

高对撞亮度CEPC的像素型 读出TPC探测技术优化

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)

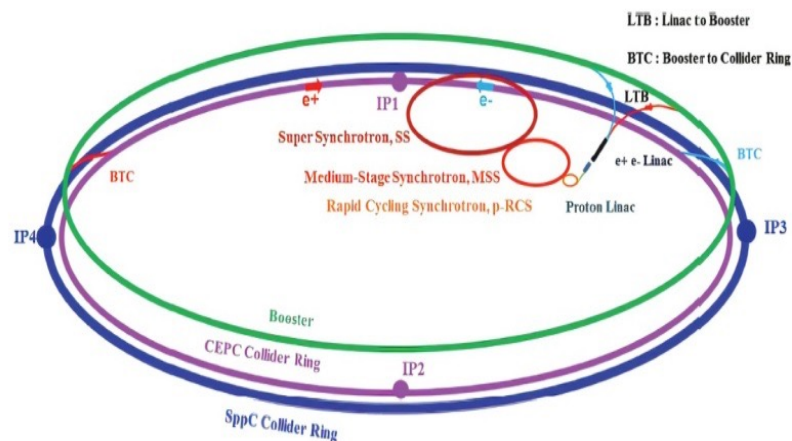
需要径迹探测器提供**更高精度、更好的粒子鉴别能力**

■ TPC是主径迹探测器的重要选项

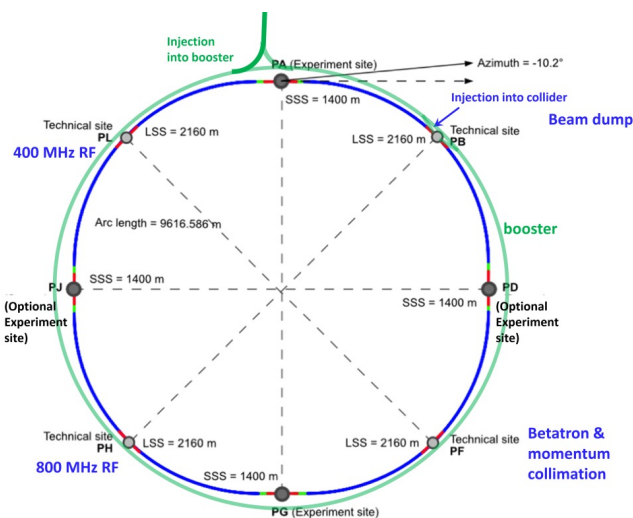
✓ 长径迹重建能力

✓ 低物质质量、高占空比

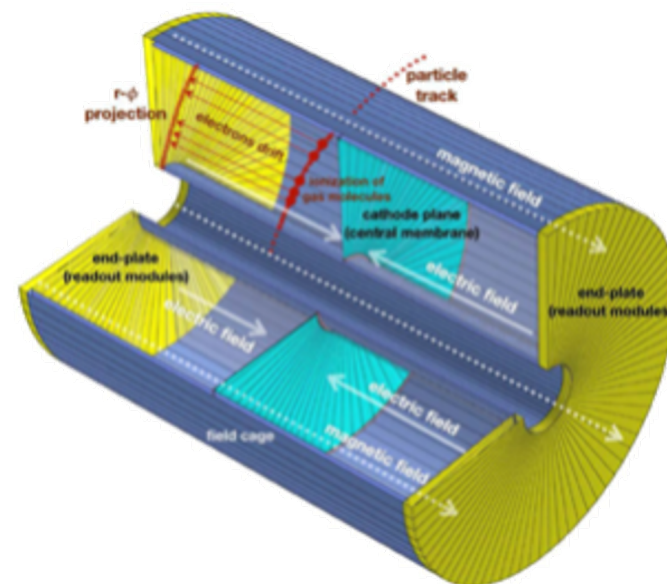
✓ 高位置分辨和动量分辨



Circular Electron Positron Collider CEPC



Future Circular Collider (FCC-ee)



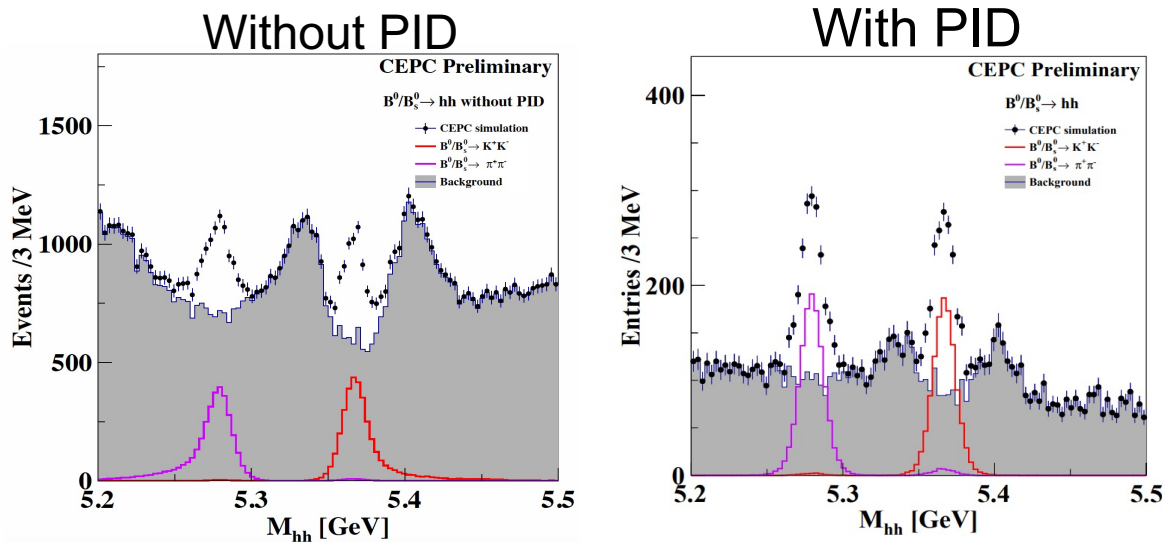
CEPC TPC

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 ($\sigma_{\text{point}} < 100 \text{ }\mu\text{m}$)
- 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
 - 味物理研究
 - jet 能量分辨

TPC在粒子鉴别能力的提升方面极具优势

用 Delphes 对 B^0/B_s^0 模拟



From Xu Gao

TPC 的物理需求

Parameter			
Geometrical parameters	r_{in}	r_{out}	z
	329 mm	1808 mm	$\pm 2350 \text{ mm}$
	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	$\simeq 1\text{--}2 \times 10^6/1000$ per endcap		
Pad pitch/ no.padrows	$\simeq 1 \times 6 \text{ mm}^2$ for 220 padrows		
σ_{point} in $r\phi$	$\simeq 60 \text{ }\mu\text{m}$ for zero drift, $< 100 \text{ }\mu\text{m}$ overall		
σ_{point} in rz	$\simeq 0.4\text{--}1.4 \text{ mm}$ (for zero – full drift)		
2-hit resolution in $r\phi$	$\simeq 2 \text{ mm}$		
2-hit resolution in rz	$\simeq 6 \text{ mm}$		
dE/dx resolution	$\simeq 5 \%$		
Momentum resolution at B=3.5 T	$\delta(1/p_t) \simeq 10^{-4}/\text{GeV/c}$ (TPC only)		

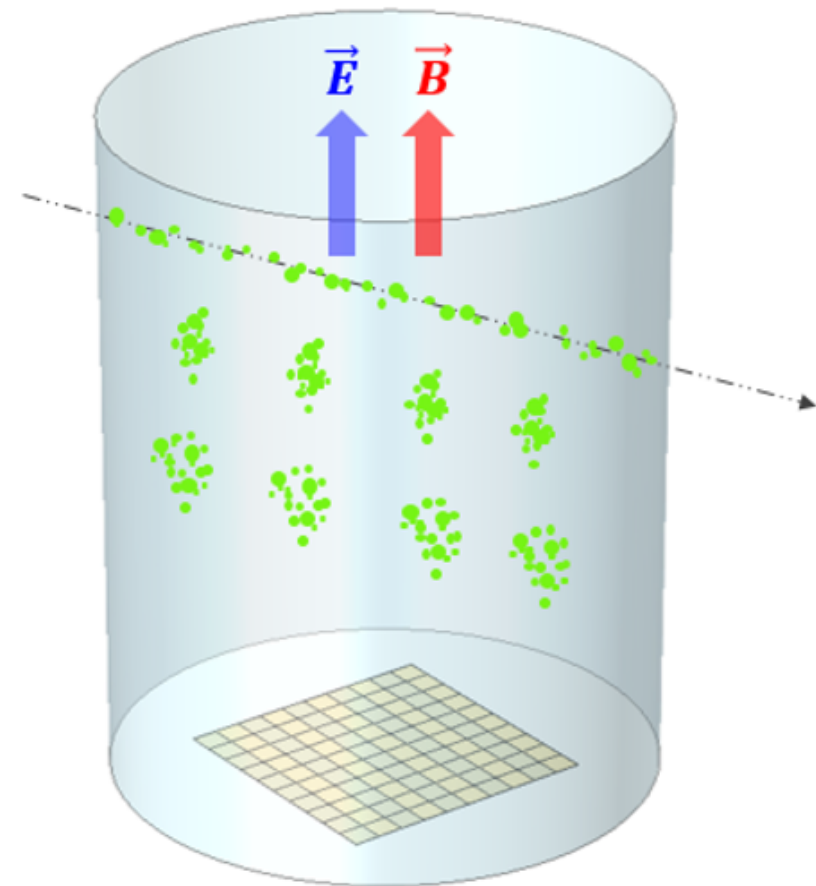
TPC的工作原理

• 时间投影室(TPC)是一类能测量带电粒子三维径迹的气体探测器

- 读出平面上电极的位置坐标+收集的电荷量 Q 重建得到径迹在 X , Y 方向的坐标
- 由漂移时间 T_{drift} 重建径迹在 Z 方向的坐标 $Z = v_{\text{drift}}T$

• 时间投影室(TPC)的优势

- 提供粒子径迹大量三维空间测量点(沿半径方向~220)
- 物质质量极低: $<1\%X_0$
- dE/dx 分辨: $<5\%$
- 位置分辨: $\sigma_{r\phi} \sim 100\mu m, \sigma_z \sim 500\mu m$
- 动量分辨: $\frac{\Delta p}{p} \sim 10^{-4} GeV^{-1}$ (TPC本身)
- 双径迹分辨能力: $\sim 2mm@r\phi$
- 探测效率: $>97\% @P_T > 1GeV$
- 读出方式: pad型, pixel型



TPC中的粒子鉴别研究

■ 经典的电荷求和(大尺寸Pad读出)

优势: 技术成熟

不足: 对大的波动敏感、

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)

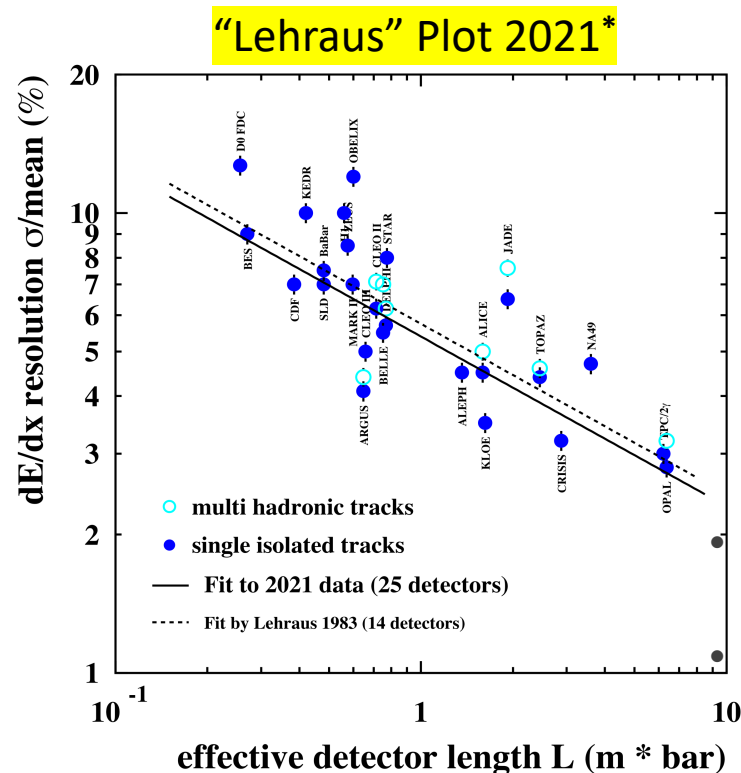
优势: 不受波动影响

$dN/dx + dE/dx$

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



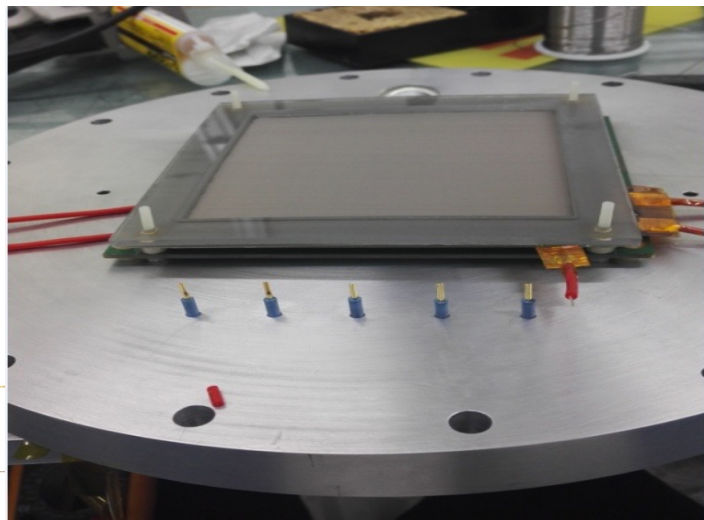
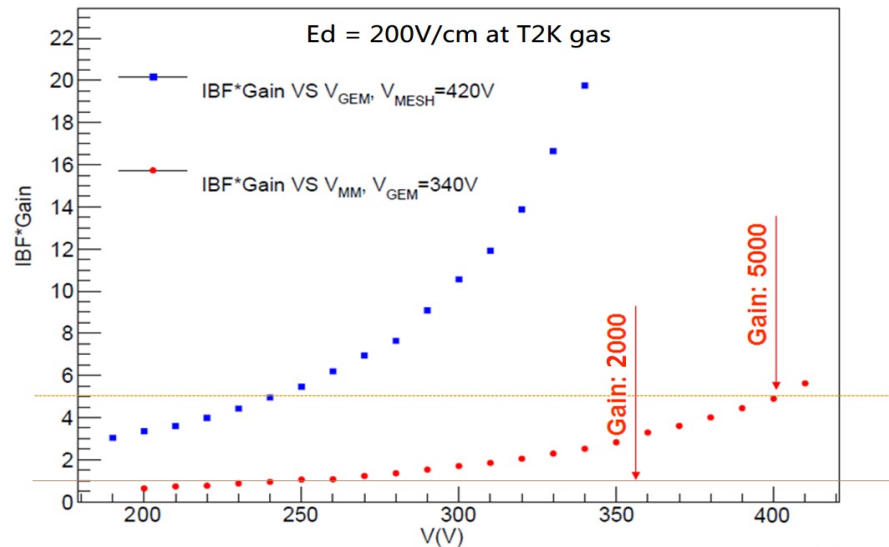
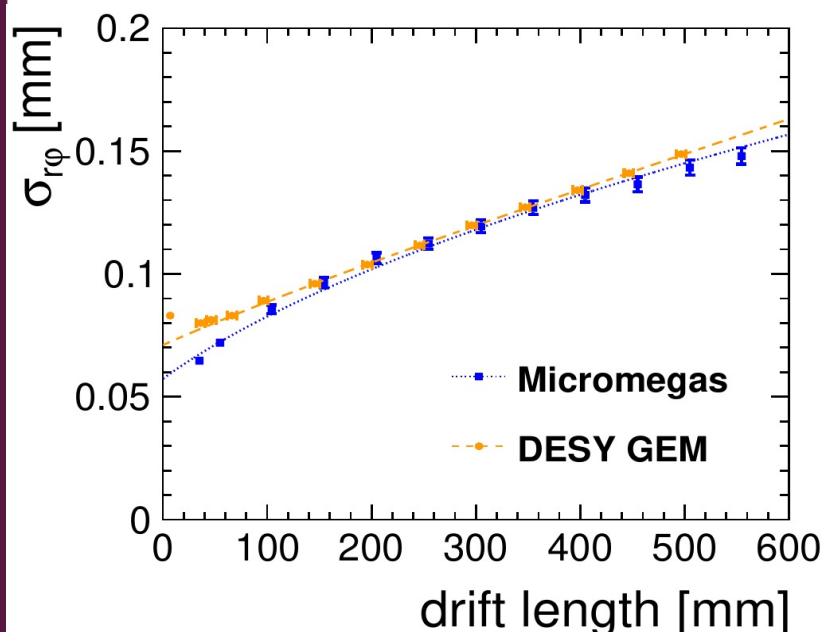
Fit by Lehraus 1983:
 $dE/dx \text{ res.} = 5.7 * L^{-0.37} (\%)$

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 $\text{IBF} \times \text{Gain} \sim 1$



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

- ✓ $dE/dx + dN/dx$ 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

关键



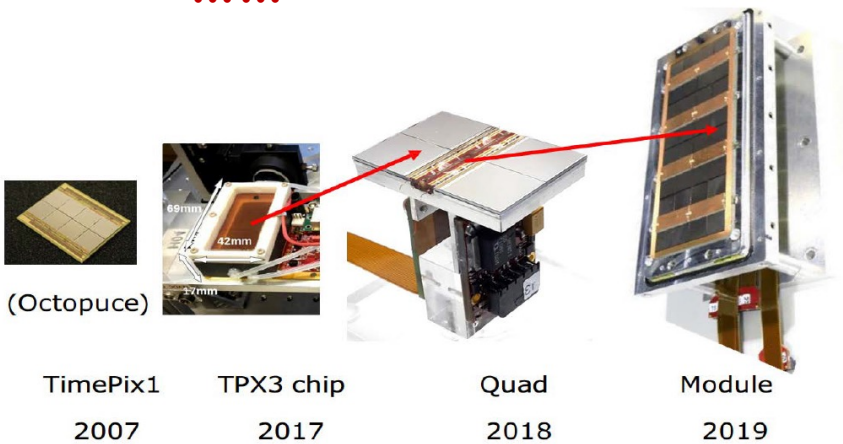
■ 像素型TPC性能优化研究

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

.....

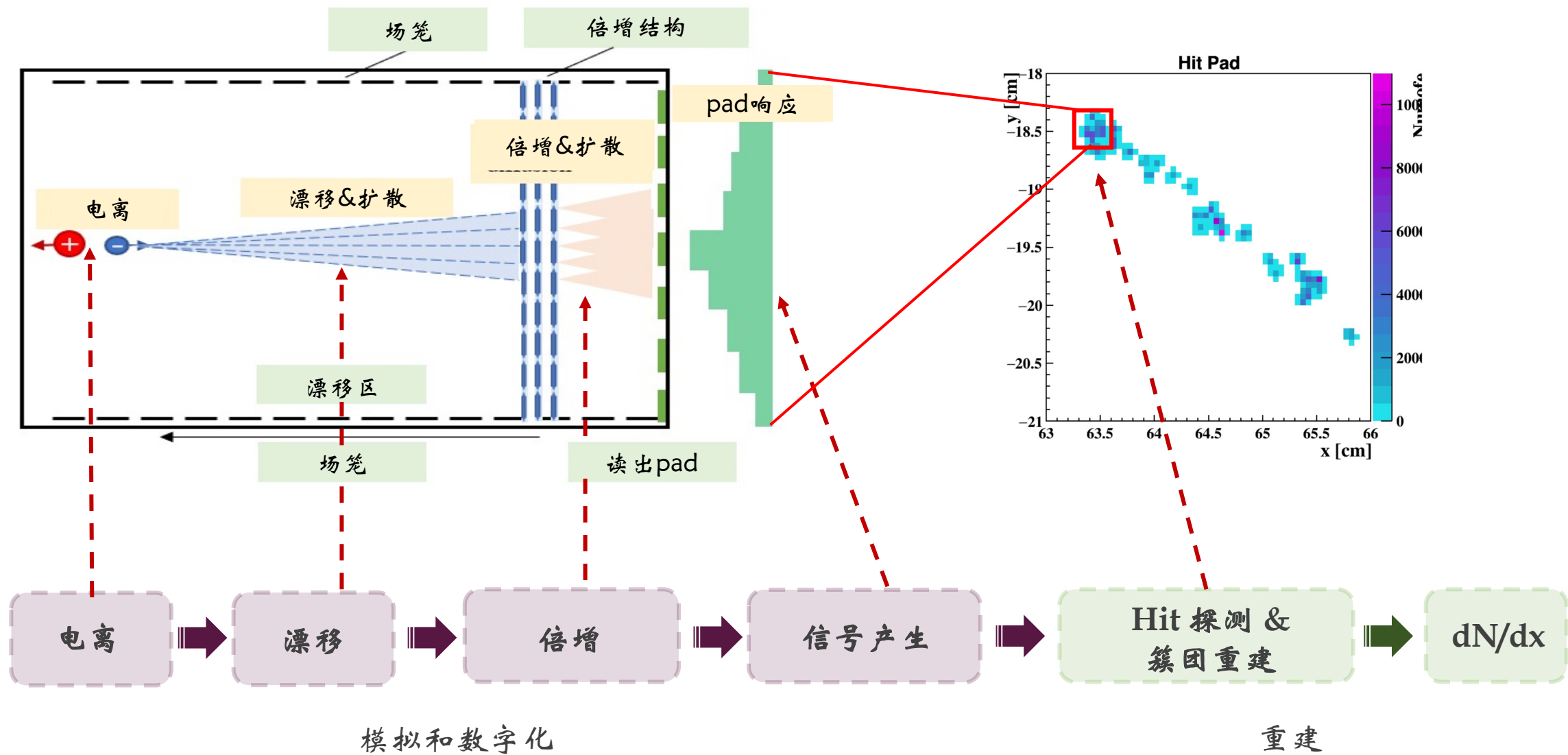
Pad型读出	Pixel 读出
读出面积 $2 \times 10 \text{ m}^2$	读出面积 $2 \times 10 \text{ m}^2$
微结构气体探测器读出	微结构气体探测器读出
单Pad尺寸 $1 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$	单pixel尺寸 $55 \mu\text{m} \times 55 \mu\text{m}$
10^6 个读出单元	10^9 个读出单元
84个读出模块	480个读出模块
快电子学读出	快电子学读出
CO ₂ 冷却	CO ₂ 冷却
	更好的计数率 $>900 \text{ kHits/s}$

CEPC-TPC两种读出方式比较



GridPixes

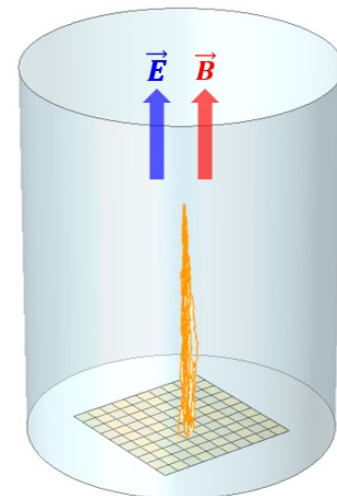
像素型TPC 模拟优化研究框架



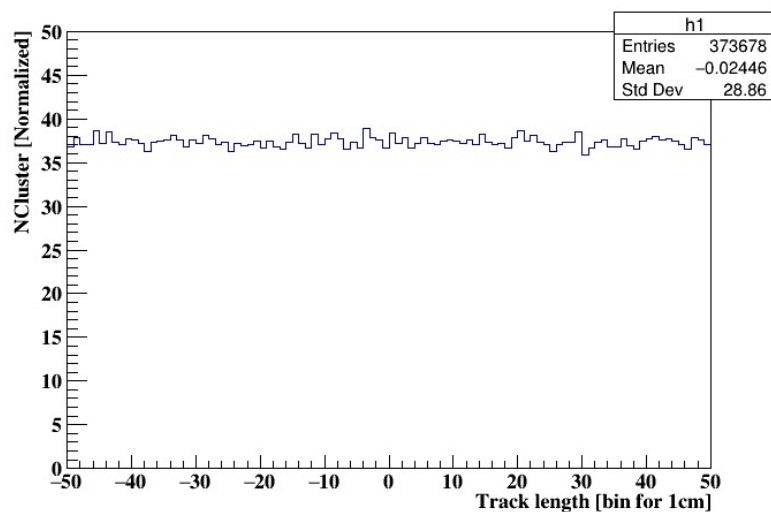
模拟研究一：原初电离簇团

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

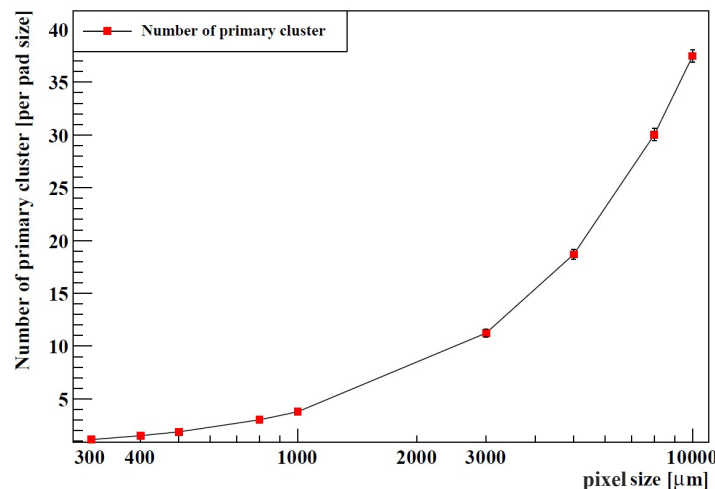
- 在Ar基气体中，典型的电离簇团~30 cluster/cm @ 1bar ,T2K :37.4cluster/cm
- ~1.9 clusters/ 500 μm , ~1.2 clusters/ 300 μm
- 初步结论：像素尺寸在300 μm ~ 500 μm , 即可实现对每个电离簇团的计数



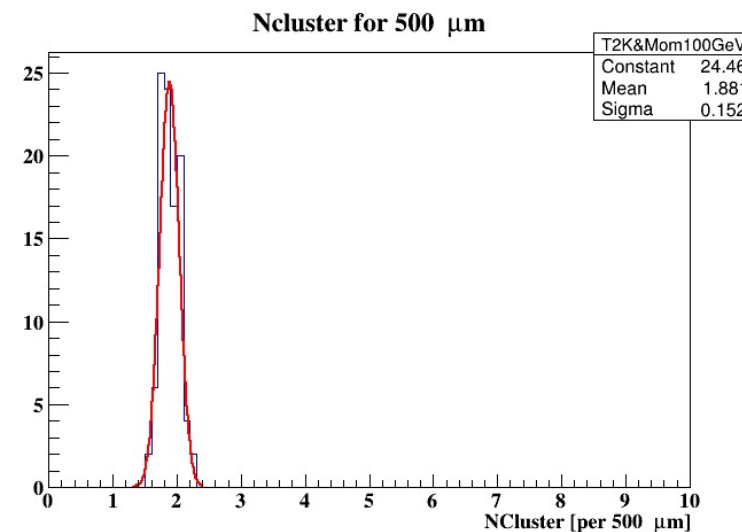
TPC探测器建模简图



Cluster沿径迹分布的情况



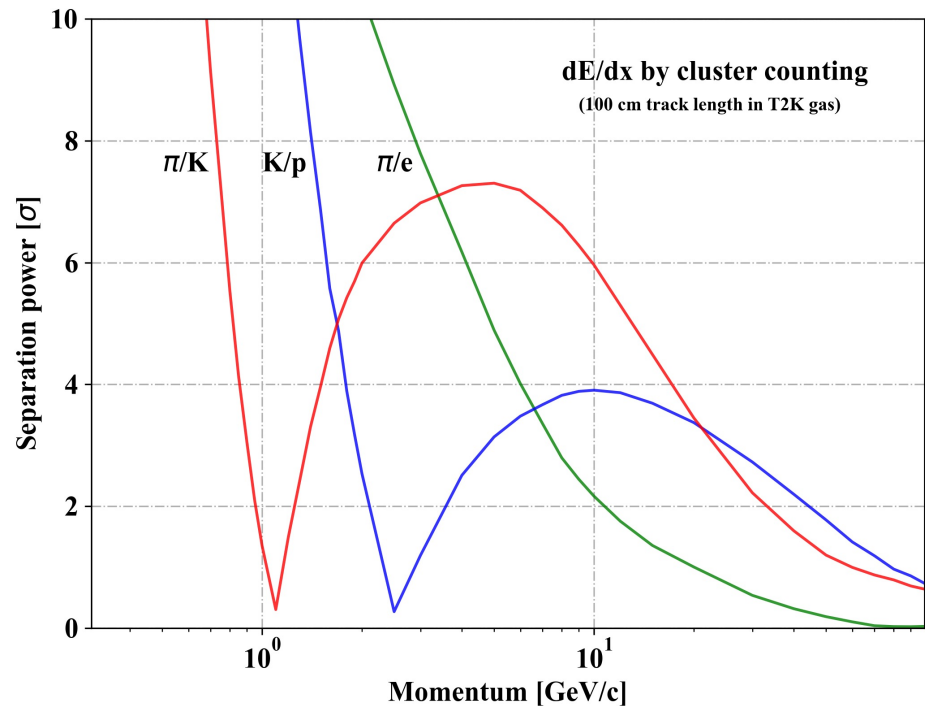
Cluster数与像素尺寸的关系



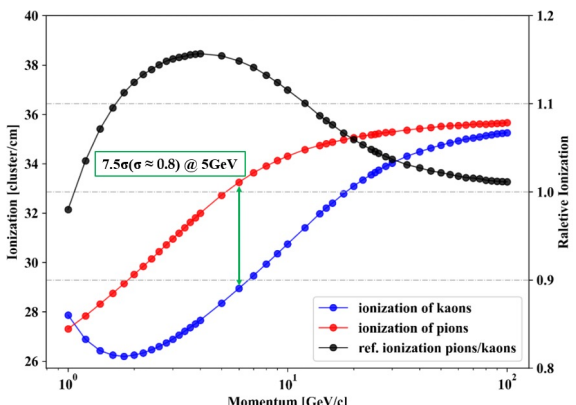
Pad size = 500 um Ncluster/cm

模拟研究二：粒子鉴别潜力

- 定义粒子鉴别能力(Sp)参数
$$Sp = \frac{|\mu_A - \mu_B|}{\sqrt{\frac{\sigma_A^2 + \sigma_B^2}{2}}}$$
- 模拟了π/k/p不同动量下的粒子分辨能力

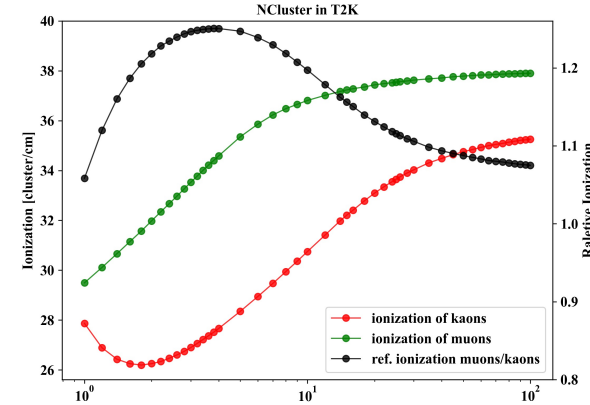


簇团计数的粒子分辨能力

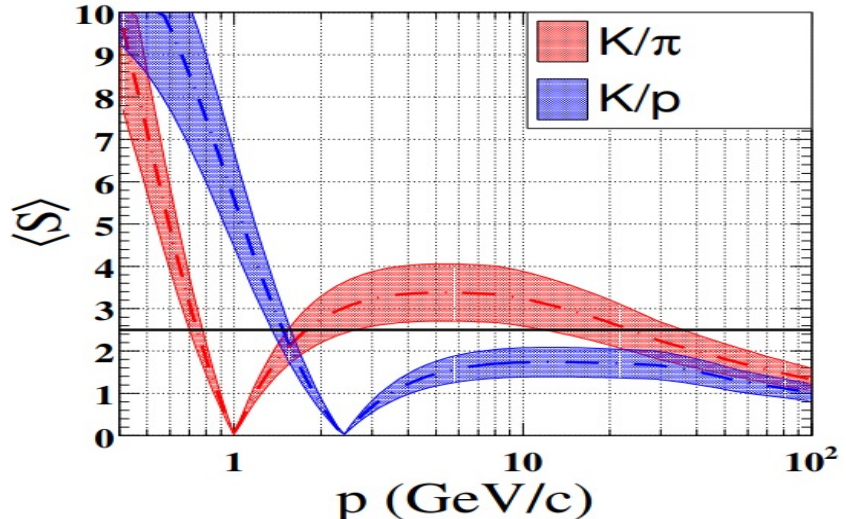


π/k原初电离簇团的分辨能力

EPJ C 78, 464 (2018)



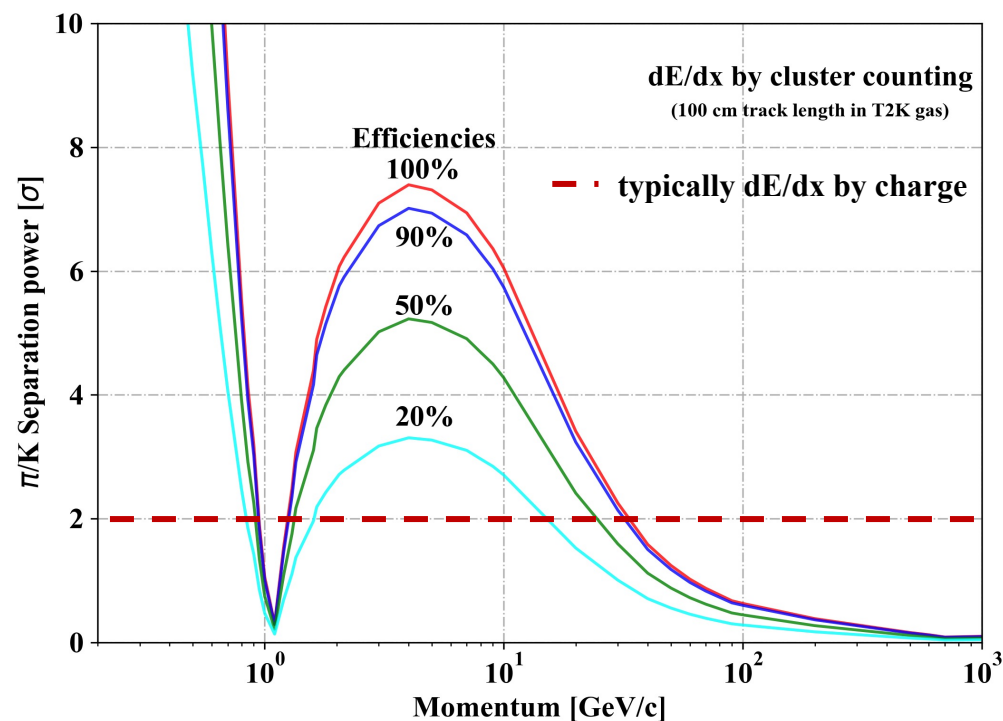
μ/k原初电离簇团的分辨能力



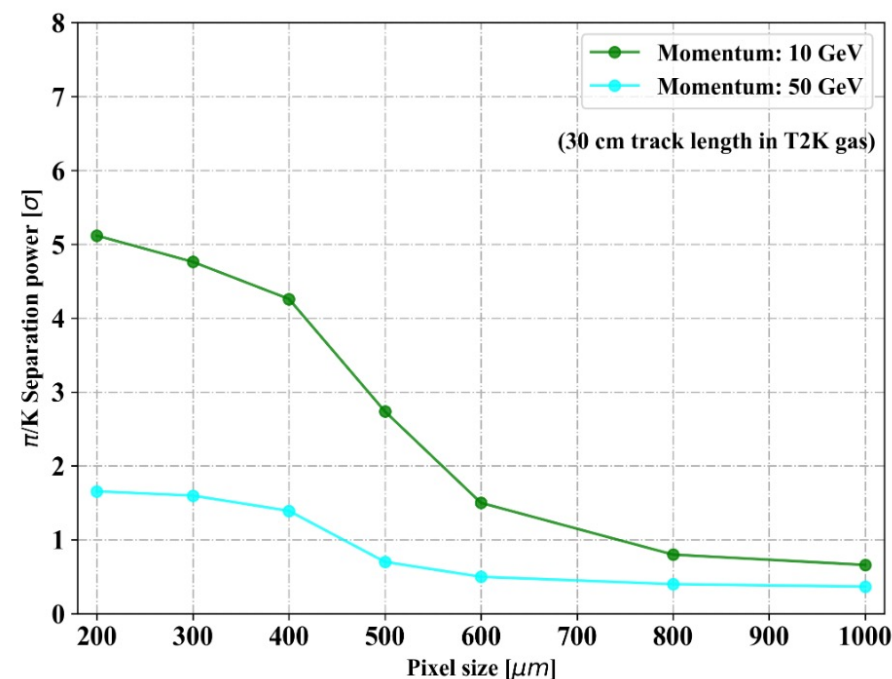
电荷求和的粒子分辨能力

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 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



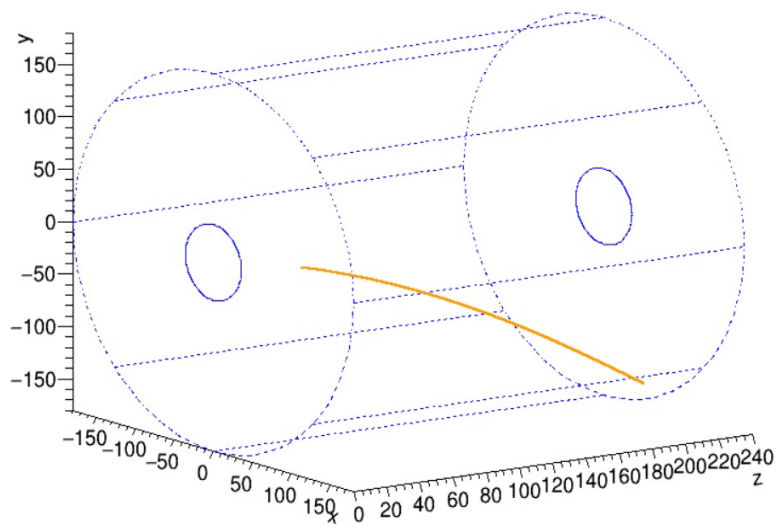
不同探测效率下 π/k 的粒子分辨能力



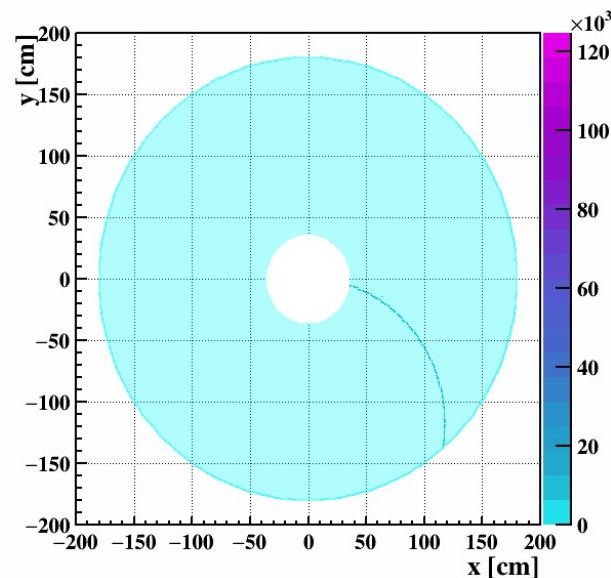
基于Hit 击中数的 π/k 的粒子分辨能力与像素尺寸的关系初步研究结果

模拟研究四：径迹重建

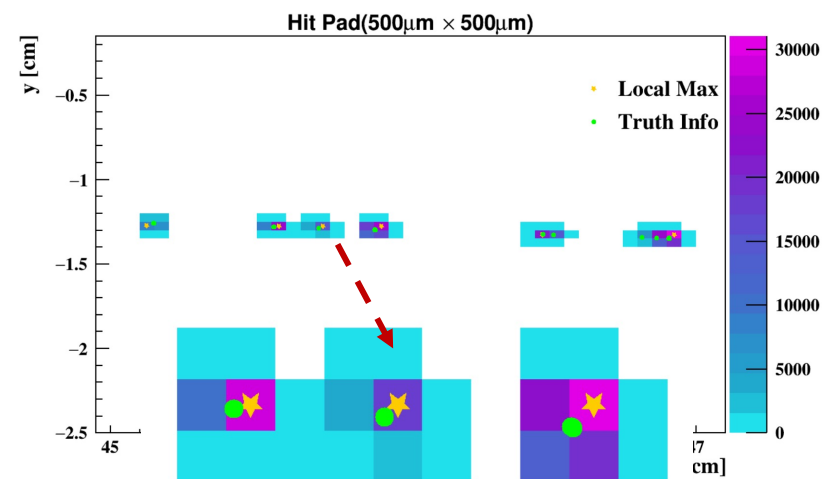
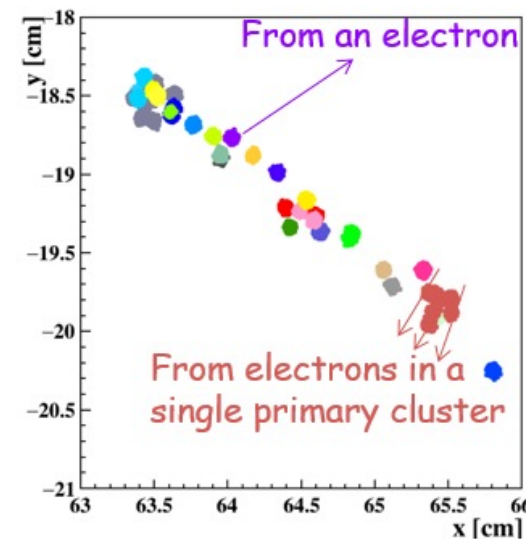
- 在TPC内部任意方向产生一条径迹
- 模拟参数与 Half-CEPC-TPC 一致
- pixel size = 500 μm , 得到每个簇团在端盖处的分布
- 下一步工作: cluster 重建与物理分析优化研究正在进行



TPC 内的一条径迹显示 [1 GeV/c]



径迹在端盖处的投影



重建算法的初步研究结果

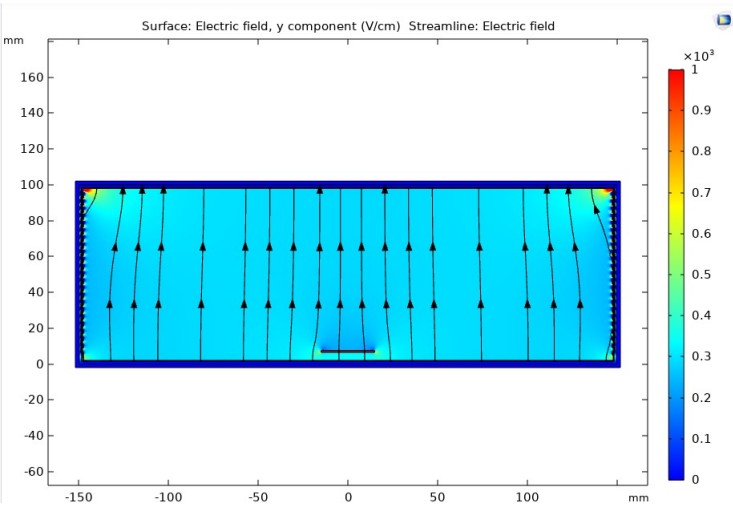
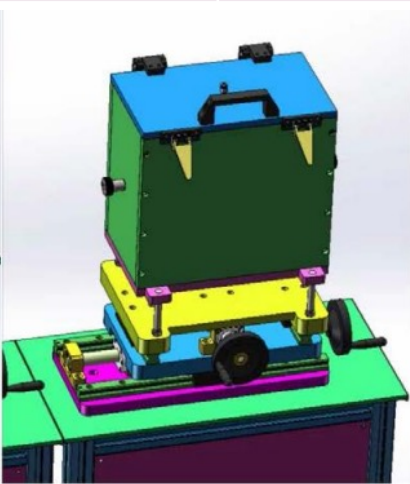
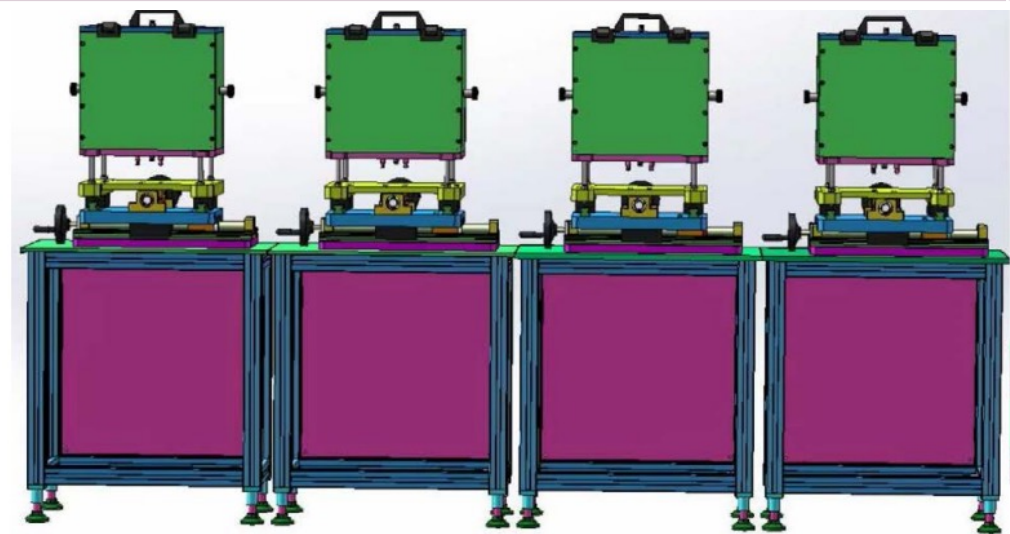
大部分的簇团都是可以分开的

仍需继续优化.....

实验研究进展

■ 与清华大学的合作，对像素型TPC的实验研究

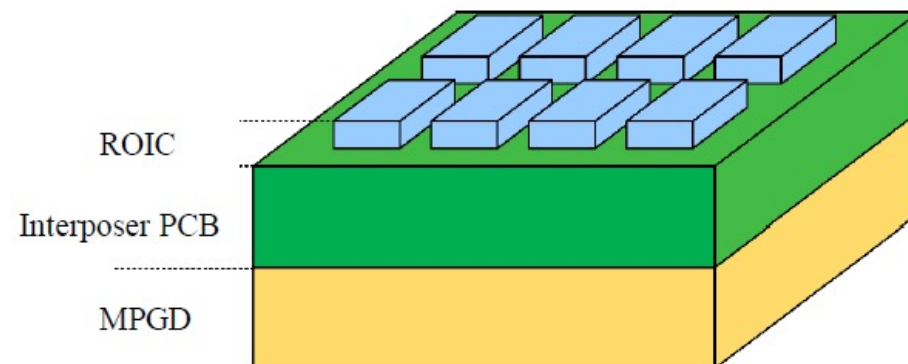
Micromegas Bonding pixel单元，实现像素型技术	模块尺寸	R&D
• $\geq 300\text{ }\mu\text{m} \times 300\text{ }\mu\text{m}$ • 由清华大学邓智老师团队开发读出芯片 • 由高能所研发 Micromegas 探测器模块 • 搭建一台像素型TPC 原型机	1-2 cm ²	• 像素型读出技术的研发和实现 • 实现cluster研究和像素尺寸的优化 • 利用dN/dx + dE/dx 进行PID性能研究
	100 cm ²	• 利用UV laser径迹实现TPC畸变研究 • 基于UV laser的实现TPC性能的监测 • 利用dN/dx + dE/dx 进行长径迹PID性能研究



实验研究进展

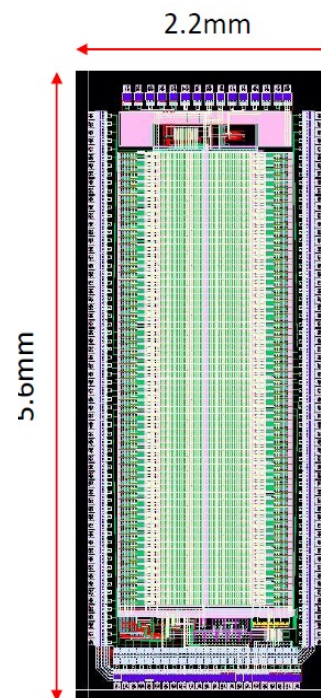
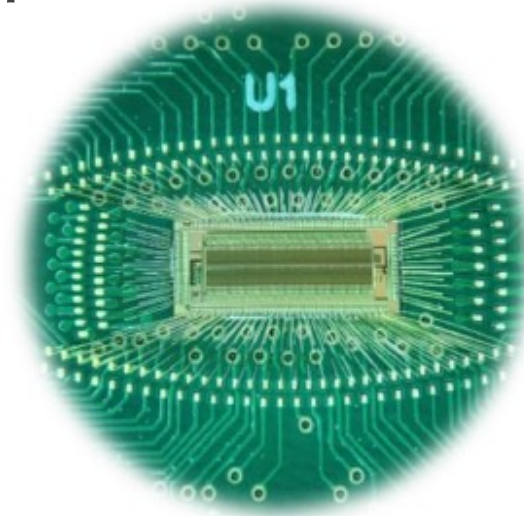
■ 像素型TPC读出芯片研发进展

- ✓ 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/cm²)
- ✓ 放大增益: > 40mV/fC
- ✓ 功耗: ~400mW/cm²(最初版测试结果)
- ✓ 100mW/cm² (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
- 像素型TPC实验研究及芯片开发正在进行中

THANKS !

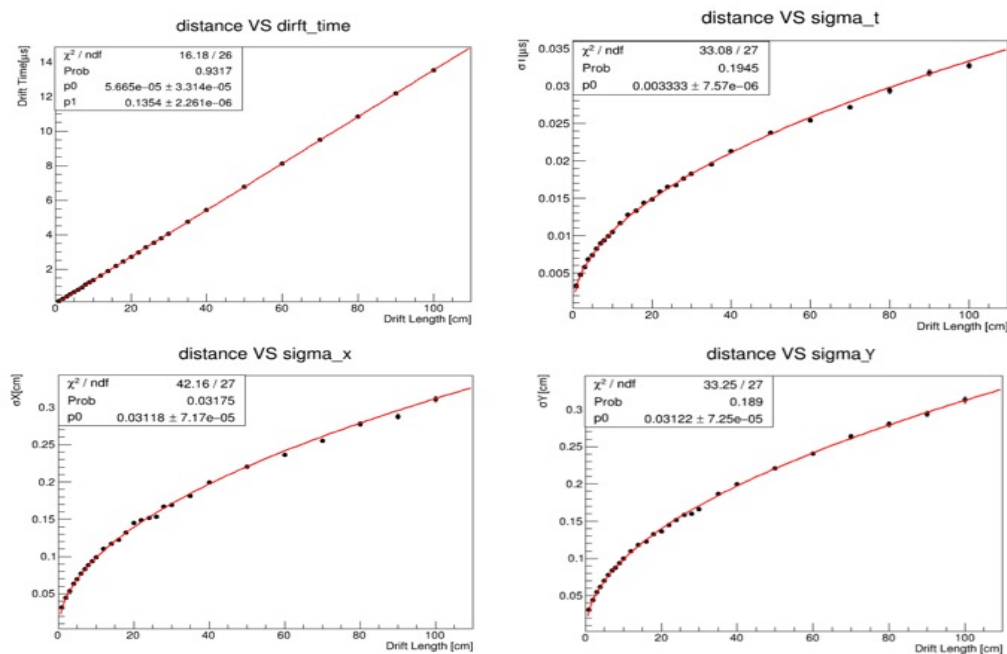
BACK UP

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 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

