

# 高粒度像素型读出时间投影室 技术优化研究

报告人：常悦

祁辉荣，余信，邓智，喻纯旭，王建春，张建，  
伍灵慧，赵光，李刚，阮曼奇  
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

## ■ 高对撞亮度环形对撞机概念设计 (CEPC、FCC-ee)

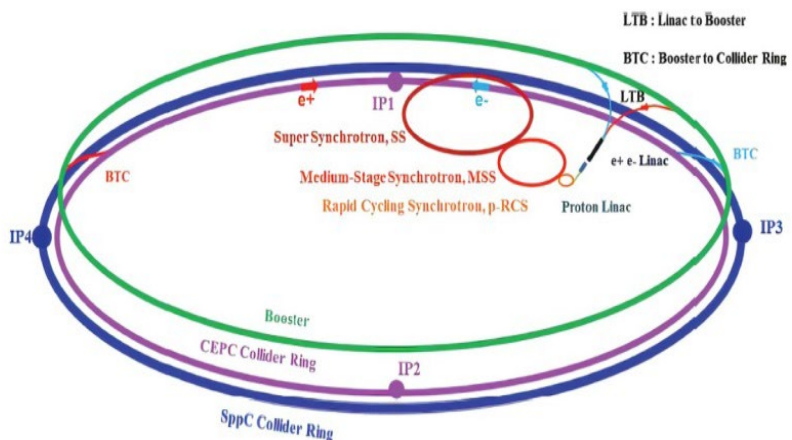
需要径迹探测器提供**更高精度、更好的PID能力**

## ■ TPC是主径迹探测器的重要选项

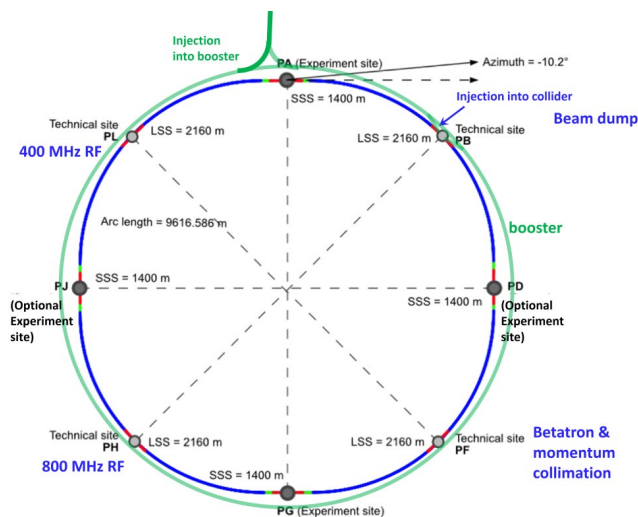
✓ 长径迹重建能力

✓ 低物质质量、高占空比

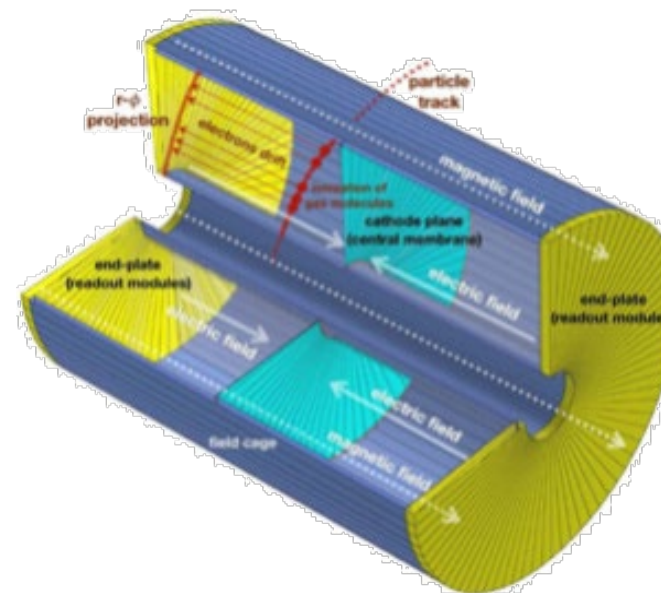
✓ 高位置分辨和动量分辨



Circular Electron Positron Collider CEPC



Future Circular Collider (FCC-ee)



CEPC TPC

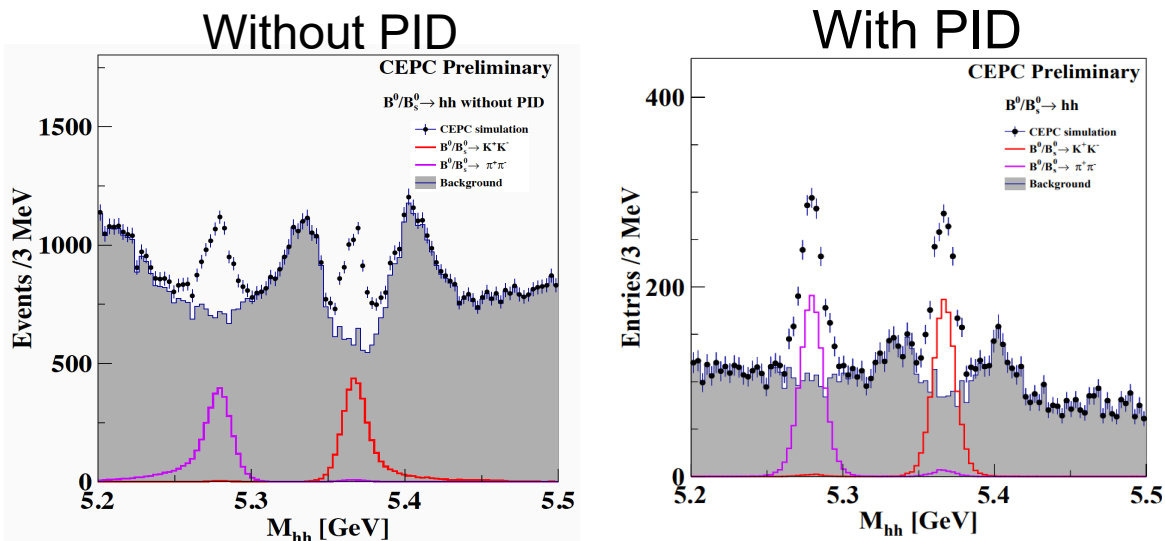
# TPC的物理需求

- 提供上百个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 < 4% 的分辨率,提升探测器的粒子鉴别能力

PID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

## TPC 的物理需求

Parameter	$r_{\text{in}}$	$r_{\text{out}}$	$z$
Geometrical parameters	329 mm	1808 mm	$\pm 2350$ mm
Solid angle coverage	up to $\cos\theta \simeq 0.98$ (10 pad rows)		
TPC material budget	$\simeq 0.05 X_0$ including outer fieldcage in $r$ $< 0.25 X_0$ for readout endcaps in $z$		
Number of pads/timebuckets	$\simeq 1-2 \times 10^6/1000$ per endcap		
Pad pitch/ no.padrows	$\simeq 1 \times 6 \text{ mm}^2$ for 220 padrows		
$\sigma_{\text{point}}$ in $r\phi$	$\simeq 60 \mu\text{m}$ for zero drift, $< 100 \mu\text{m}$ overall		
$\sigma_{\text{point}}$ in $rz$	$\simeq 0.4 - 1.4$ mm (for zero - full drift)		
2-hit resolution in $r\phi$	$\simeq 2$ mm		
2-hit resolution in $rz$	$\simeq 6$ mm		
dE/dx resolution	$\simeq 5\%$		
Momentum resolution at B=3.5 T	$\delta(1/p_t) \simeq 10^{-4}/\text{GeV}/c$ (TPC only)		

# TPC 中的粒子鉴别研究

## ■ 经典的电荷求和(传统的大尺寸Pad读出)

优势: 技术成熟

不足: 受大的波动敏感,

对dE/dx已无大幅提升空间

## ■ 新型簇团计数(小尺寸的像素读出)

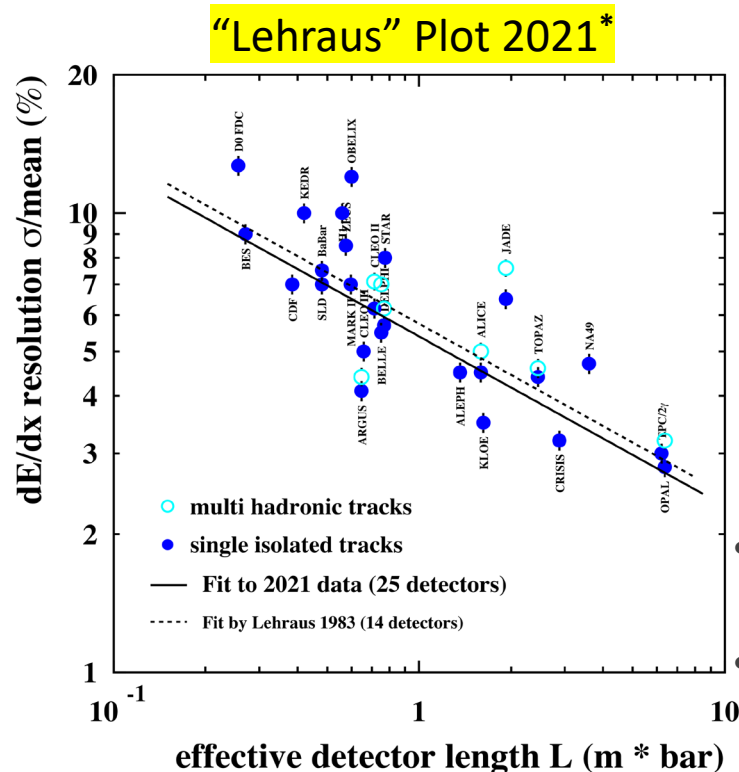
优势: 不受波动影响

dN/dx实现更好的分辨能力

技术难点: 缺乏验证理论 → 模拟验证

技术实现难度较大 → 实验验证

关键: 利用像素型读出技术实现簇团计数

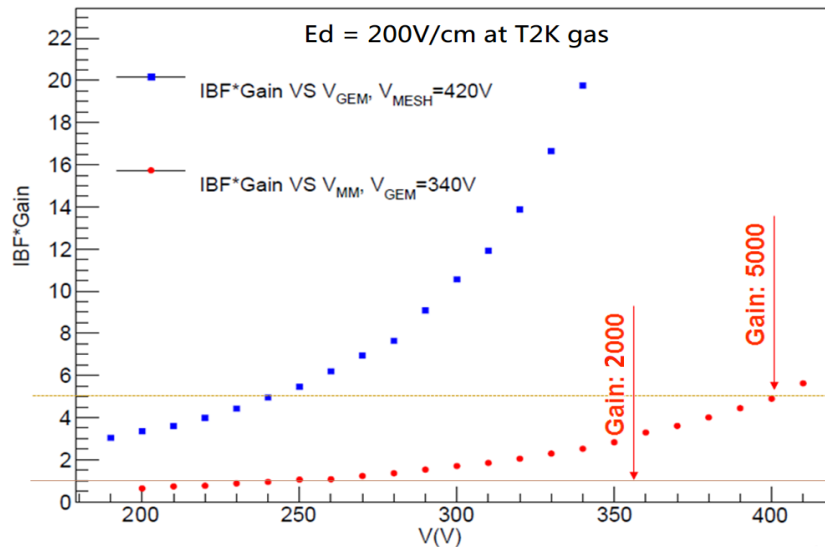
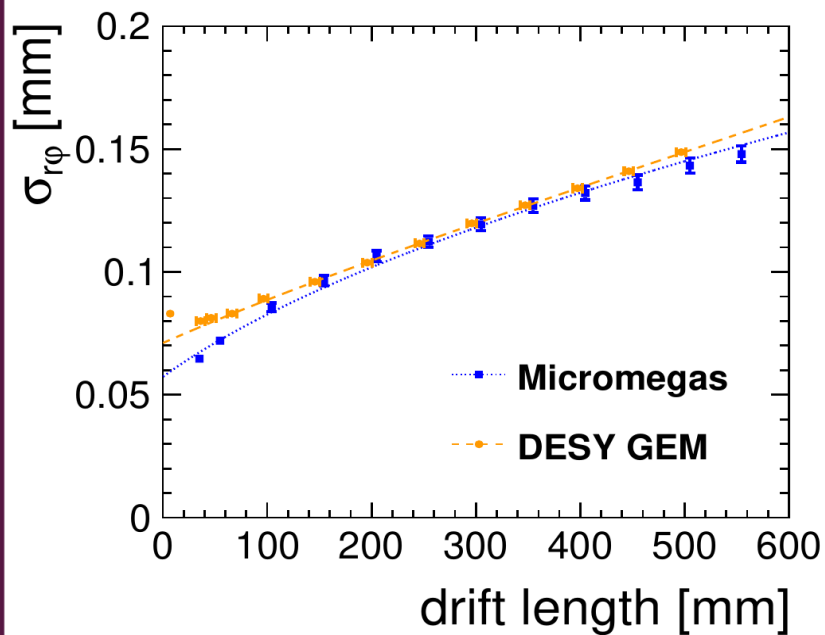


- Fit by Lehraus 1983:  
 $dE/dx \text{ res.} = 5.7 * L^{-0.37} (\%)$
- Fit in 2021:  
 $dE/dx \text{ res.} = 5.4 * L^{-0.37} (\%)$

\* From Michael Hauschild's talk @ RD51 workshop

# 经典的Pad型读出TPC

- 已完成基于GEM和Micromegas的束流测试，两者性能相似
- LCTPC 计划在新一代模块中使用**通用模块(通用电子学,仅倍增部分不同)**进行改进
- CEPC-TPC 团队已经开展了GEM+ Micromegas的研究，实现了IBF的有效控制(无门控)
  - ✓ 在增益2000的情况下实现了 $IBF \times Gain \sim 1$

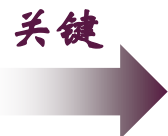




# 像素型读出应用于CEPC-TPC

## ■ 像素型读出对于高亮度下的CEPC-TPC极具优势

- ✓ 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



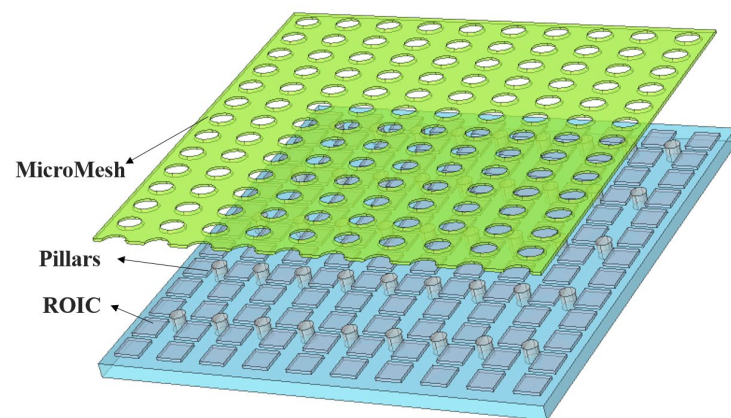
## ■ Pixelated-TPC性能优化研究

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

.....

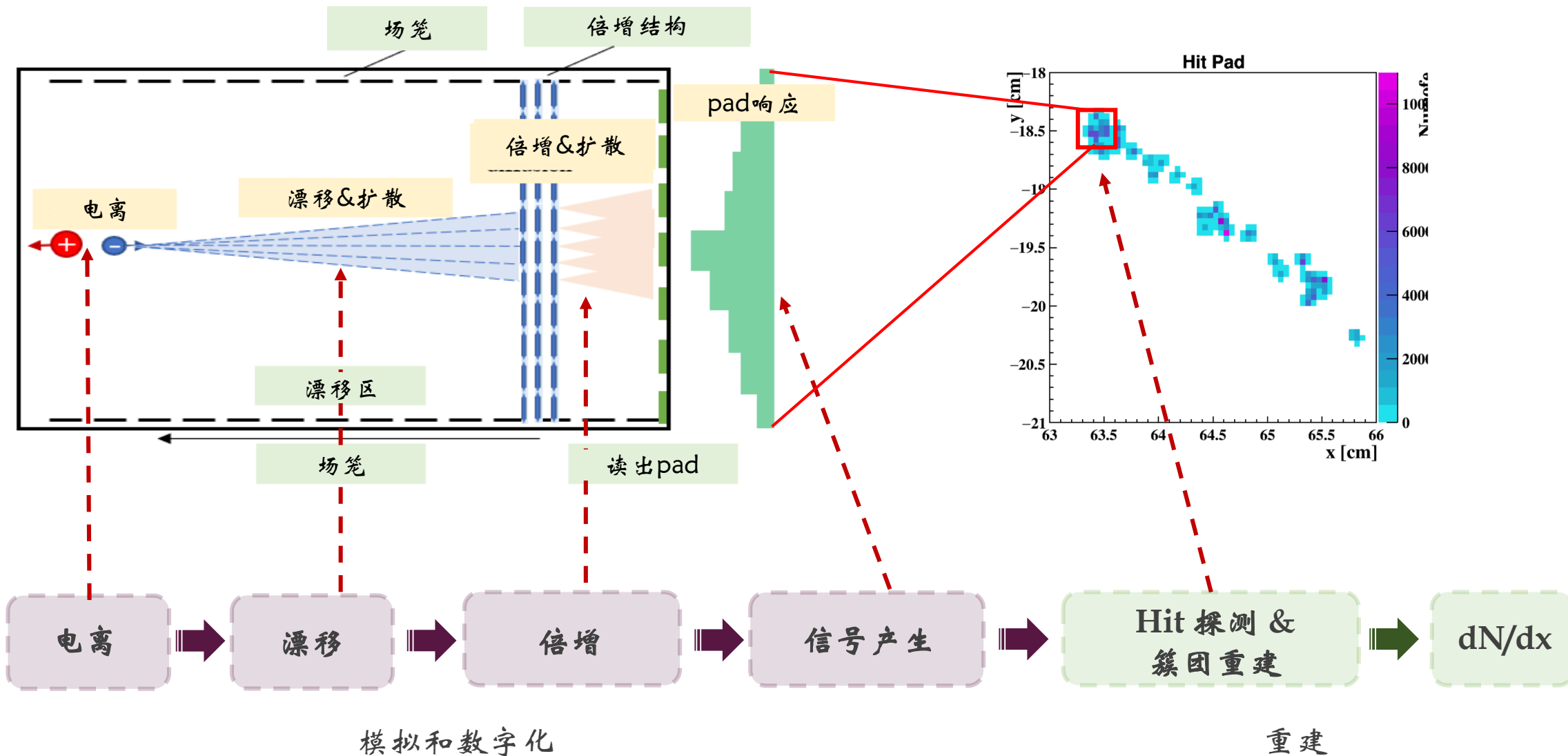
Pad型读出	Pixel 读出
读出面积 $2 \times 10 \text{ m}^2$	读出面积 $2 \times 10 \text{ m}^2$
微结构气体探测器读出	微结构气体探测器读出
单Pad尺寸 $1 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$	单pixel尺寸 $55 \mu\text{m} \times 55 \mu\text{m}$
$10^6$ 个读出单元	$10^9$ 个读出单元
84个读出模块	480个读出模块
快电子学读出	快电子学读出
CO <sub>2</sub> 冷却	CO <sub>2</sub> 冷却
	更好的计数率 $>900 \text{ kHits/s}$

CEPC-TPC两种读出方式比较



像素型读出结构示意图

# 像素型TPC 模拟优化研究框架

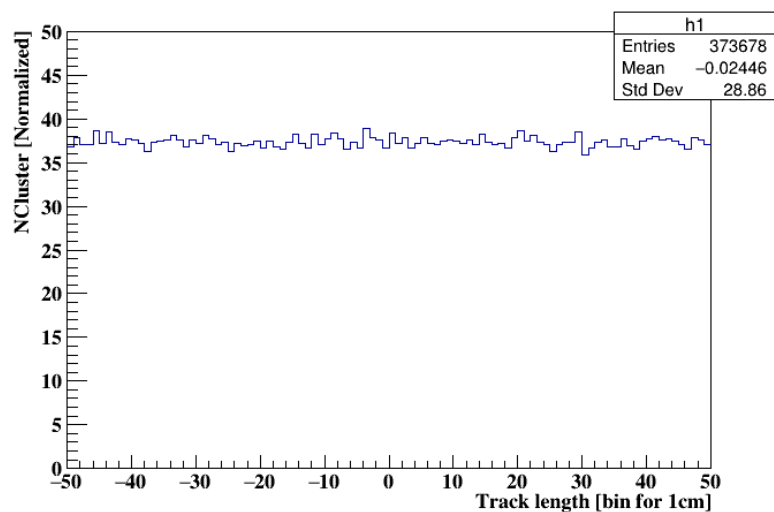
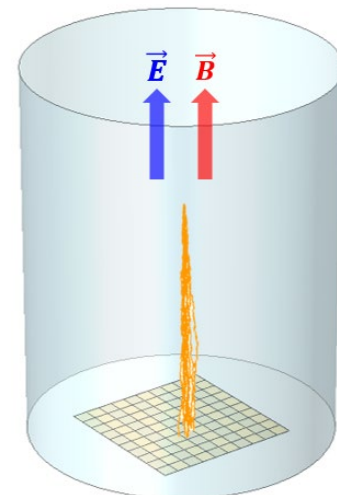




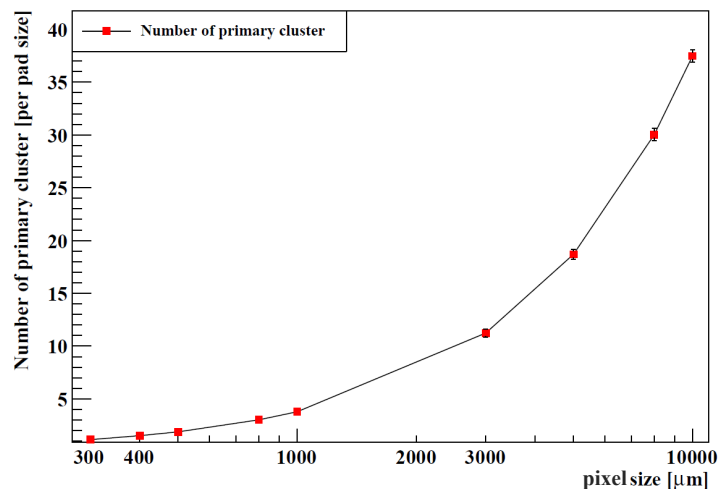
# 模拟研究一：原初电离簇团

## ■ 利用Garfield++ TrackHeed对原初电离簇团进行模拟(@ 2T)

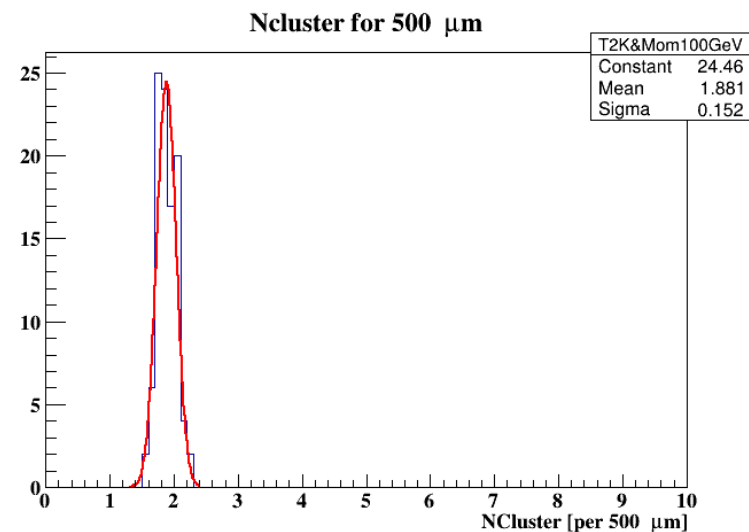
- 在Ar基气体中，典型的电离簇团~30 cluster/cm @ 1bar ,T2K :37.4cluster/cm
- ~1.9 clusters/ 500  $\mu\text{m}$  , ~1.2 clusters/ 300  $\mu\text{m}$
- 初步结论：像素尺寸在300  $\mu\text{m}$  ~ 500  $\mu\text{m}$ ，即可实现对每个电离簇团的计数



Cluster沿径迹分布的情况



Cluster数与像素尺寸的关系



Pad size = 500  $\mu\text{m}$  Ncluster/cm

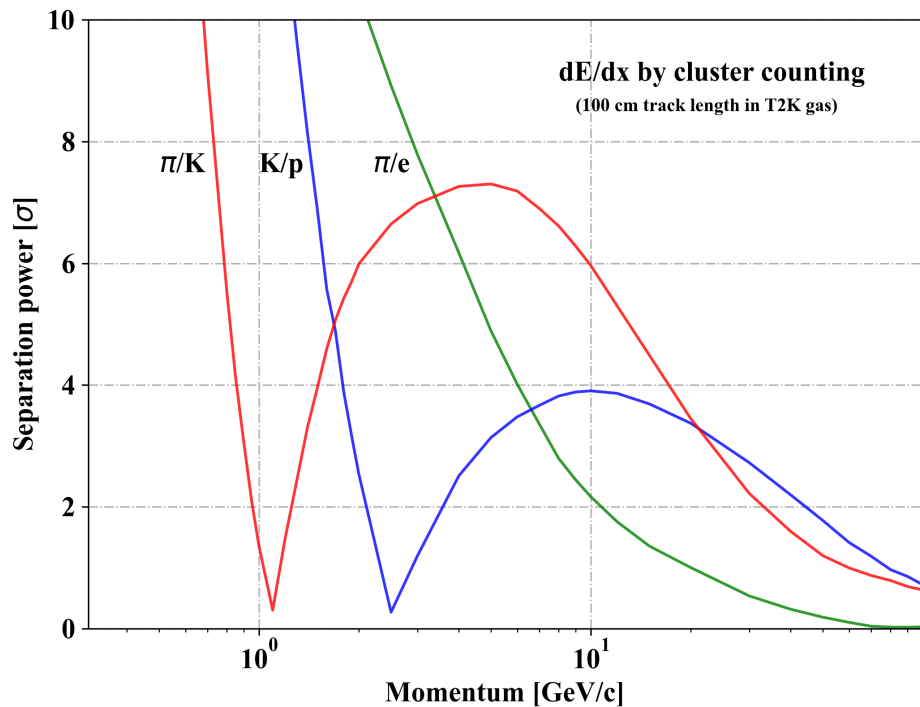
# 模拟研究二：粒子鉴别潜力

■ 定义粒子鉴别能力(Sp)参数

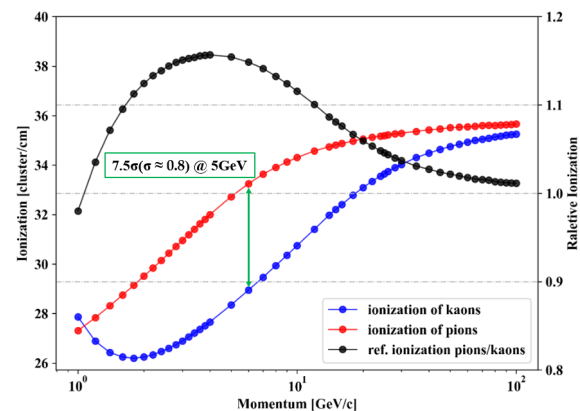
$$Sp = \frac{|\mu_A - \mu_B|}{\sqrt{\frac{\sigma_A^2 + \sigma_B^2}{2}}}$$

■ 基于原初电离簇团，模拟了

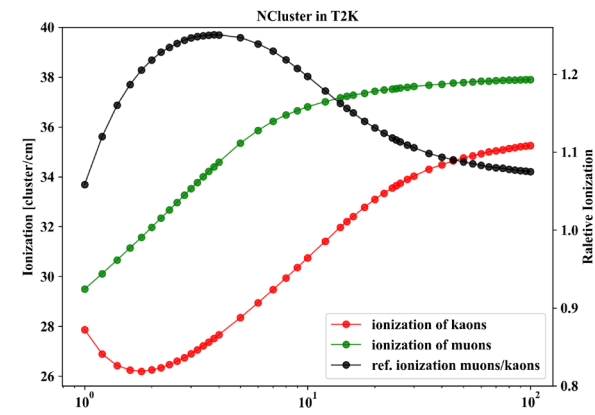
$\pi/k/p$ 不同动量下的粒子分辨能力



簇团计数的粒子分辨能力

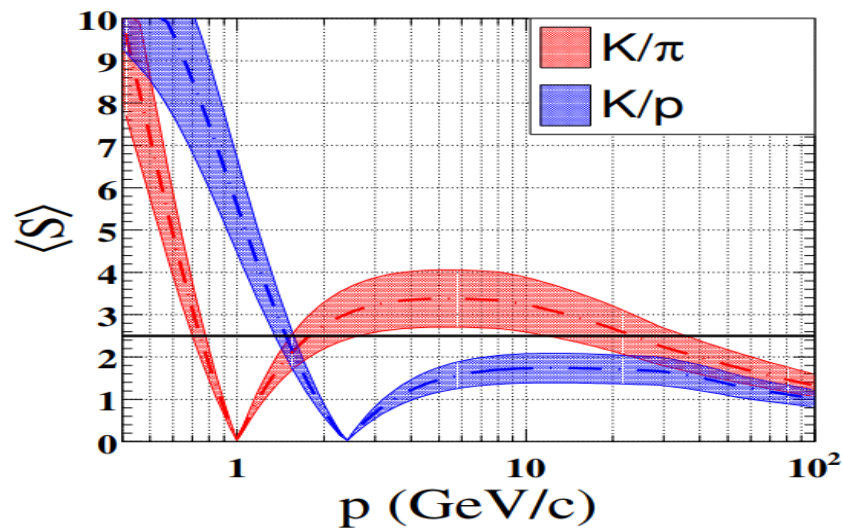


$\pi/k$ 原初电离簇团的分辨能力



$\mu/k$ 原初电离簇团的分辨能力

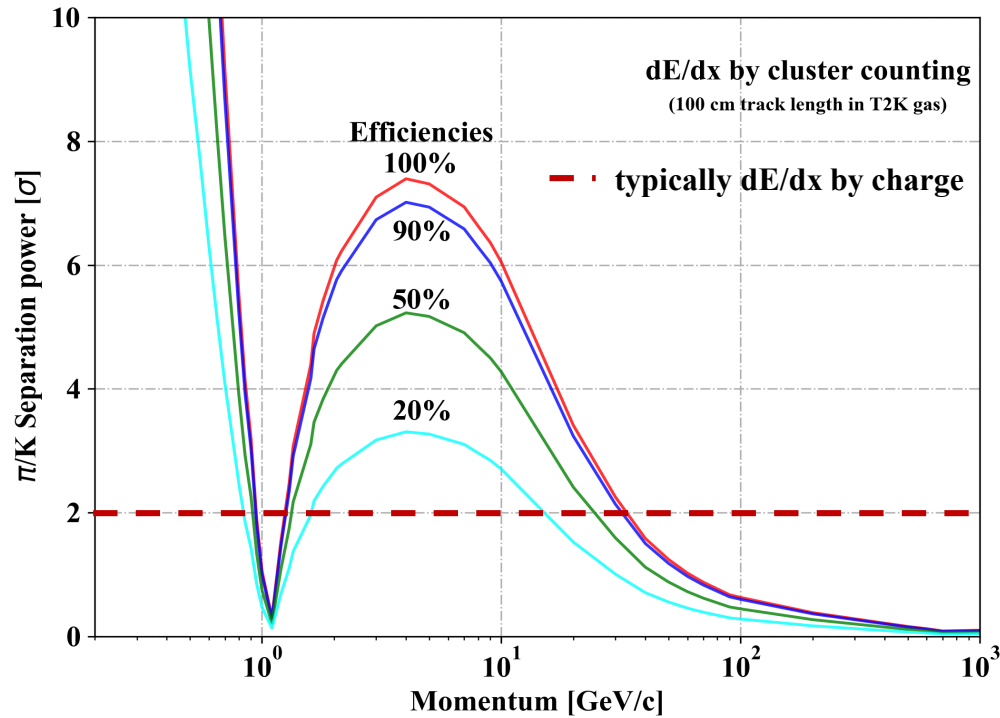
EPJ C 78, 464 (2018)



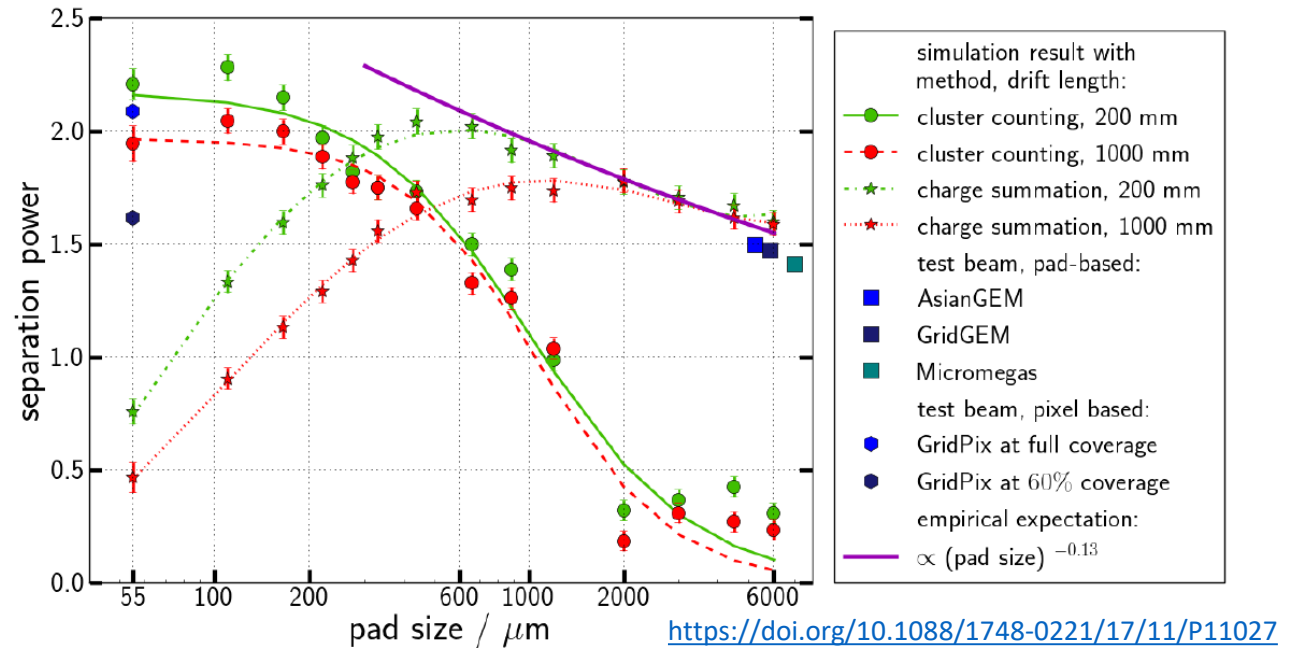
电荷求和的粒子分辨能力

# 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  $\sigma$  )
- 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
- 优化像素尺寸，能带来两倍以上粒子鉴别提升潜力



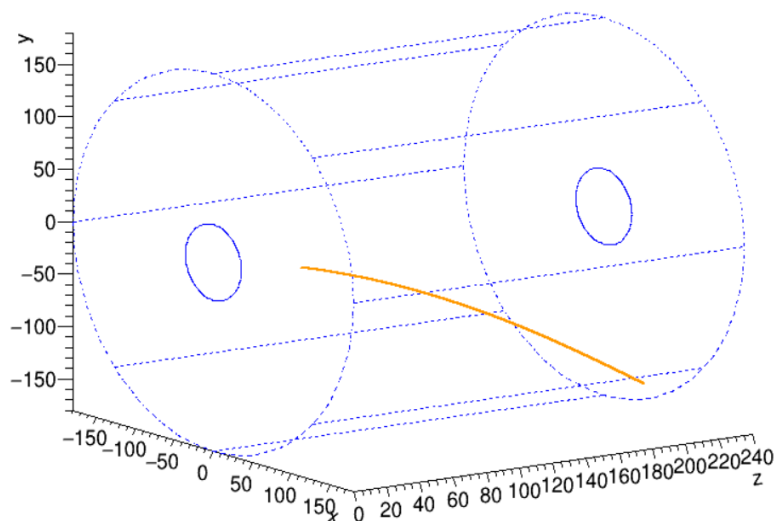
不同探测效率下 $\pi/k$ 的粒子分辨能力



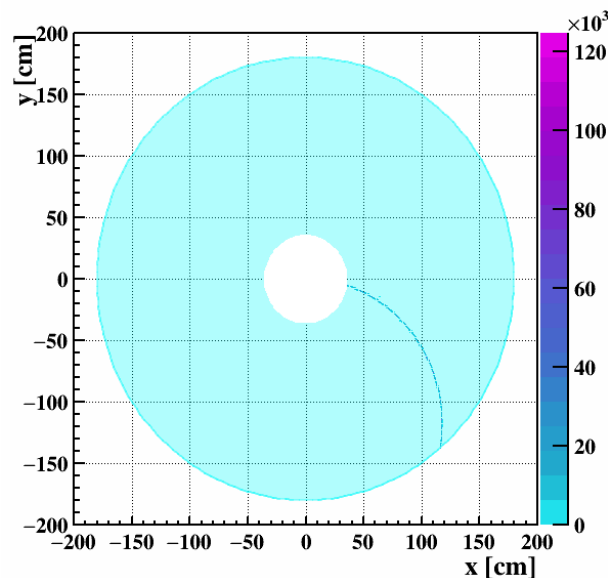
$\pi/k$ 的粒子分辨能力与像素尺寸的关系

# 模拟研究四：cluster重建

- 在TPC内部任意方向产生一条径迹
- 模拟参数与 Half-CEPC-TPC 一致
- pixel size = 500 um , 得到每个簇团在端盖处的分布



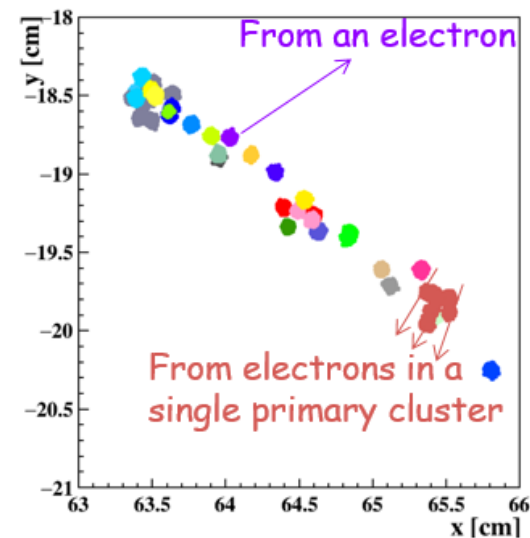
TPC 内的一条径迹显示 [1 GeV/c]



径迹在端盖处的投影

大部分的簇团都是可以分开的

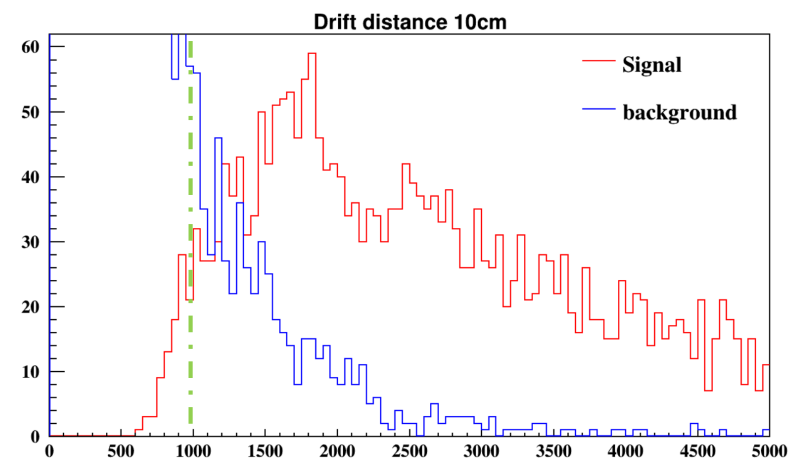
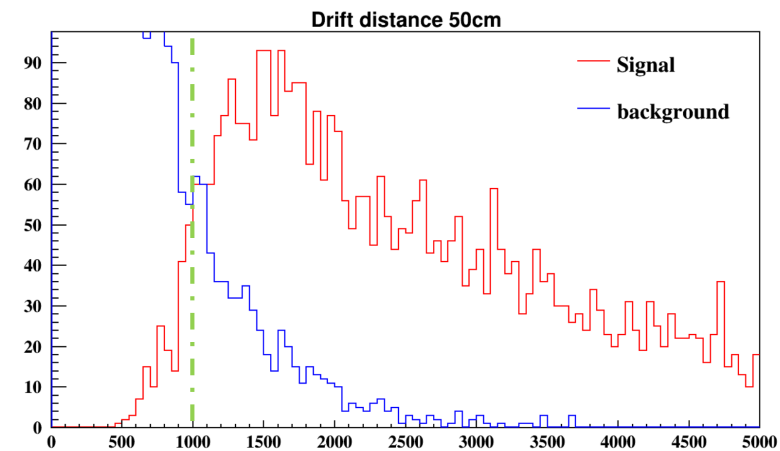
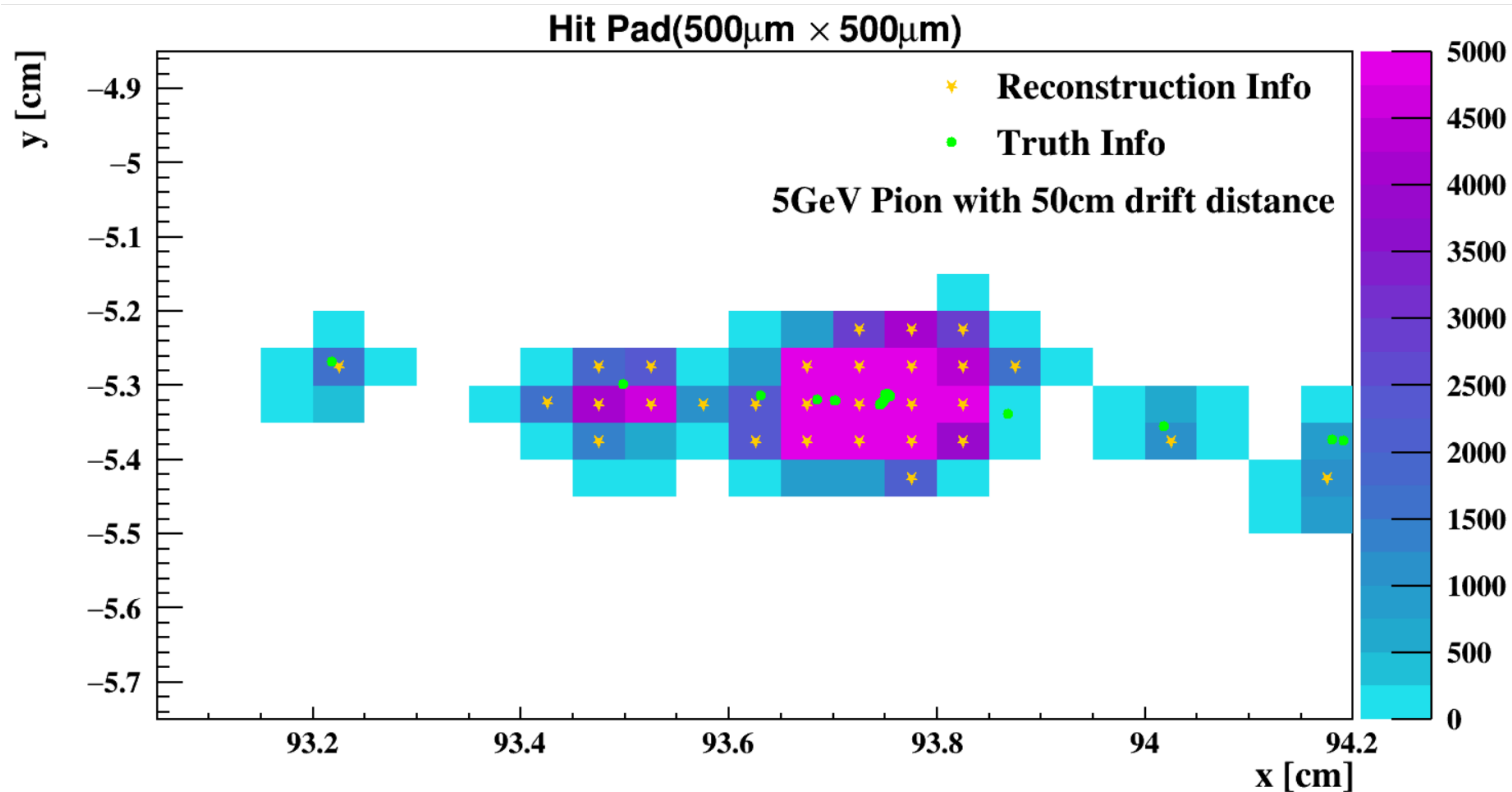
仍需继续优化.....



簇团显示

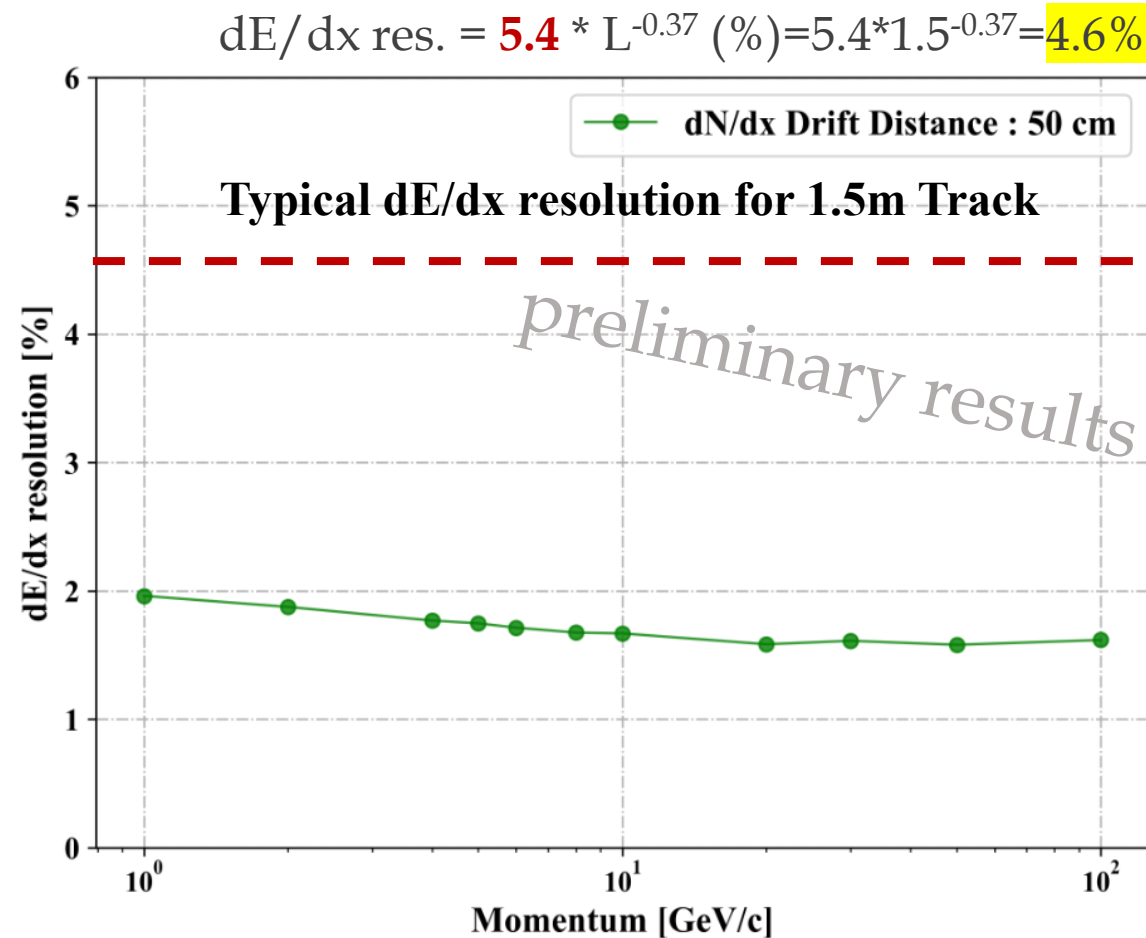
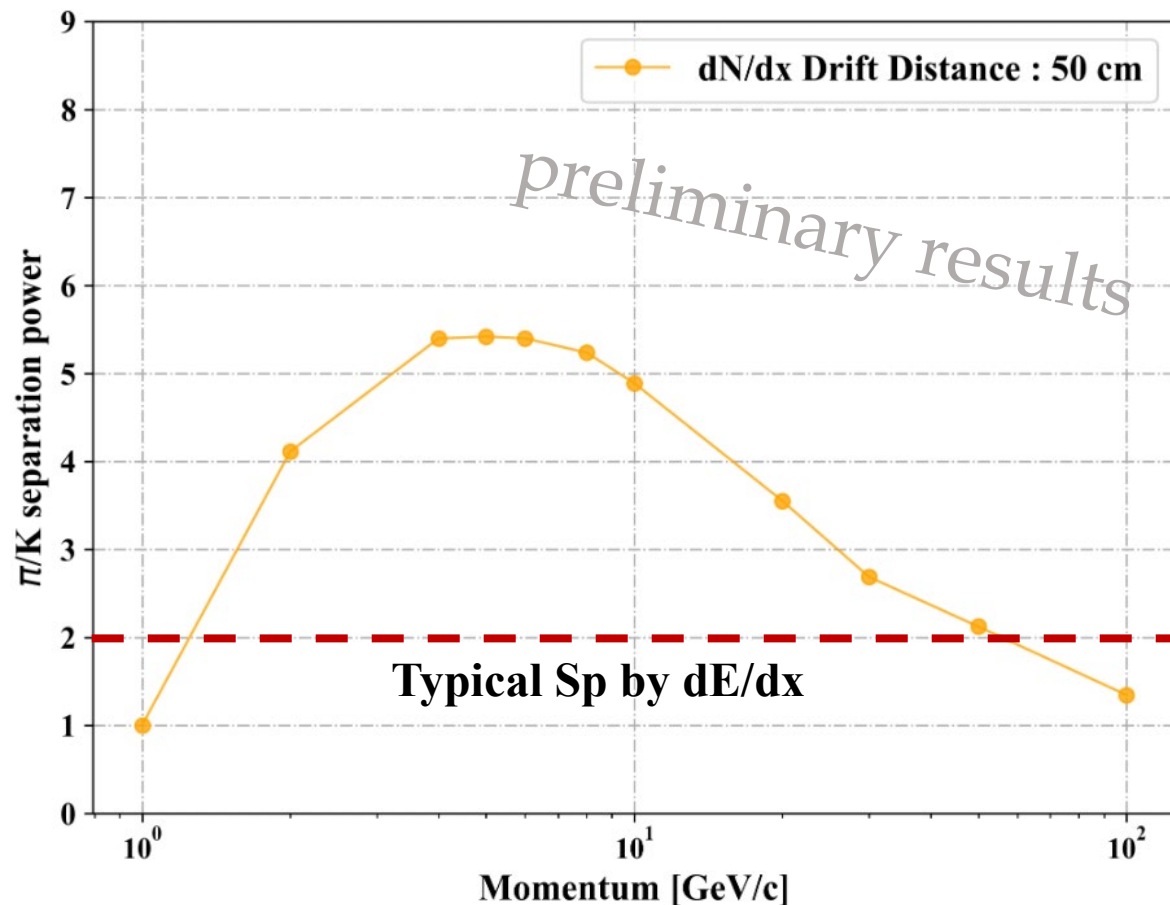
# 模拟研究四：cluster重建

- 利用设置阈值的方法实现对cluster的初步重建
- 漂移距离对阈值的设置没有影响
- 对于5GeV Pion 150cm径迹长度，50cm漂移距离，重建效率可达60%



# 模拟研究四：cluster重建初步结果

- 利用重建的cluster研究 $\pi/K$ 分辨能力，在5GeV处，经过50cm的漂移距离可达到 $5.3\sigma$  (无噪声)
- 具有很好的dE/dx分辨的提升潜力

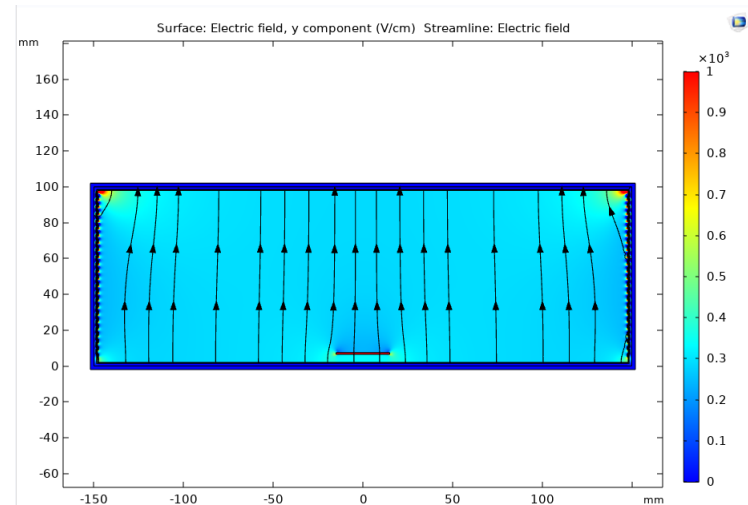
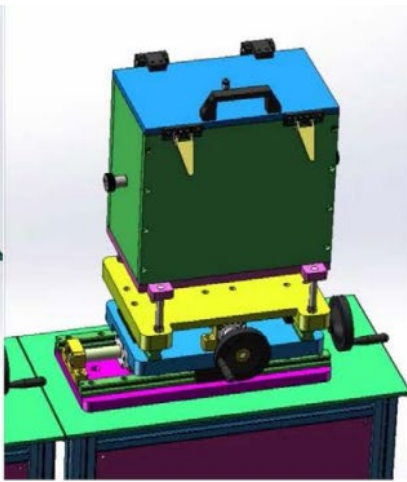
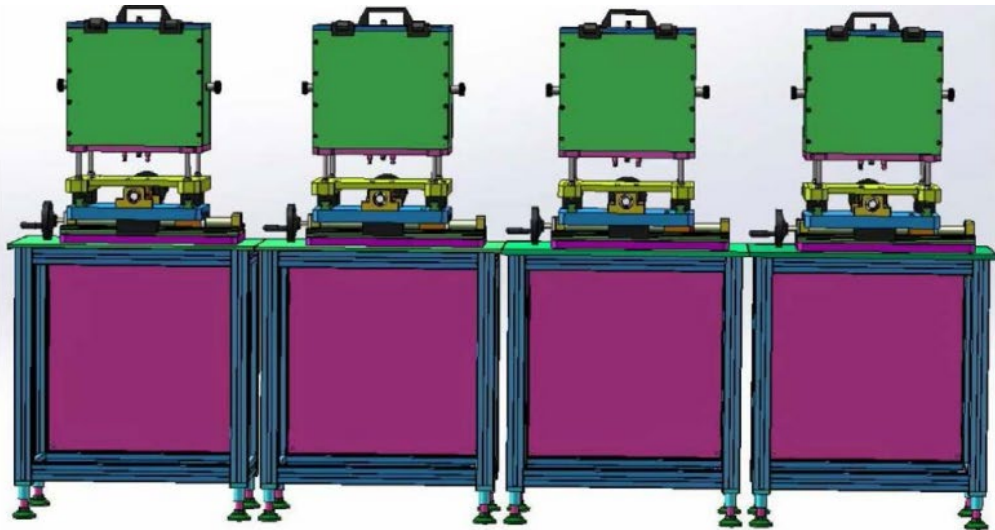




# 实验研究进展

## ■ 与清华大学的合作，对像素型TPC的实验研究

Micromegas Bonding pixel单元，实现像素型技术	模块尺寸	R&D
<ul style="list-style-type: none"><li>• <math>\geq 300 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}</math></li><li>• 由清华大学邓智老师团队开发读出芯片</li><li>• 由高能所研发 Micromegas 探测器模块</li><li>• 搭建一台像素型TPC原型机</li></ul>	1-2 cm <sup>2</sup>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 像素型读出技术的研发和实现</li><li>• 实现cluster研究和像素尺寸的优化</li><li>• 利用dN/dx + dE/dx 进行PID性能研究</li></ul>
	100 cm <sup>2</sup>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 利用UV laser径迹实现TPC畸变研究</li><li>• 基于UV laser的实现TPC性能的监测</li><li>• 利用dN/dx + dE/dx 进行长径迹PID性能研究</li></ul>





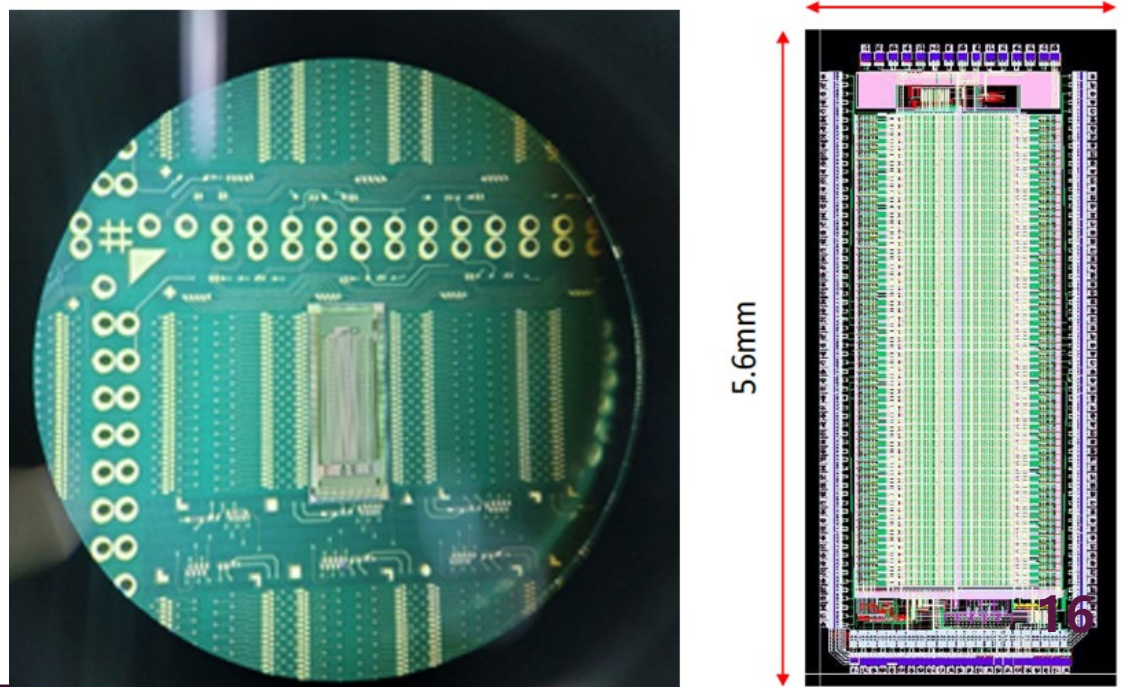
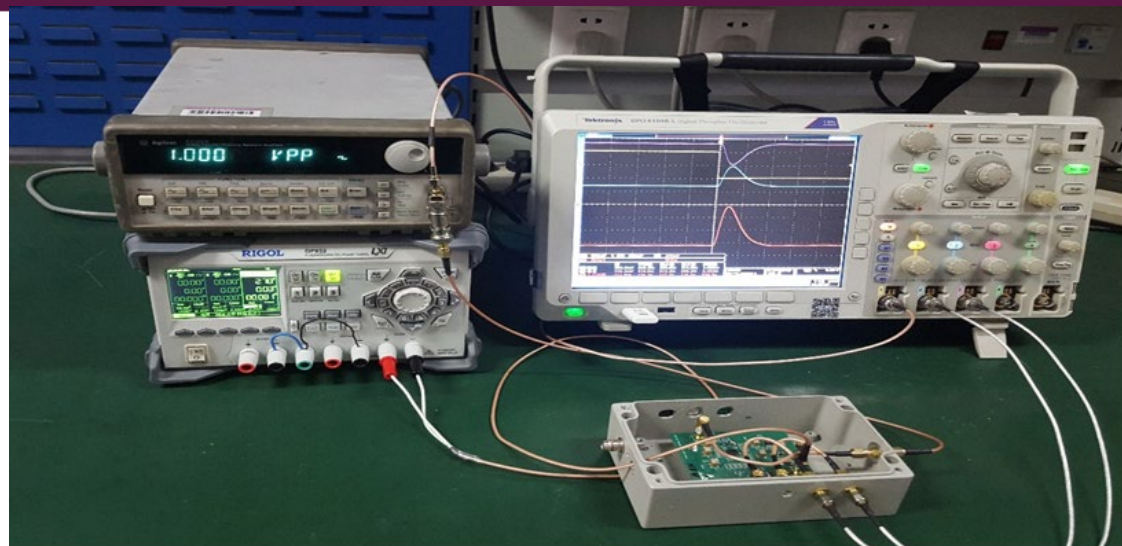
# 实验研究进展

## ■ 像素型TPC读出芯片研发进展

- ✓ 像素型 TPC ASIC 芯片于今年开始研发
- ✓ 已流片完成
- ✓ **第一版ROIC正在测试中**
- ✓ **TOA+TOT模式**

## ■ 从传统的大尺寸1mm×6mm Pad 读出→ 500μm×500μm 小像素读出

- ✓ 更高的精度、更高的计数率(MHz/cm<sup>2</sup>)
- ✓ 放大增益: > 40mV/fC
- ✓ 功耗: **~400mW/cm<sup>2</sup>(最初版测试结果)**
- ✓ 100mW/cm<sup>2</sup> (目标和最终设计)
- ✓ 工艺: 180 nm CMOS → 60 nm CMOS



# 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粒子鉴别的提升极具潜力
- 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
- 基于软件框架实现了像素尺寸单元的优化研究
- cluster重建的初步结构显示出了 $dN/dx$ 在PID方面的优势
- 像素型TPC实验研究及芯片开发正在进行中

**THANKS!**

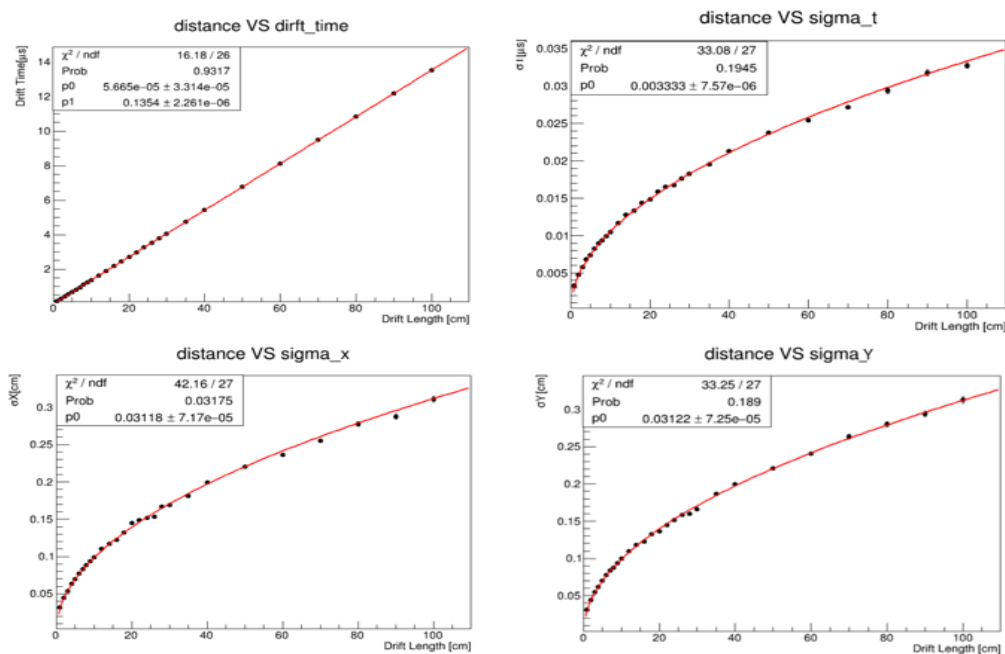
# BACK UP

# 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 $\sigma_T$ 、 $\sigma_X$ 、 $\sigma_Y$ 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

