
Layers per track in $r\phi$	2300	2300
Material budget barrel (X_0)	0.59 %	0.59 %
Material budget endcap (X_0)	15 %	15 %
σ in $r\phi$	120 μm (full drift)	400 μm (full drift) w. distortion
σ in z	$\approx 0.6 - 1.0$ mm (for zero - full drift)	$\approx 0.6 - 1.0$ mm (for zero - full drift)
2-hit separation in $r\phi$	0.5 mm	0.5 mm
K/ π separation power @20GeV	3 σ	3 σ
dE/dx	< 3.0 %	< 3.0 %
Momentum resolution normalized: $\sigma_{1/pT} = \sqrt{a^2 + (b/pT)^2}$	a = 1.9 e -5 b = 0.8 e -3	a = 3.3 e -5 b = 1.5 e -3



像素型读出TPC-模拟研究进展

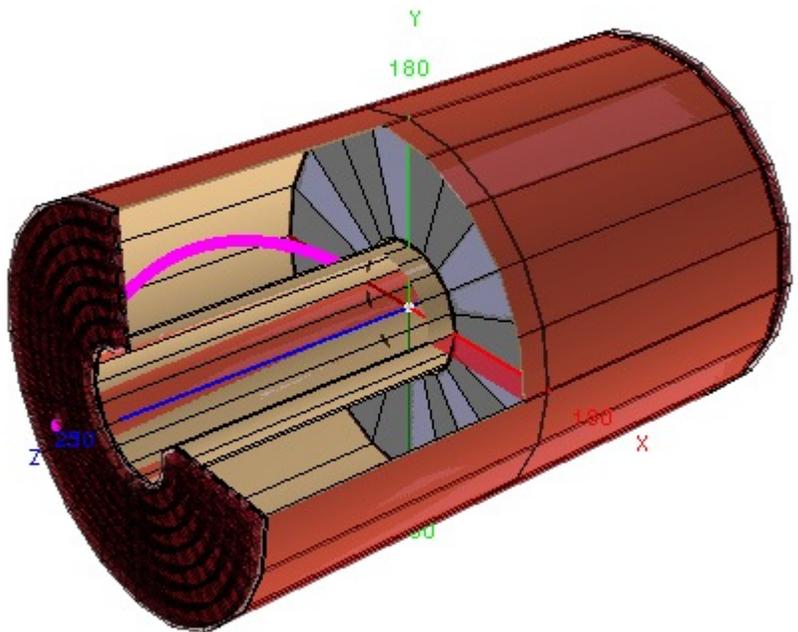
CEPC-Pixelated TPC模拟研究框架



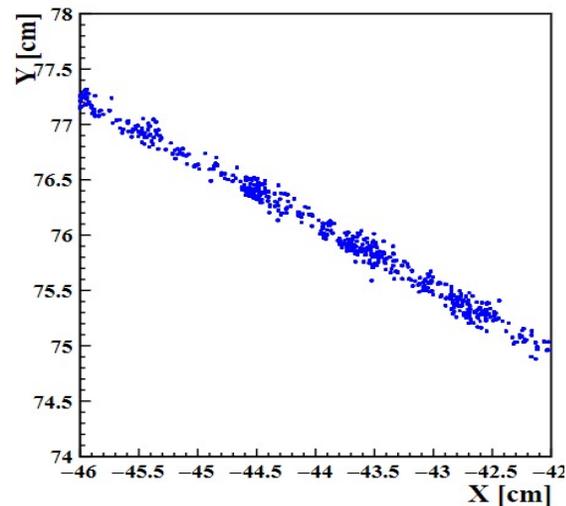
CEPC-Pixelated TPC几何构建

■ 与CEPC-ref TDR 几何尺寸一致

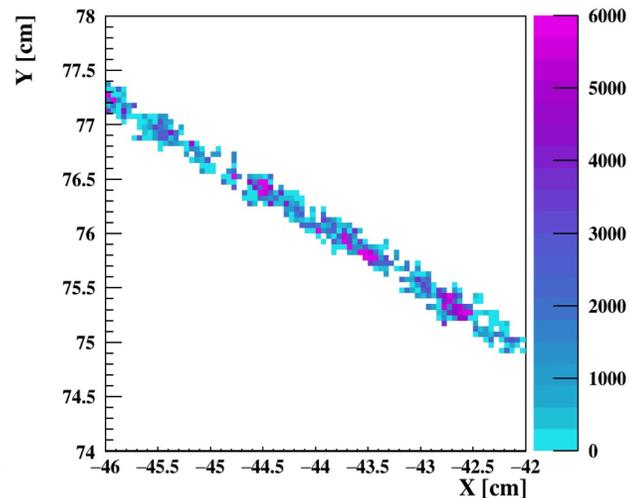
- ✓ 内径: 1.2m; 外径: 3.6m
- ✓ 全长: 5.8m
- ✓ 工作气体: T2K气体 $\text{Ar}/\text{CF}_4/\text{iC}_4\text{H}_{10} = 95/3/2$
- ✓ 电场强度: 230V/cm; 磁场: 2T/3T



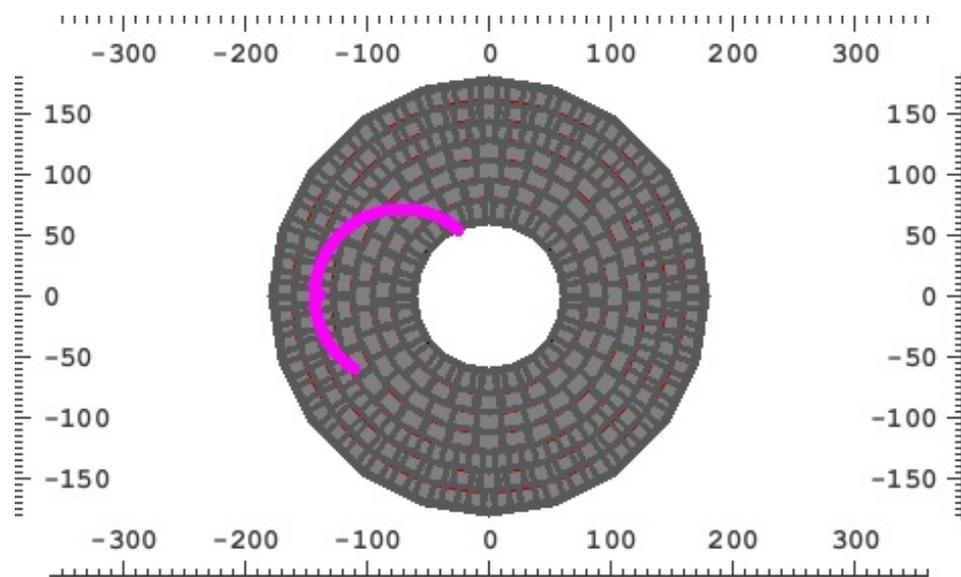
TPC 内径迹的显示



径迹上Cluster在端盖的投影



pixel 响应($500\ \mu\text{m} \times 500\ \mu\text{m}$)

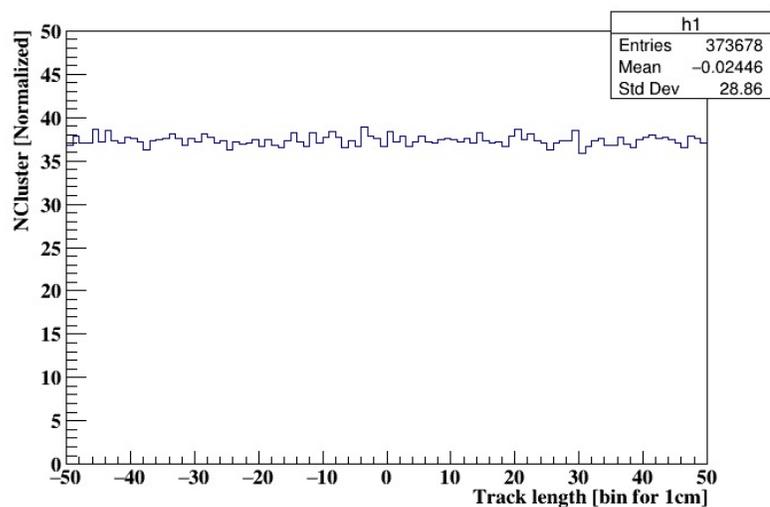
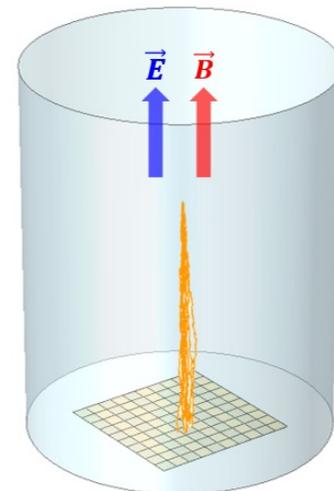


径迹在端盖上的投影

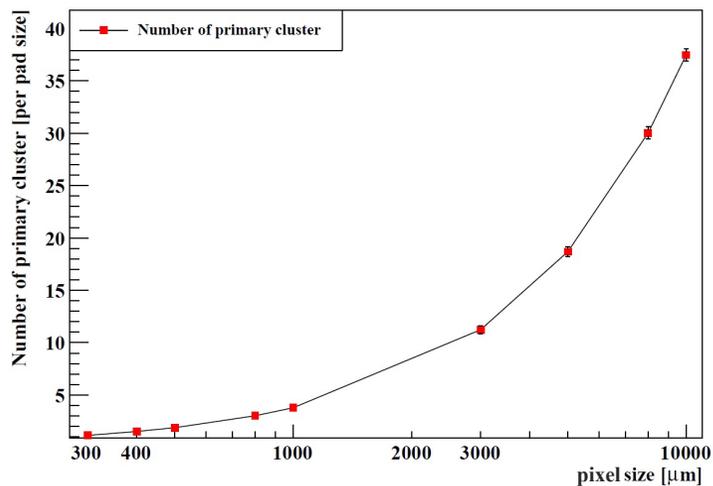
模拟研究一：原初电离簇团

■ 利用Garfield++ TrackHeed对原初电离簇团进行模拟(磁场考虑2-3T)

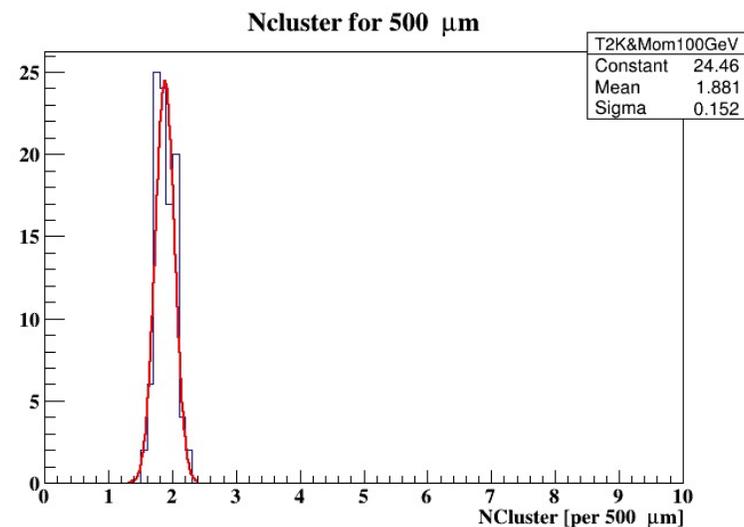
- 在Ar基气体中，典型的电离簇团~30 cluster/cm @ 1bar ,T2K :37.4cluster/cm
- ~1.9 clusters/ 500 μm , ~1.2 clusters/ 300 μm
- 初步结论：像素尺寸在300 μm ~ 500 μm , 即可实现对每个电离簇团的计数



Cluster沿径迹分布的情况



Cluster数与像素尺寸的关系



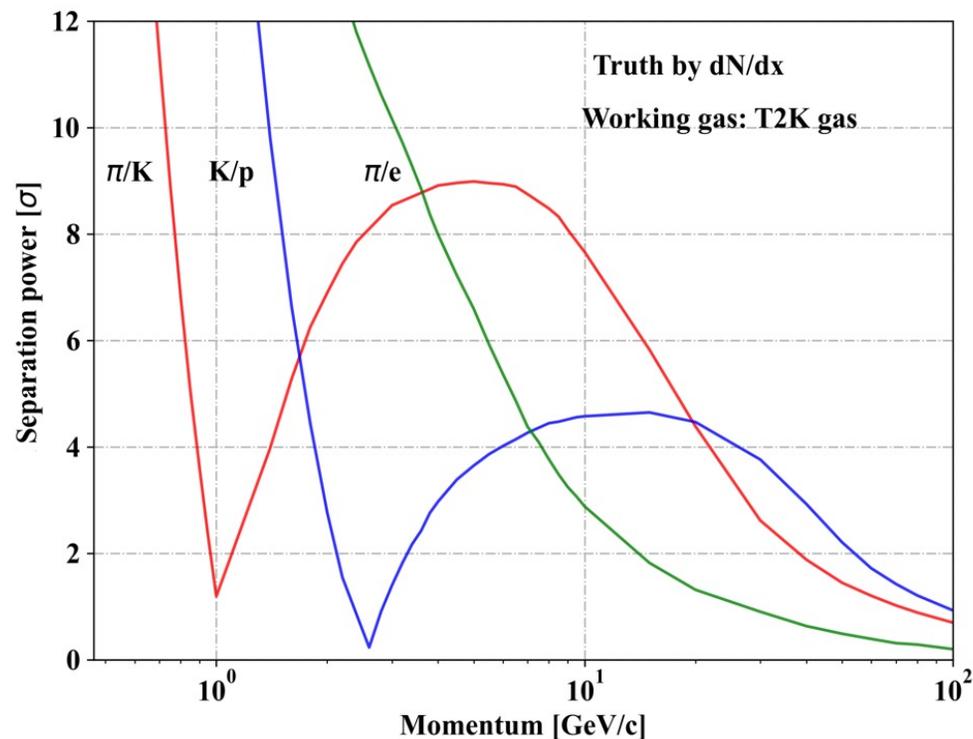
Pad size = 500 μm Ncluster/cm

模拟研究二：MC Truth粒子鉴别潜力

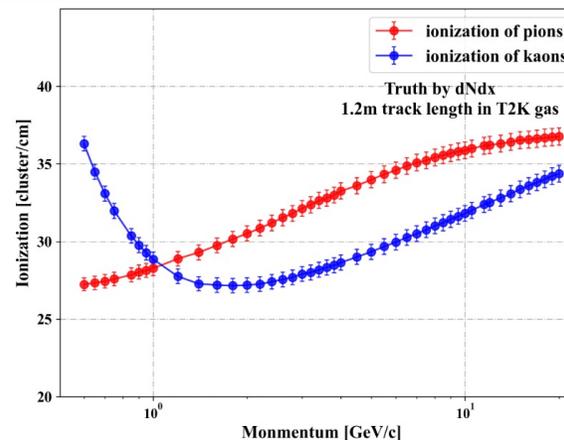
定义粒子鉴别能力(Sp)参数

$$Sp = \frac{|\mu_A - \mu_B|}{\frac{\sigma_A + \sigma_B}{2}}$$

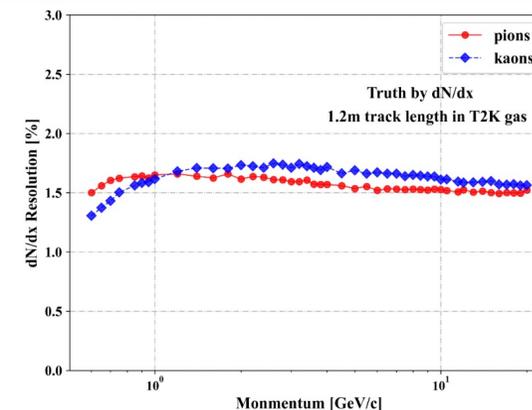
模拟了π/k/p不同动量下的粒子分辨能力



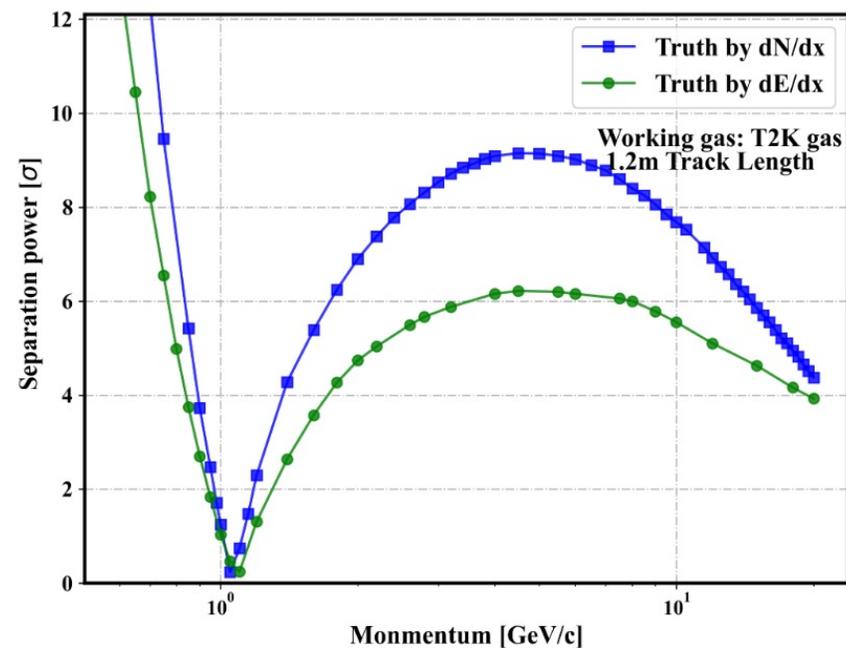
簇团计数的粒子分辨能力



π/k原初电离簇团



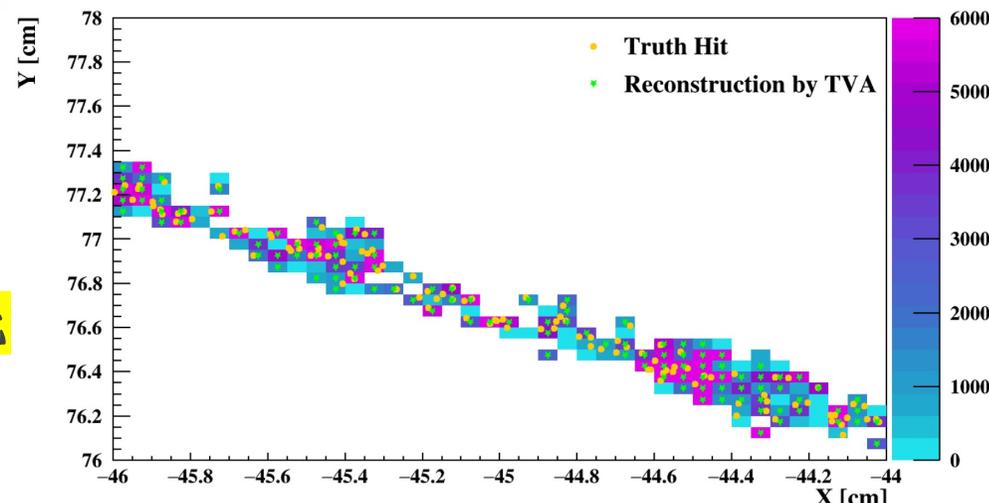
π/k原初电离簇团的分辨



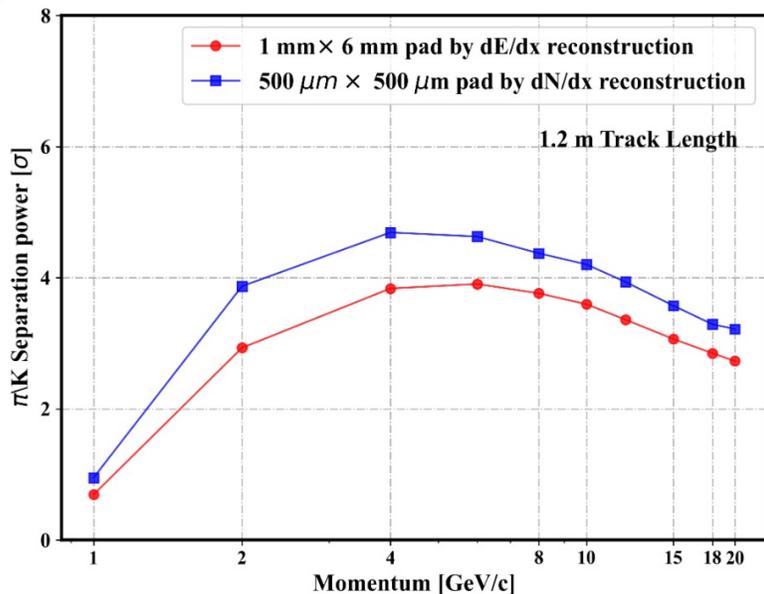
基于Truth信息 dE/dx 与dN/dx

模拟研究三：重建结果

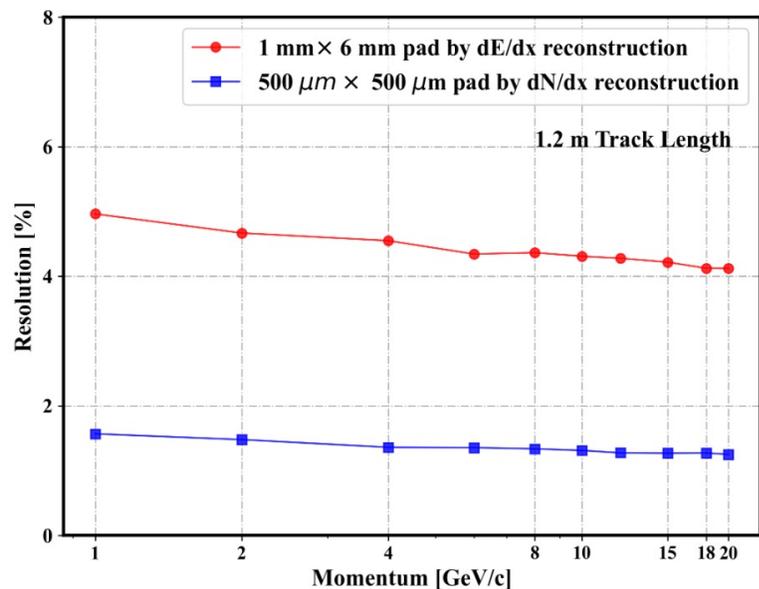
- 1.2m tracklength 20 GeV π/k $S_p > 3\sigma$
- 300 μm 与 500 μm S_p 的结果相近
- ref.TDR 中将集中500 μm 像素单元&100mW/cm²的研究



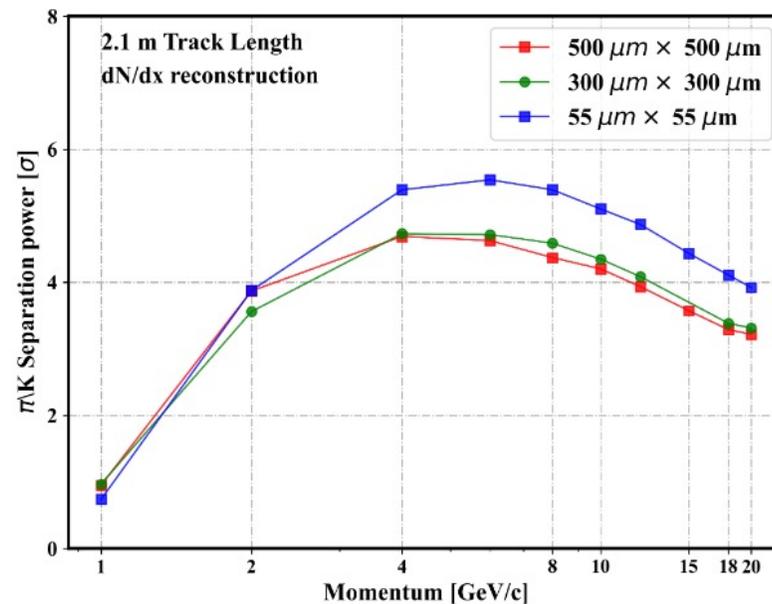
TVA重建结果与Truth信息在像素单元的显示



500um像素与1*6mm pad S_p 结果



500um pad与1*6mmpad 分辨的结果



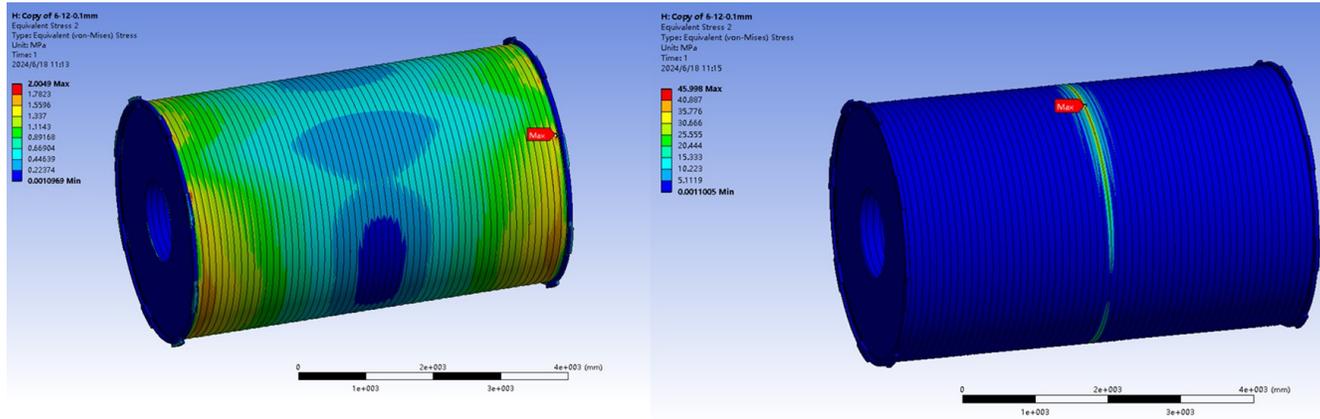
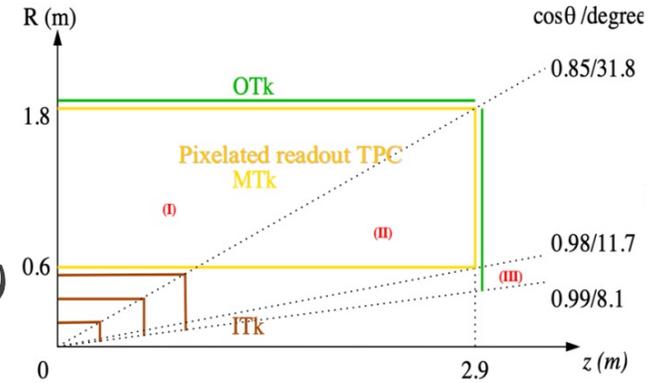
不同 pixel size S_p 的对比结果

像素型读出TPC-实验研究进展

CEPC-TPC实验研究进展一

■ 碳纤维桶+易于安装的模块化端盖设计

- ✓ 考虑使用新的碳纤维桶代替蜂窝桶 ($\sim 2\% X_0$)
- ✓ TPC桶的超轻材料 (QM55 CF): 总共 $0.59\% X_0$
- ✓ 初步有限元分析计算: 0.2毫米碳纤维桶能承受LGAD OTK (100公斤)
- ✓ 优化后的敏感区有效面积: **92% \rightarrow 96%**



TPC设计优化及应力分析

Material budget of TPC barrel

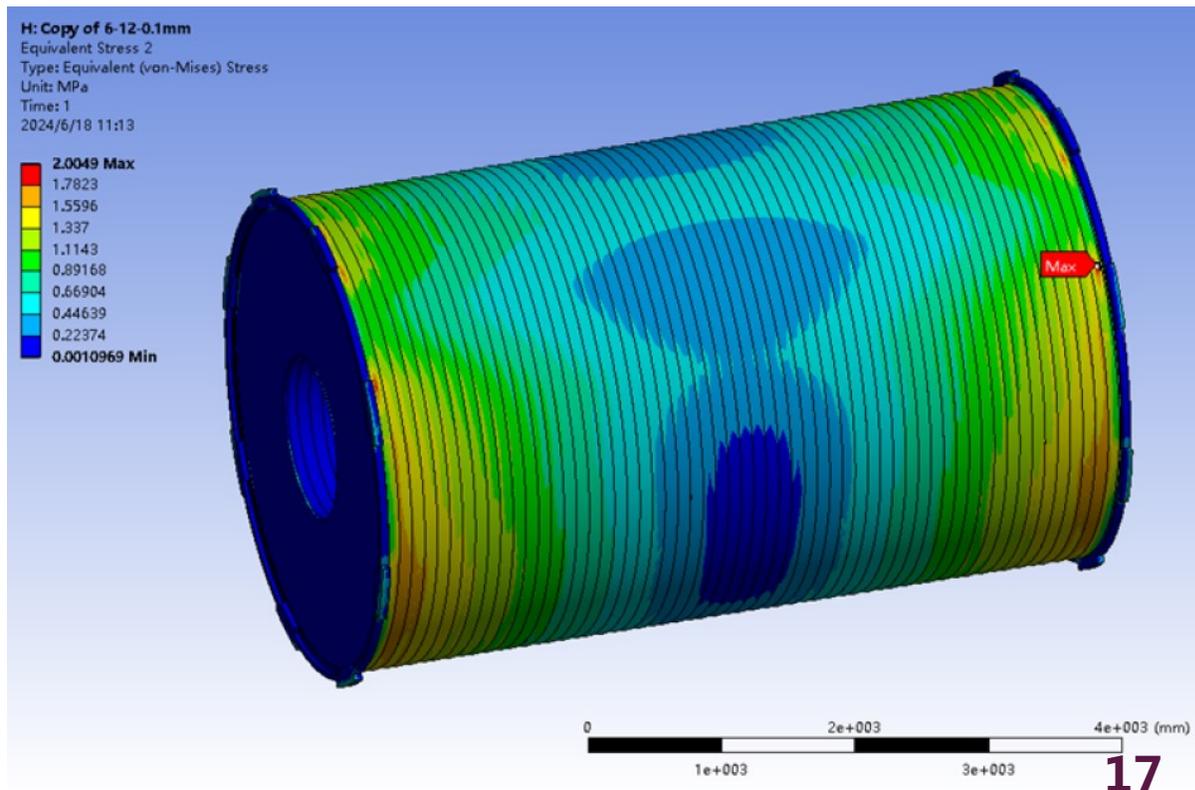
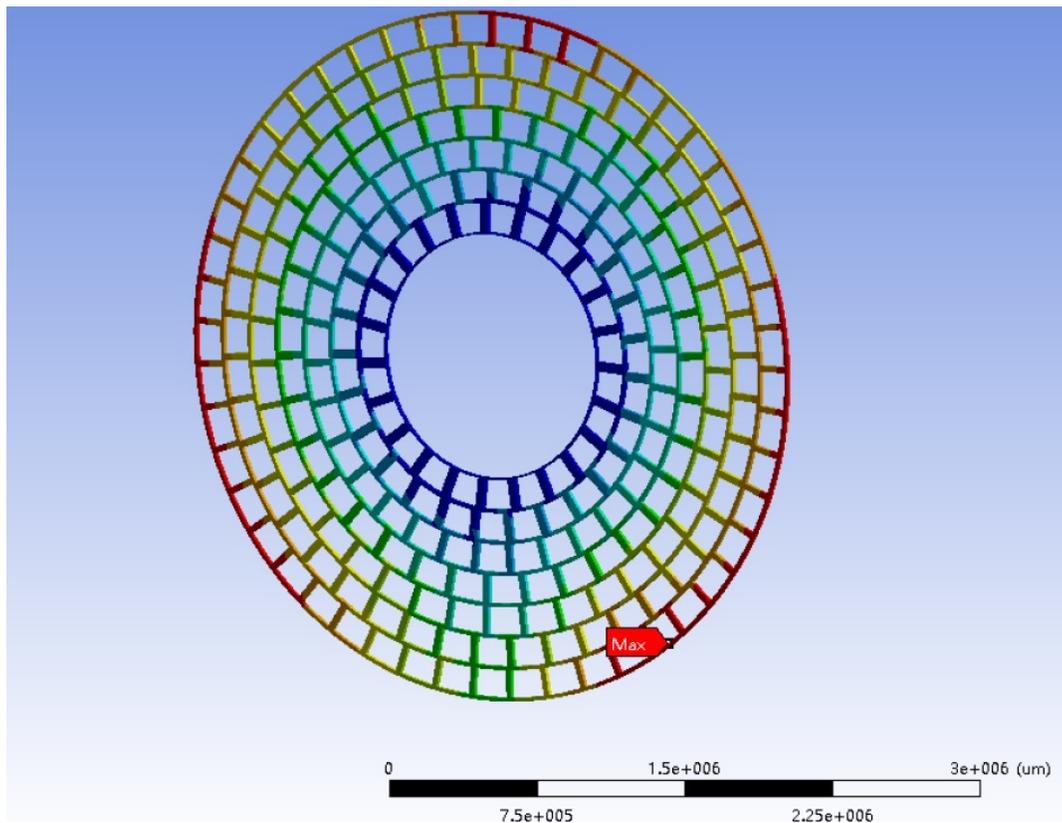
Layer of the barrels	D[cm]	X_0 [cm]	d/X_0 [%]
Copper shielding	0.001	1.45	0.07
CF outer barrel	0.020	25.28	0.08
Mirror strips	0.003	1.35	0.19
Polyimide substrate	0.005	32.65	0.02
Field strips	0.003	1.35	0.19
CF inner barrel	0.010	25.28	0.04
Sum of the material budget			0.59

极低物质质量桶部设计

CEPC-TPC 实验研究进展二

■ 桶部和端盖处的应力计算→端盖和桶部的进一步优化

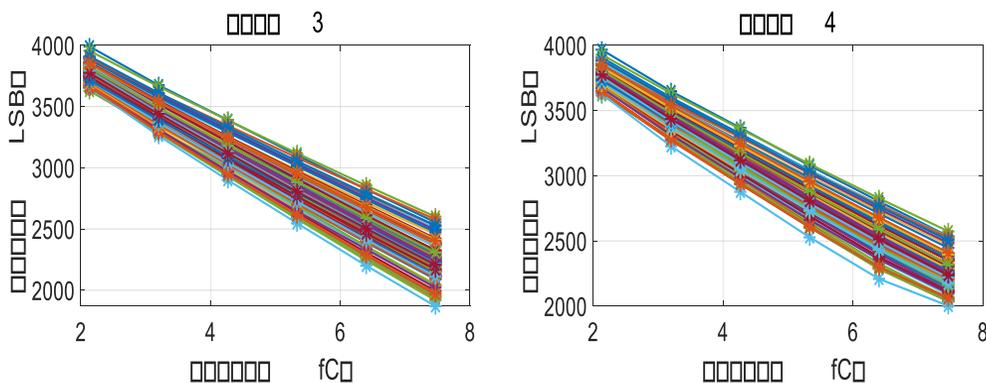
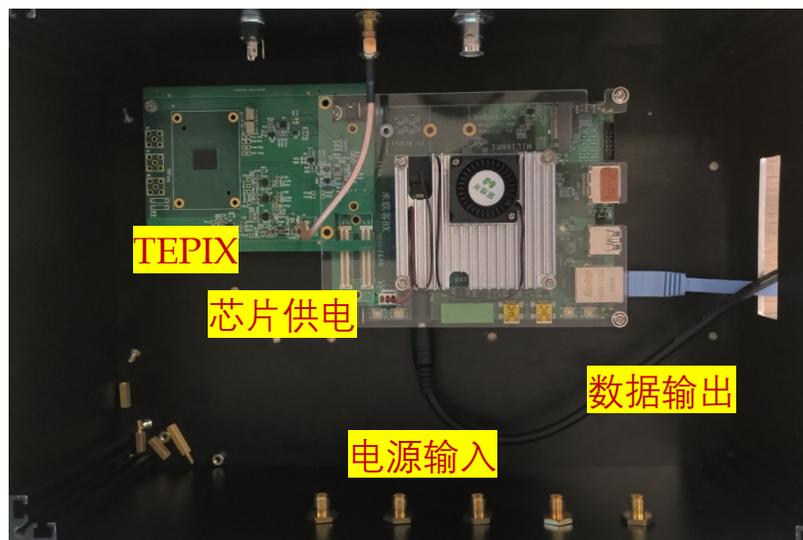
- ✓ 端盖：2.1毫巴(2190N)下的挠度为 0.15mm，满足端盖设计要求
- ✓ 桶部：均匀载荷时最大应力2MPa，满足剪切应力形变的安全量



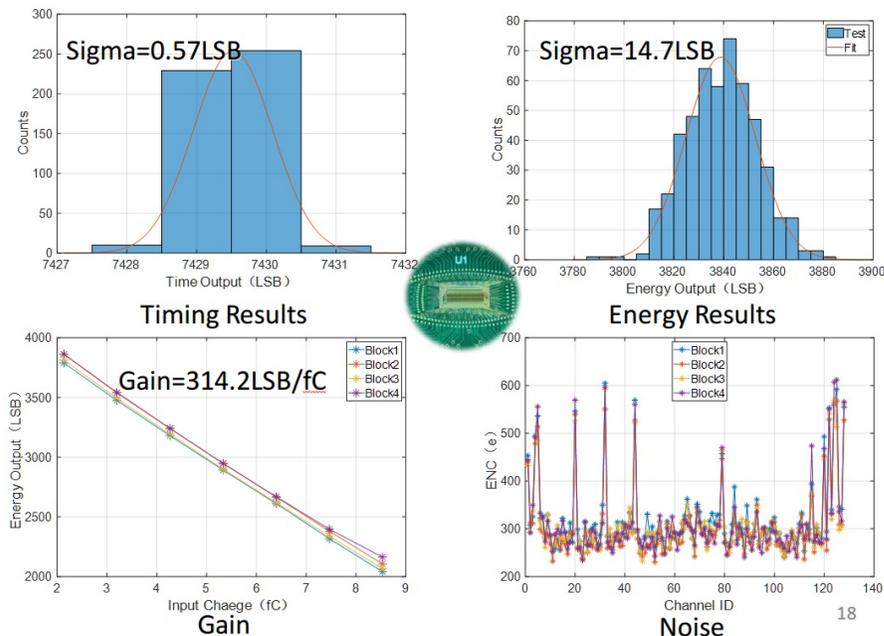
CEPC-TPC实验研究进展三

■ 像素型TPC读出芯片研发进展

- 像素型 TPC ASIC 芯片研发
- 第二版wafer设计已经完成, 正在测试中
- TOA+TOT模式
- 设计电子学噪声: 100e
- 时间分辨: 14bit(5 ns bin)
- 功耗: $\sim 100\text{mW}/\text{cm}^2$

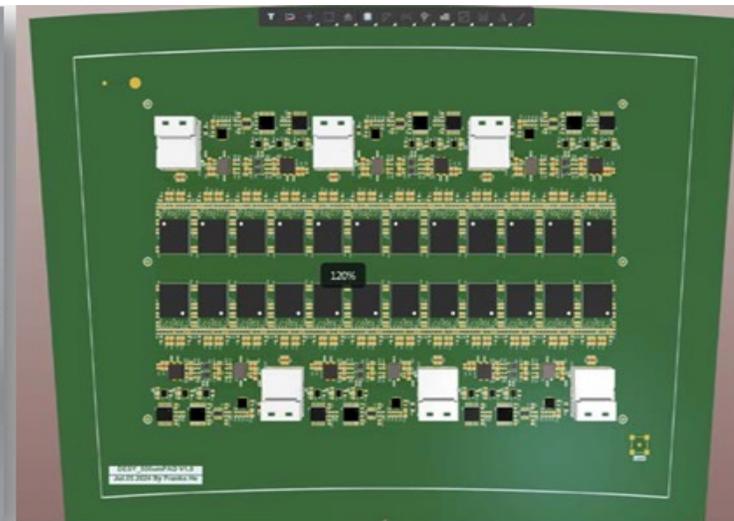
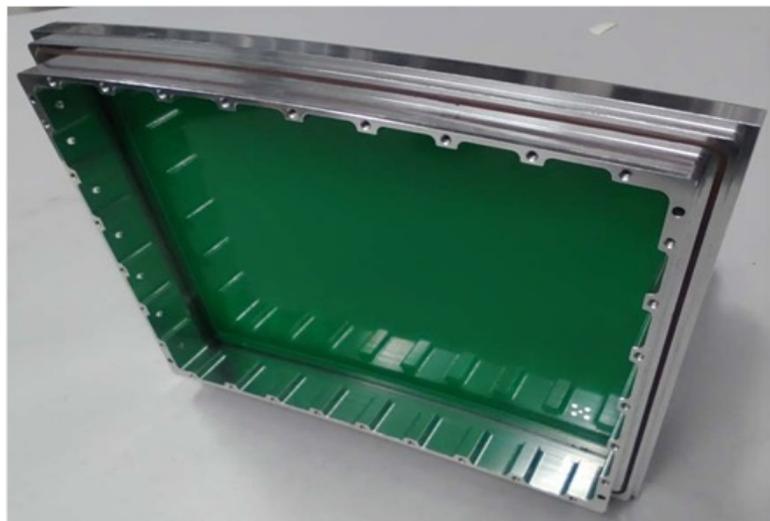
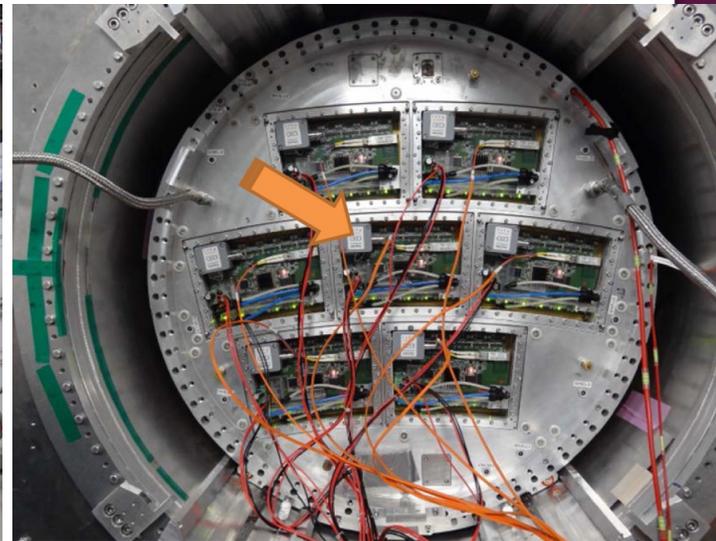


通道间不一致性-增益测试结果



CEPC-TPC 实验研究进展四

- 在DESY的大型原型TPC通用束流测试平台上进行实验测试
- 基于通用大型TPC测试凭条完成模块实验研究
- 单个Micromegas TPC模块+一个备用模块
 - 3000 500 μm \times 500 μm channels



小结

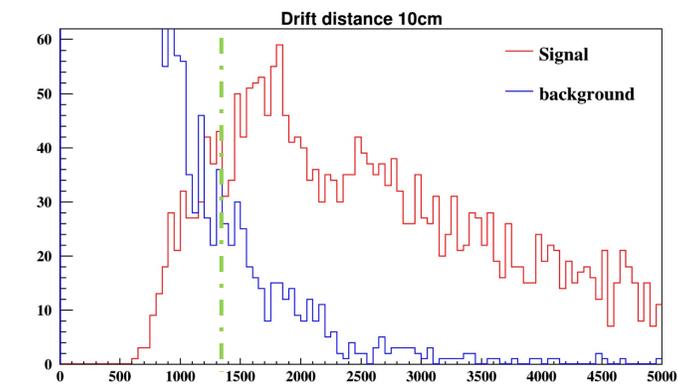
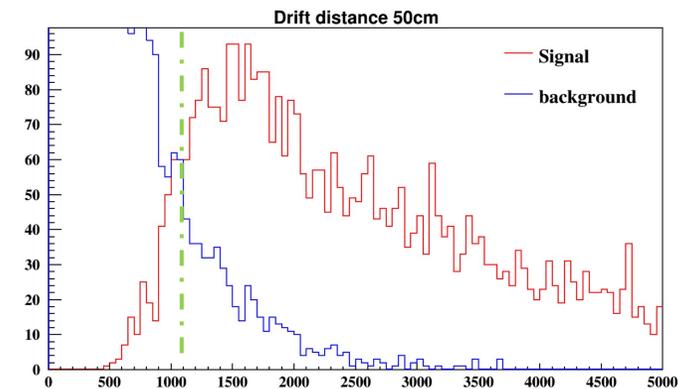
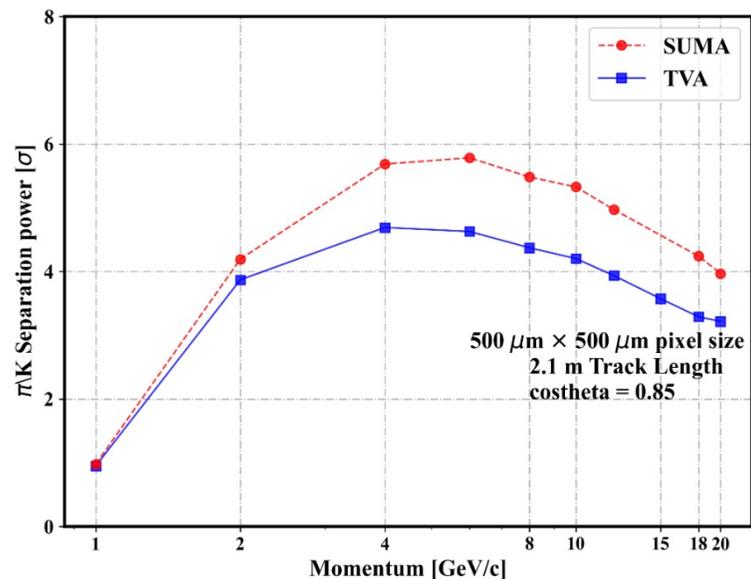
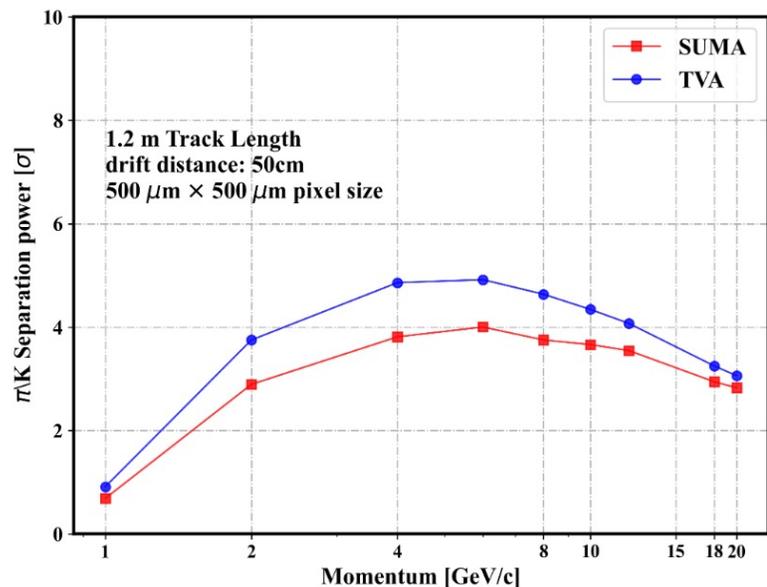
- 正负环形对撞机需要径迹探测器提供更高的位置分辨和粒子鉴别能力
- 利用小的像素尺寸单元测量 dN/dx 对于TPC 粒子鉴别有 2σ 的提升潜力
- 搭建了像素型TPC软件框架系统实现对TPC内物理过程的全模拟
- 基于软件框架系统开发了TVA与SUMA算法, $S_p > 3\sigma$
- 后续将结合两种算法开展下一步优化
- 基于像素芯片读出的TPC实验研究和测试正在进行中

THANKS !

BACK UP

模拟研究三：重建方法

- 阈值算法 (TVA):通过设置阈值, 筛选掉background, 实现对cluster的初步重建
- 加和算法(SUMA):统计一定区域内的hit pad number
- 漂移距离不会影响阈值的设置
- 重建效率与漂移距离有关(漂移距离1m时, 重建效率为90%)
- TVA算法在漂移距离相同下表现出更好的Sp
- SUMA算法对于斜入射径迹表现出更好的Sp

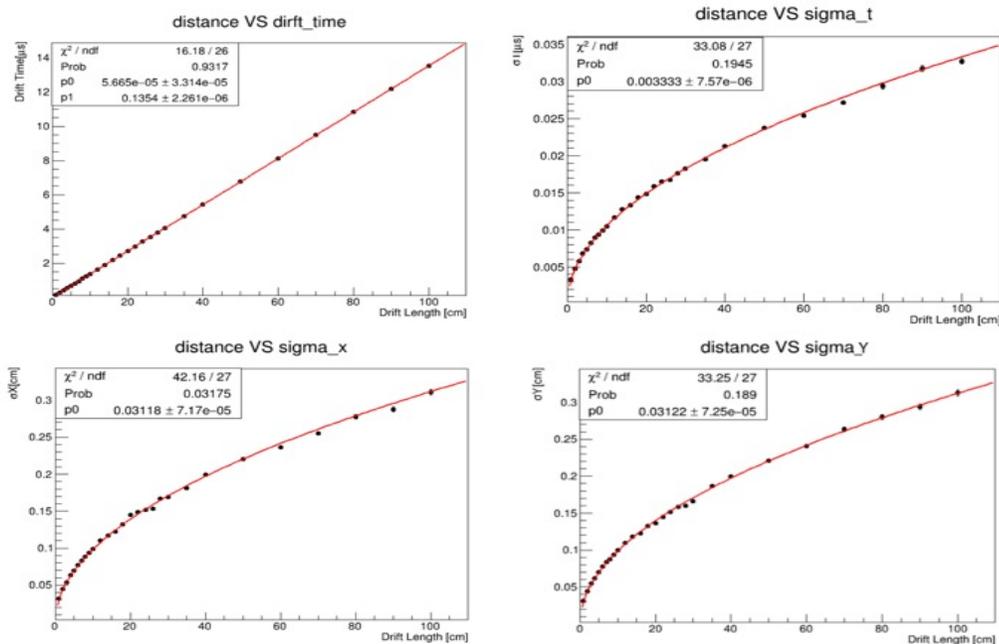


TPC内物理过程的参数化

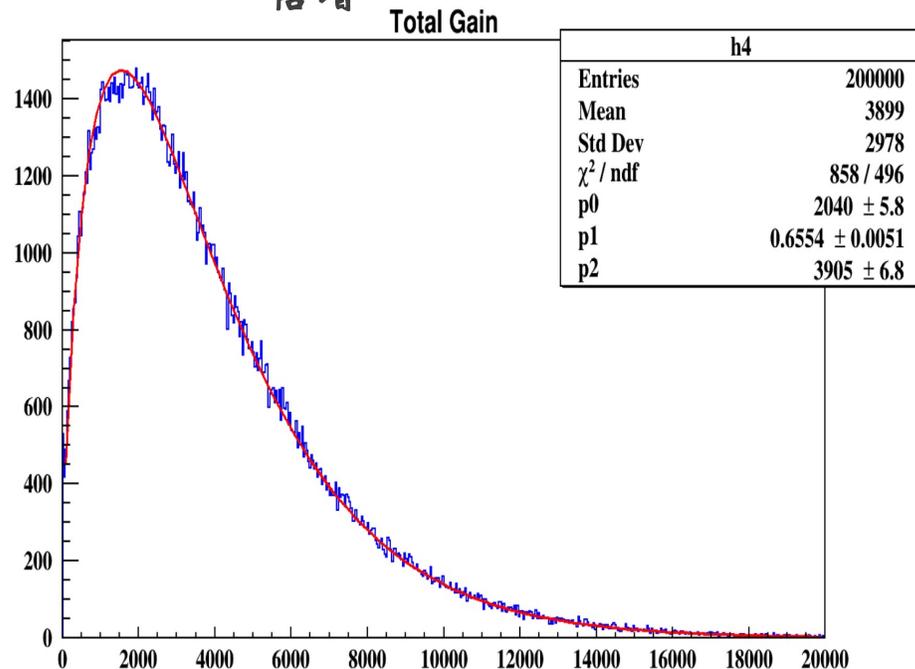
■ 通过对TPC内部物理过程的参数化模型实现快速模拟

- ✓ 扩散：得到 σ_T 、 σ_X 、 σ_Y 与漂移距离的关系
- ✓ 倍增：模拟Micromegas倍增得到Polya拟合参数
- ✓ 信号的产生：高斯抽样

扩散

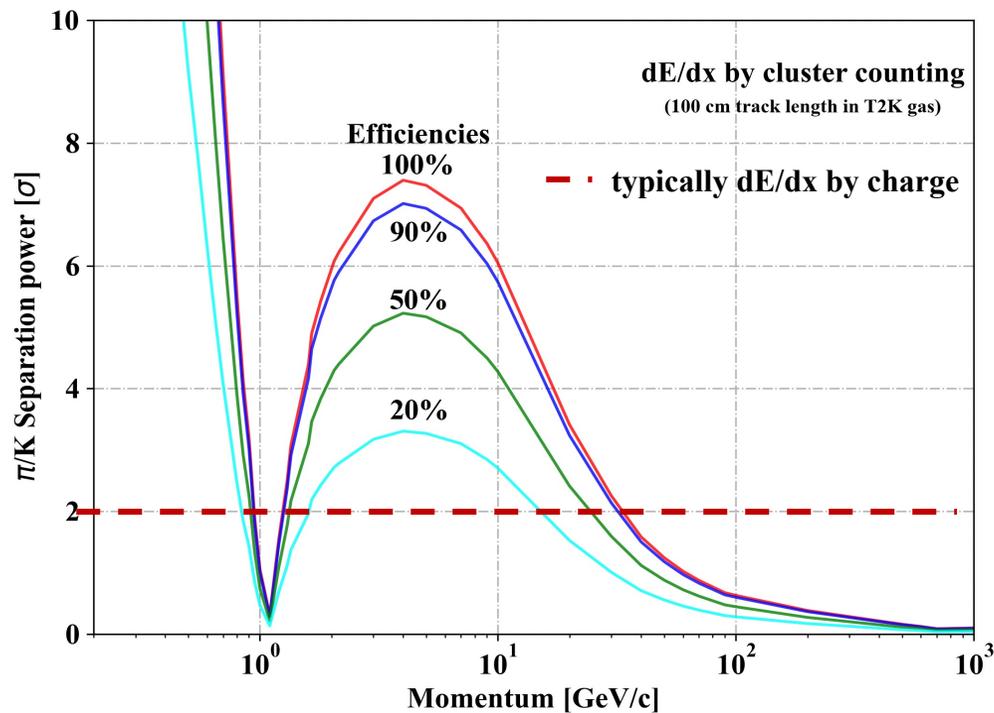


倍增

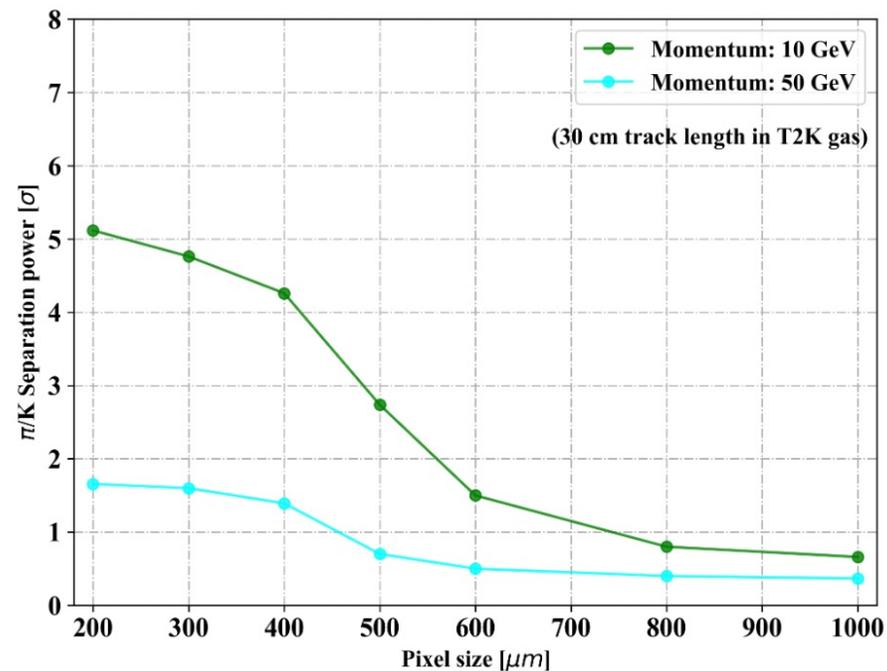


模拟研究三：像素尺寸的优化

- 大尺寸的pad型 进行电荷求和，典型的粒子分辨能力(Sp)： $\pi/k \rightarrow 2\sigma$ up to 8 ~ 20 GeV (max. 2.5 ~ 3.5 σ)
- 利用像素型实现dN/dx 研究，探测效率>25%时，就能超过电荷求和方法
- 基于Hit pixel 数对 π/k 的分辨能力开展的初步的模拟研究——至少有2倍的提升潜力
- 径迹重建算法的优化将提升探测器性能研究



不同探测效率下 π/k 的粒子分辨能力



基于Hit 击中数的 π/k 的粒子分辨能力与像素尺寸的关系初步研究结果

Cluster 重建

■ 阈值算法 (TVA): 通过设置阈值, 筛选掉background, 实现对cluster的初步重建

■ 加和算法(SUMA): 统计一定区域内的hit pad number

■ 漂移距离不会影响阈值的设置

