

超级陶粲工厂桶部粒子鉴别探测器预研 STCF-RICH研究进展

张慧斌
代表RICH工作组

2024年超级陶粲装置研讨会

2024年7月9日



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

STCF-RCH成员与分工

陈石^{1, b}, 陈时平^{1, b}, 黄清源^{1, a}, 黄文谦^{1, ab}, 李嘉铭^{2, c}, 梁焜玉^{2, ab}, 刘建北^{2, ab}, 刘倩^{1, ab}, 邵明^{2, ab}, 汪安琪^{2, ab}, 王滨龙^{1, a}, 杨子昱^{2, c}, 张慧斌^{1, ab}, 张志永^{2, ab}, 赵雷^{2, c}

¹中国科学院大学

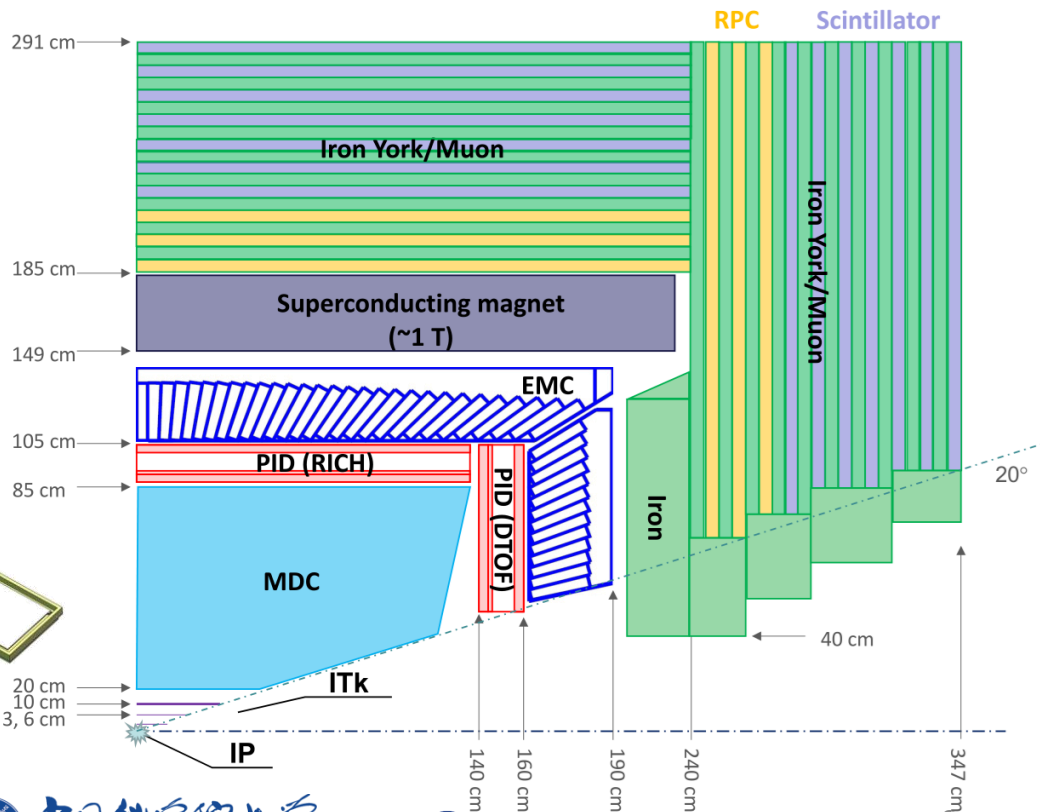
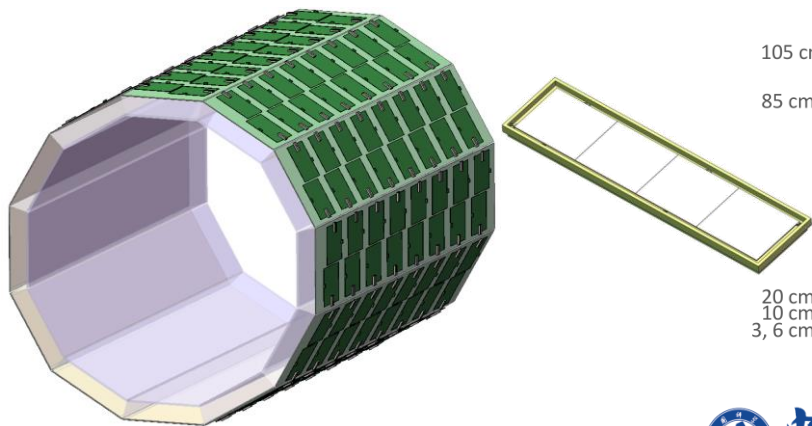
²中国科学技术大学

^a模拟重建 ^b探测器 ^c电子学



STCF-PIDB设计与指标需求

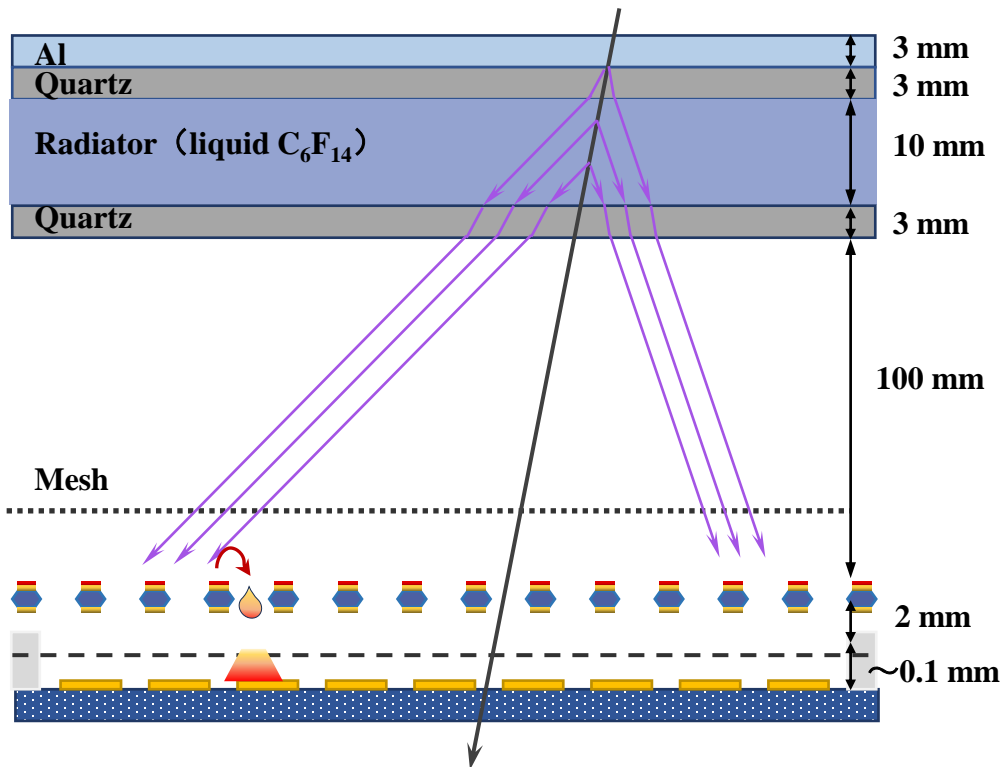
- 覆盖面积: 13 m^2
- 单个模块: $0.45 \text{ m} \times 2.4 \text{ m}$
- 整体厚度: $< 200 \text{ mm}$
- π/K 分辨: 好于 $3\sigma @ 2 \text{ GeV}$
- 材料物质量: $< 0.5 \chi_0$
- 累积电荷量: $< 2 \mu\text{C}/\text{cm}^2 @ 10 \text{ year}$



RICH方案与指标

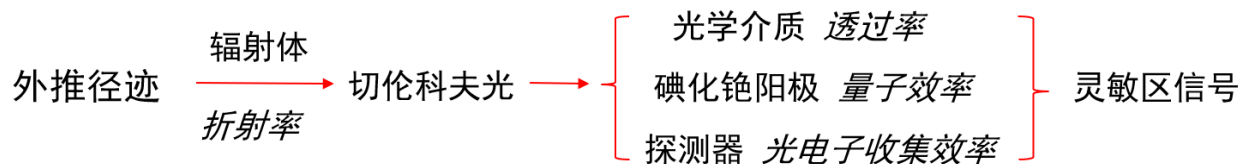
- $3\sigma \pi/K @ 2\text{GeV}: C_6F_{14}, n \sim 1.3$
- 扩展区: $\sim 100\text{mm}$
- 读出像素: $5 \times 5\text{mm}^2$
- MPGD: 高增益 $\sim 10^5$, 低IBF $\sim 10^{-3}$
- 材料物质量: $\sim 17\%$
- 切伦科夫角分辨: $< 1.5 \text{ mrad}$

	thickness [mm]	X/X_0
Top ceramic plate	3	0.03
Quartz window	3	0.03
Radiator C_6F_{14}	10	0.05
THGEM+Micromegas	0.4	0.01
Anode+FEE	8	0.02
Aluminum plate	5	0.05
FEE cooling	5	0.05
Total		0.24

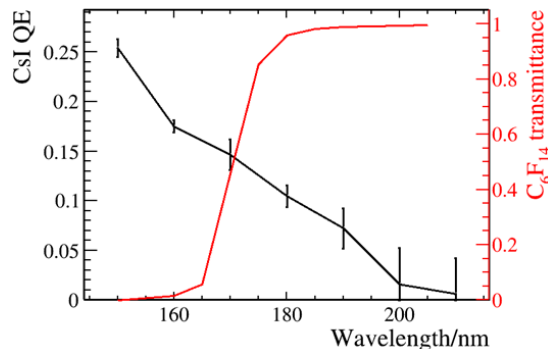
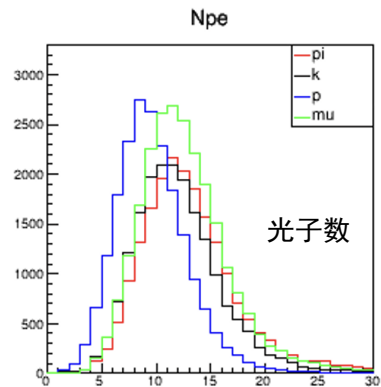


RICH探测器性能模拟

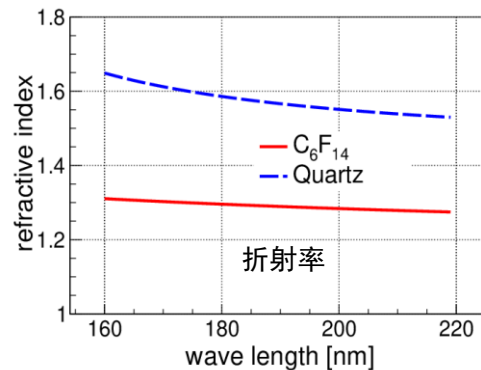
- 在Geant4 中几何建模并设置参数



- 得到平均光子数~10

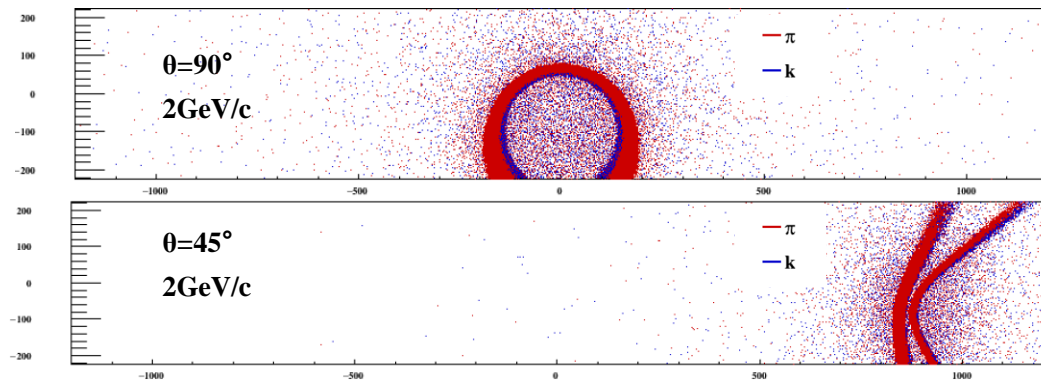
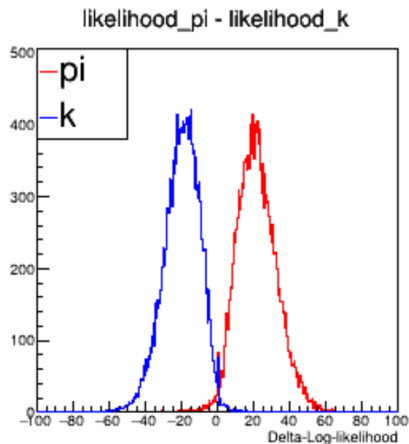
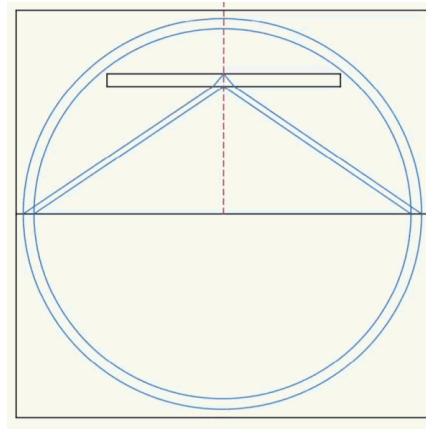


光阴极QE与辐射体透过率



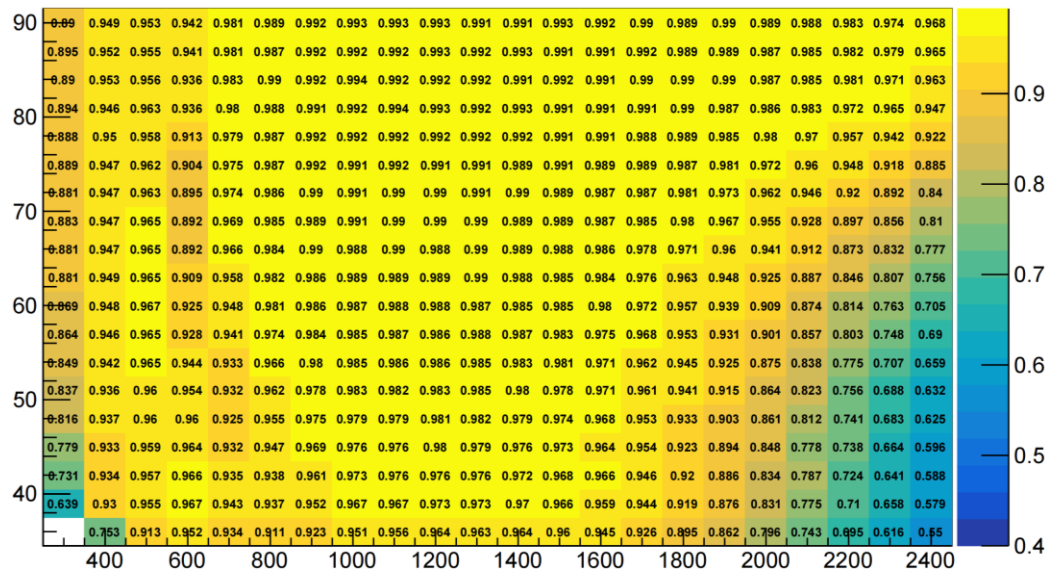
粒子鉴别算法（极大似然法）

- 基于外推径迹动量/坐标计算不同粒子假设下的光子击中位置pdf
- 根据pdf构造似然函数，并计算实际击中位置的似然函数值
- 比较不同假设下的似然函数值，进而鉴别粒子种类



鉴别能力预期

- 在OSCAR框架下全模拟
 - 使用实时pdf算法，考虑了内层探测器的物质效应
 - 扫描不同动量/角度的 π/K ，模拟单径迹入射情况
 - $\rightarrow P \in (0.2 \text{ GeV}/c, 2.4 \text{ GeV}/c)$
 - $\rightarrow \theta \in (36^\circ, 90^\circ)$, ϕ 随机抽样 $0^\circ \sim 360^\circ$

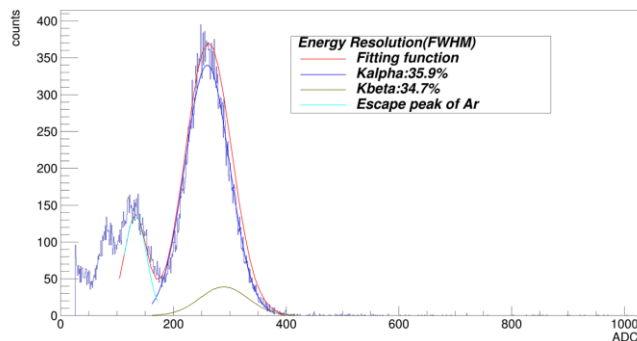
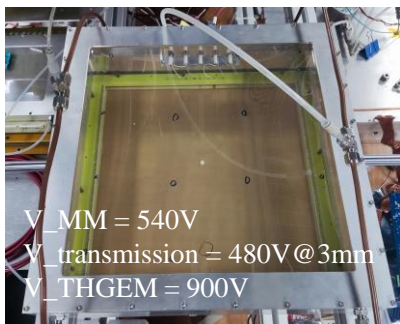
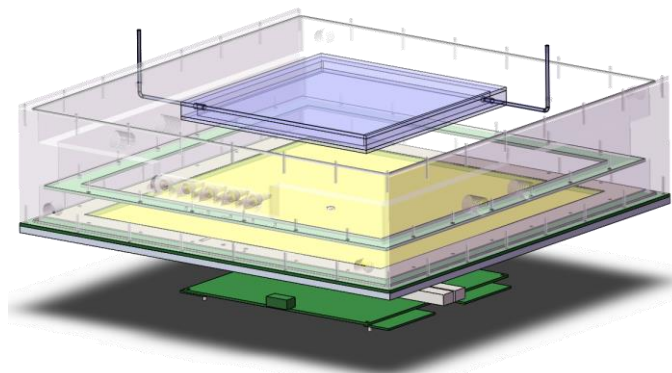


π 的PID效率
固定2%误鉴别率

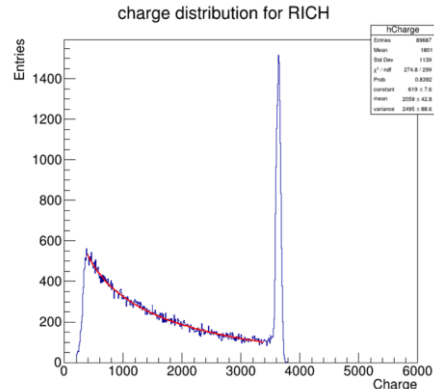


RICH工程样机制作与测试

- 探测面积 $320\text{mm} \times 320\text{mm}$
- 完成 Fe^{55} 源测试
 - 增益可达 10^5 ，满足单光子探测需求
- 完成烛光实验尝试单光子探测



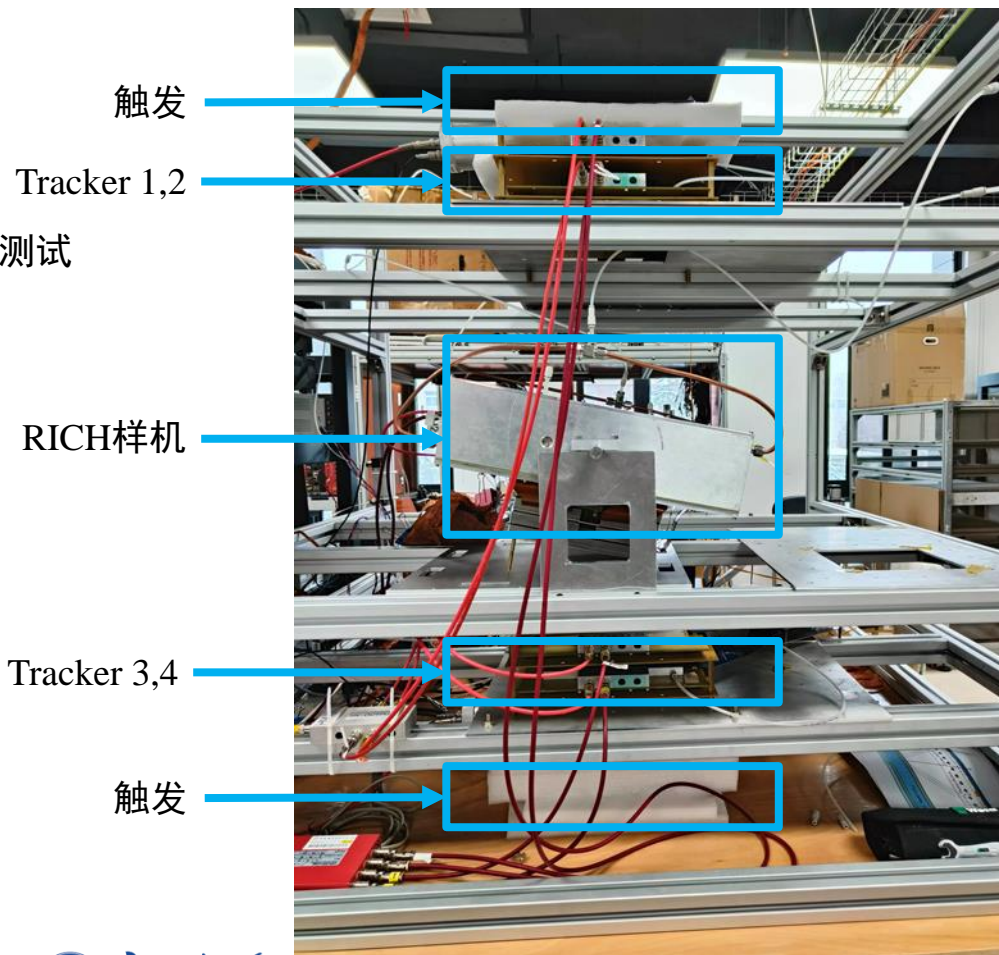
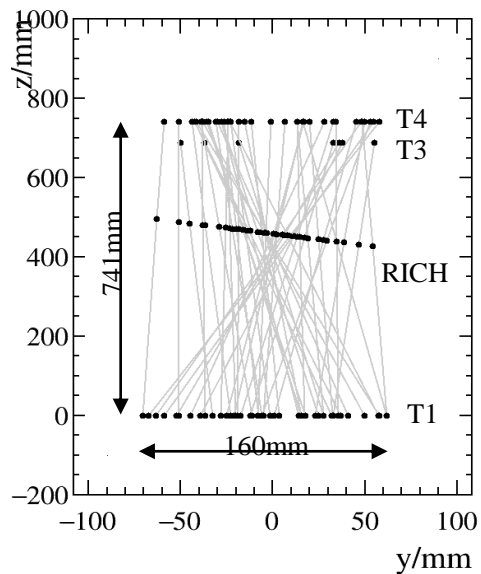
Fe^{55} 源能谱



单光电子能谱

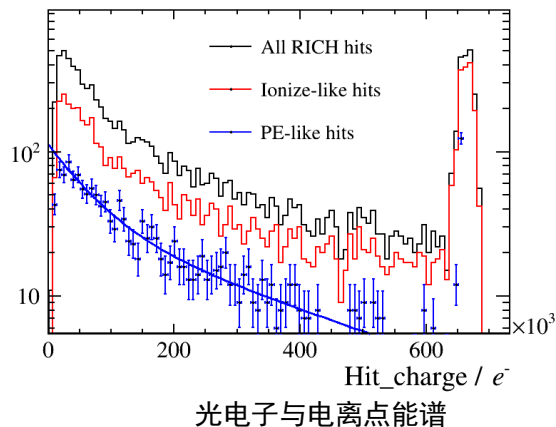
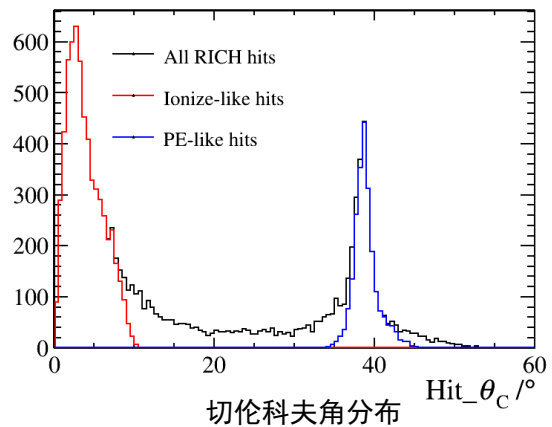
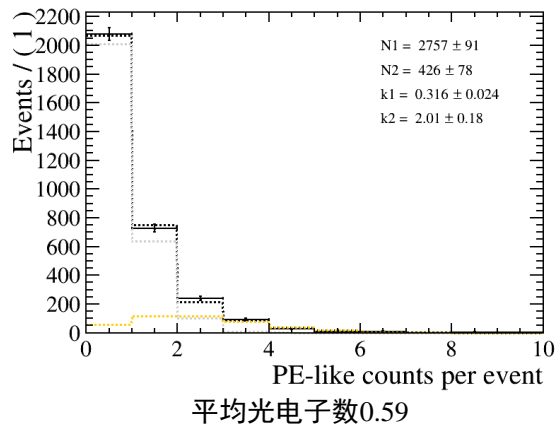
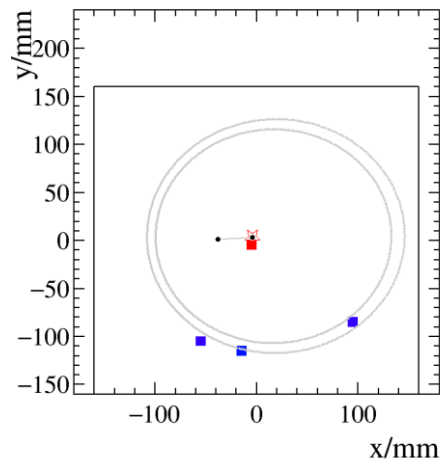
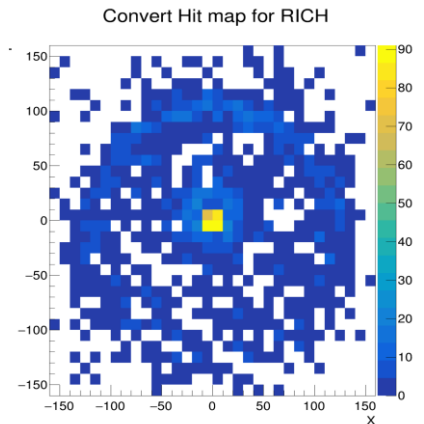
宇宙线测试

- 密闭 C_6F_{14} 作为辐射体，进行宇宙线测试



宇宙线实验测试结果

- 有效事例数3711
- 类电离点：距离预期电离位置 $< 18\text{mm}$
- 类光子点：距离预期光子位置 $< 25\text{mm}$



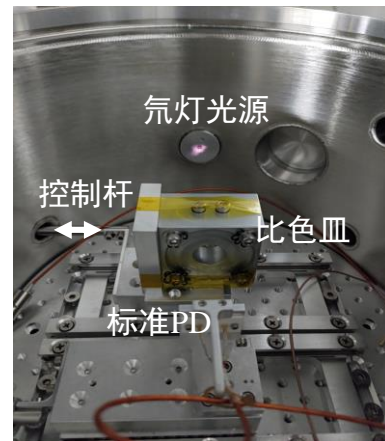
实验与模拟差异分析

	模拟值 (@180nm)	实验值 (@180nm)	相对比例	
辐射体透过率	95% (1cm)	11.2% (1cm)	11.8%	需要检查劣化原因；换SiO ₂
石英玻璃透过率	87.6% (4mm)	92.2% (4mm)	105.3%	
CsI QE*	10.5%	6 $_{-3}^{+2.5}$ %	57%	在手套箱中安装可以减少 ₋₃ %成分
光电子进孔效率*	78% (使用丝室效率)	65% × 50%(?)	(41.7%)	紫外激光实验验证
电子学测量阈值	90%	62%	68.9%	改进估计模型
总效率			2.0%	
产额	9.7	0.59	5.2%	

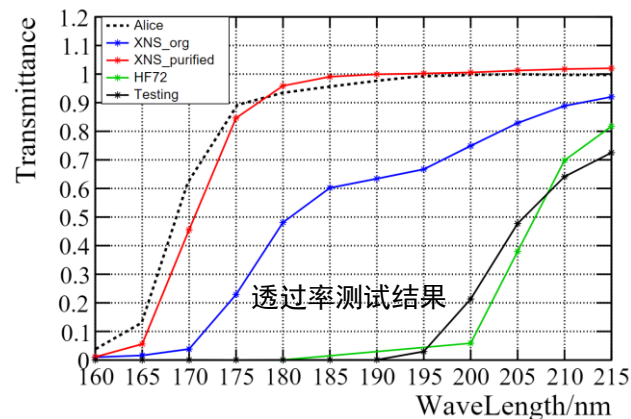


辐射体 (C_6F_{14}) 准备与纯化

- 探测器灵敏区间为180nm左右真空紫外光，易被各种物质吸收
- C_6F_{14} 易于溶解水和氧气→需要进行纯化
- 开发使用金属触媒进行纯化，效果优秀
- 化工厂家从未关注这一透过率参数，因而该参数控制不稳定
- 气质分析发现即使纯度超过99%的样品也不一定合格
- 与厂家持续沟通，共同研究主要影响成分与工艺



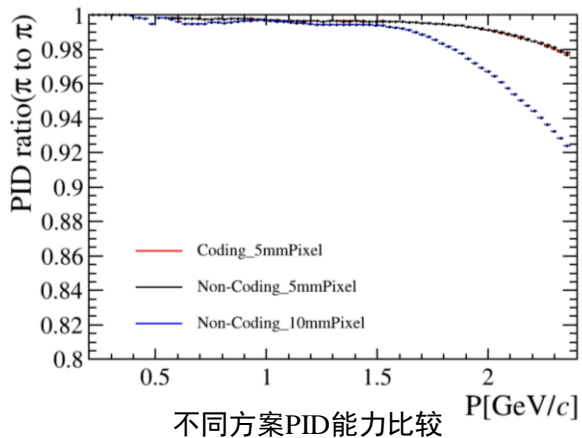
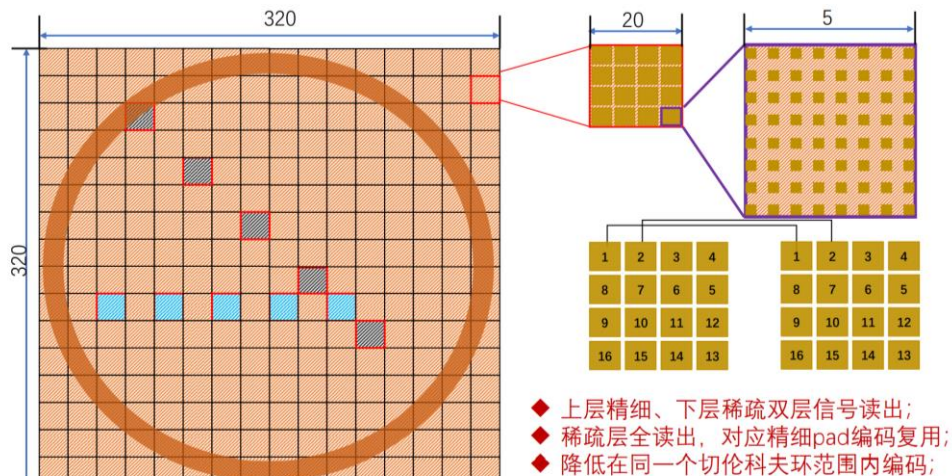
透过率测试系统



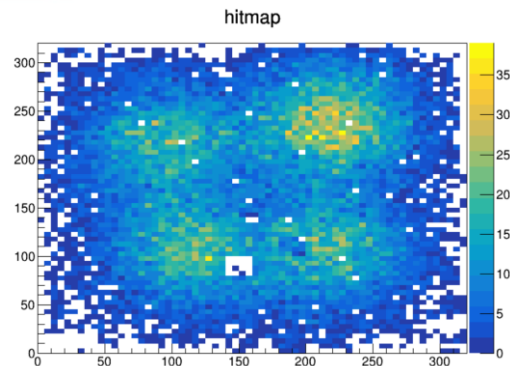
纯化系统

编码读出方案

- 目前编码复用的方案可以将读出路数减至1/4
- 同时模拟结果显示PID能力与非编码方式相当，优于同读出路数的大像素方案
- 实验验证了解码算法可稳定工作



编码读出板

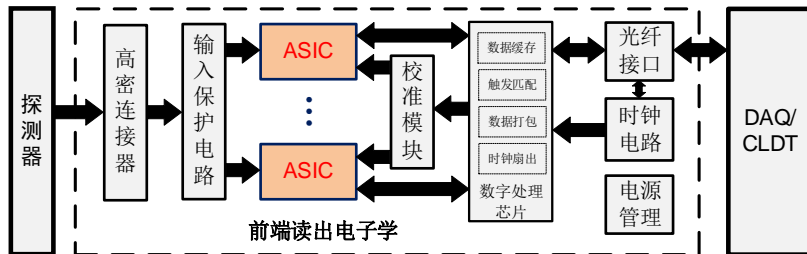


解码结果

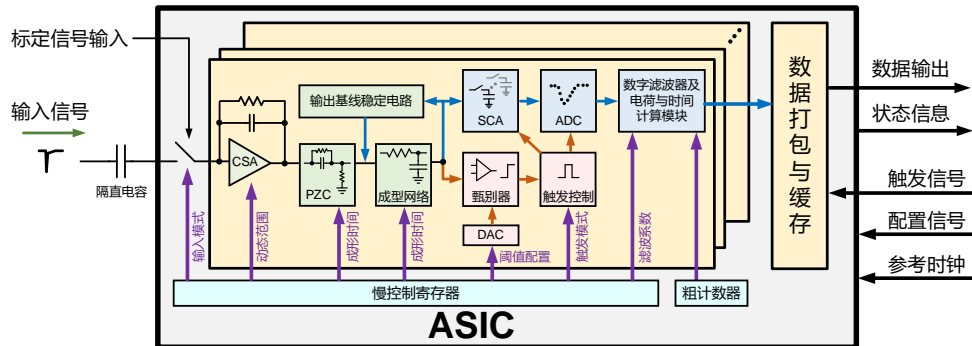


PIDB 电子学的研究目标

- 海量读出通道数且电子学直接安装在探测器背部的有限空间，需要高集成度、多通道的读出ASIC芯片。
- 需要进行高精度的电荷与时间测量，支持全波形数字化输出。
- 单通道极限计数率为16 kHz。

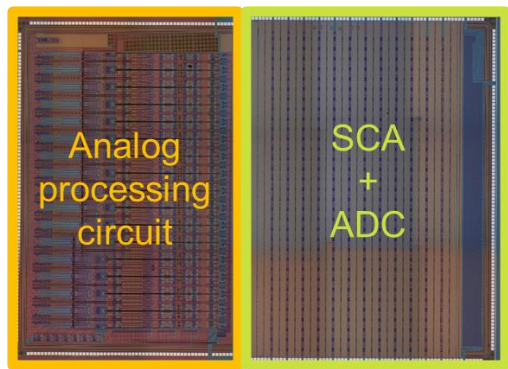


读出电子学指标	需求
电荷测量范围	48 fC
电荷测量噪声(ENC)	0.5 fC @ 16 fC @ 20 pF
时间测量精度	≤ 1 ns @ 16 fC @ 20 pF
总读出通道数（非编码）	518,400
单通道平均事例率	~ 1.6 kHz

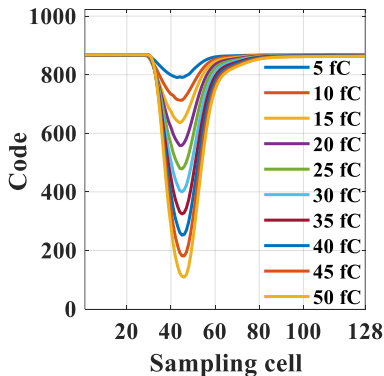


PIDB 芯片设计进展

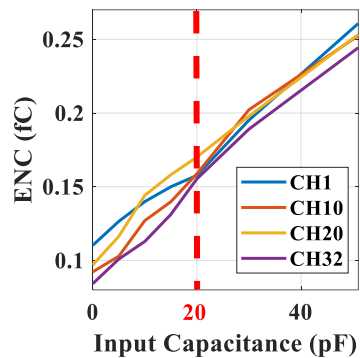
- 原理验证版本芯片设计完成并流片封装后，展开了系列性能测试，测试结果表明其关键性能指标满足设计需求。



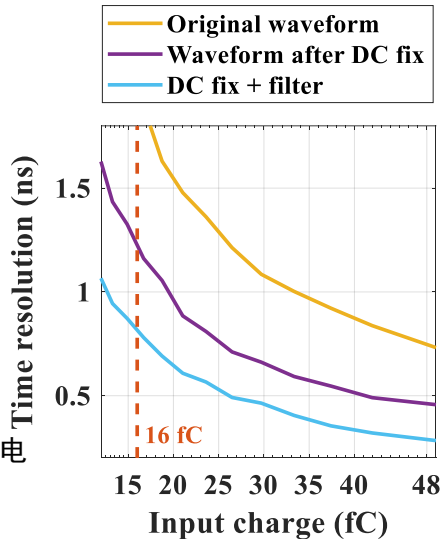
原理验证版本芯片显微照片



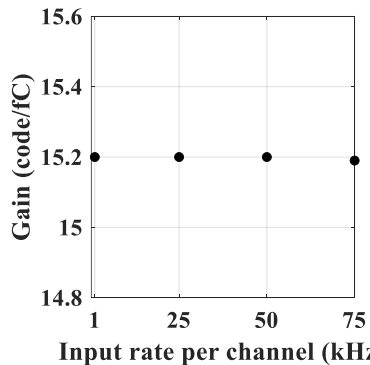
不同输入电荷量下的输出波形



等效输入电荷噪声(ENC)随输入电容的变化关系



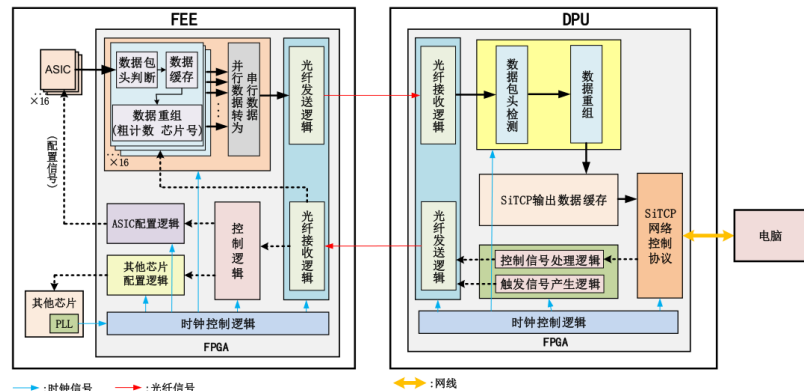
时间精度随输入电荷量的变化关系
@ 20 pF



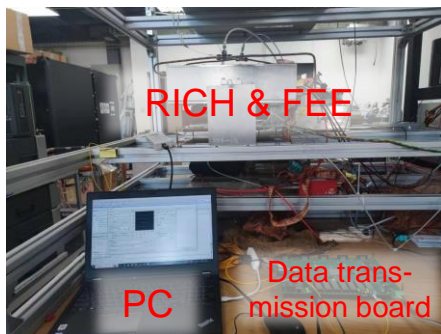
增益随单通道计数率的变化关系

基于PIDB 芯片设计的FEE

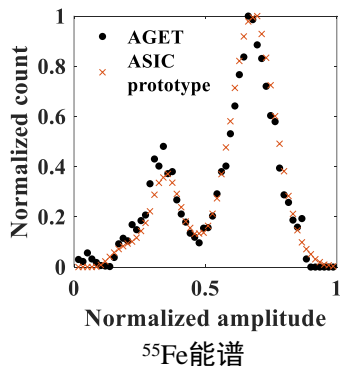
- 基于该原理验证芯片，完成了512通道原理验证前端读出电子学的设计。
- 基于该原理验证前端读出电子学完成了 ^{55}Fe 的能谱测试。



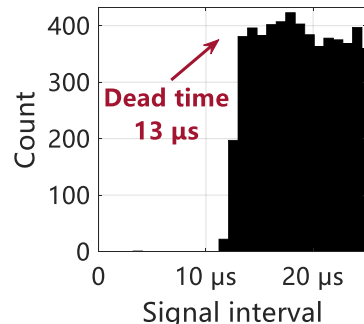
用于原理验证前端读出电子学测试的电路框图



与探测器联调现场照片



^{55}Fe 能谱



探测器联调时最小可测信号间隔



原理验证前端读出电子学照片

总结与展望

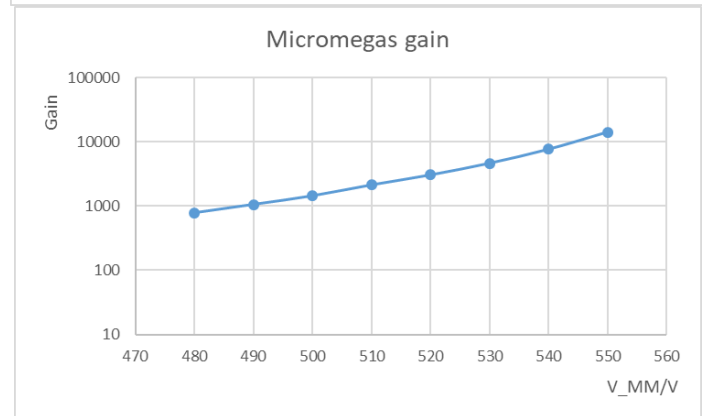
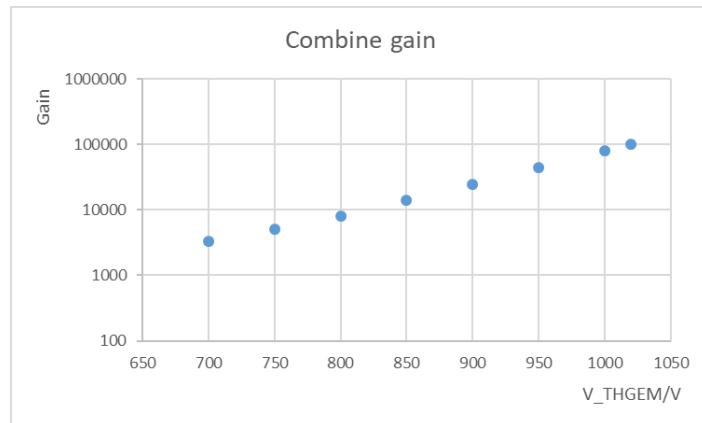
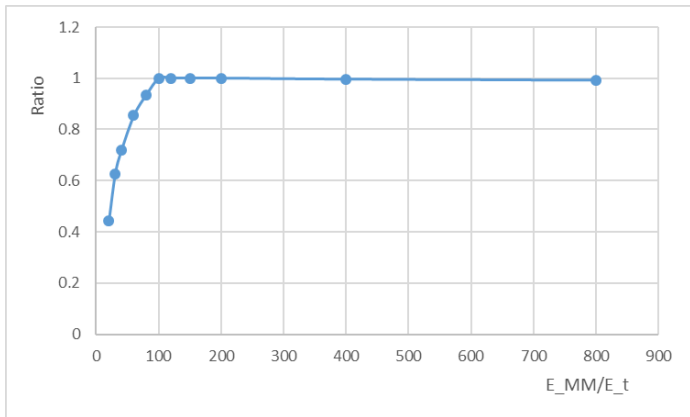
- 进行了 C_6F_{14} 辐射体的宇宙线实验
 - 测得光子数不及预期
- 读出电子学完成了设计与初步验证
- 高透过率辐射体的稳定货源、大面积高QE的CsI镀膜等问题仍待攻克
- 光电子进孔效率测量实验正在筹备中

谢谢!



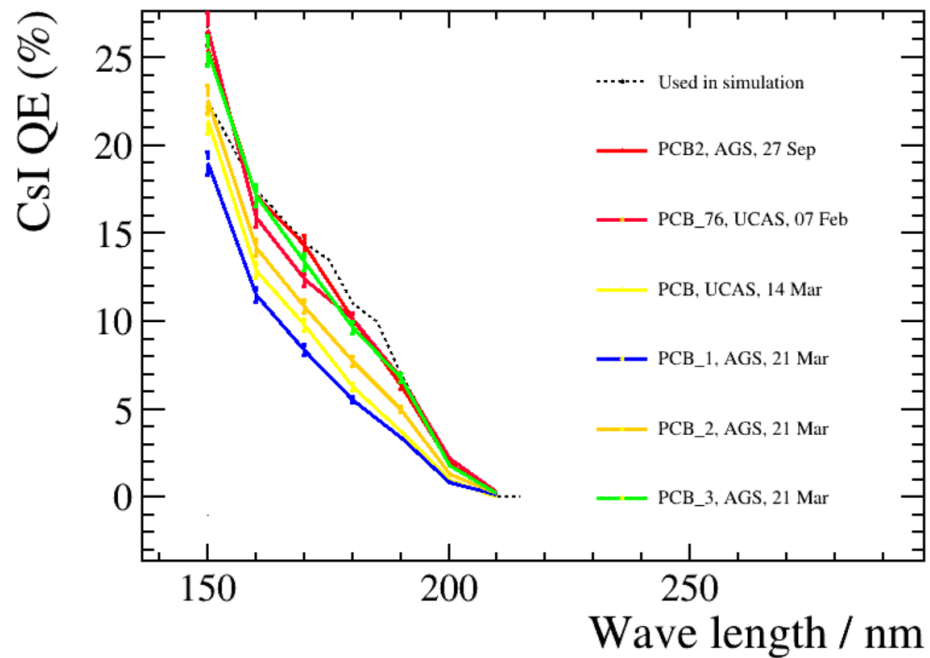
Backup

- 样机测试结果



Backup

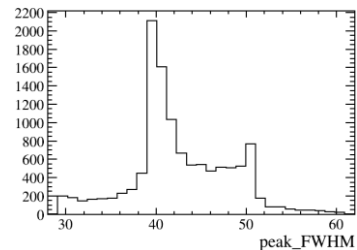
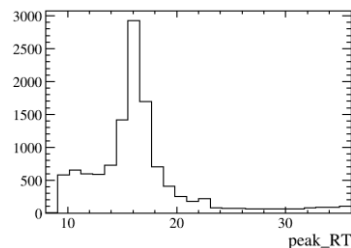
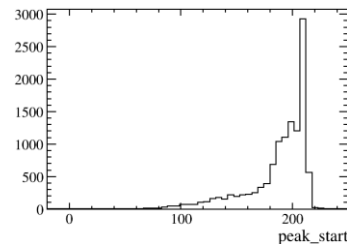
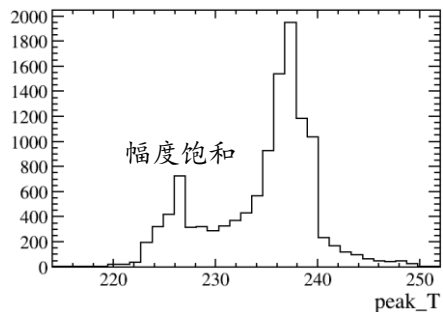
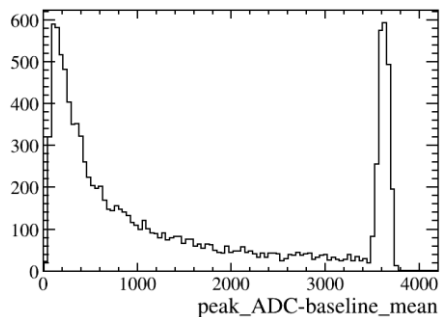
- QE



RICH波形选择条件

项目	条件	统计量	相对前一步效率
阈值	$\text{peak_ADC} - \text{baseline_mean} > 4 \times \text{baseline_RMS}$	873659	
下冲	$\text{abs}(\text{npeak_ADC} - \text{baseline_mean}) < 2 \times \text{baseline_Vpp} \ \&\& \ \text{npeak_ADC} > 100$	864170	$98.9 \pm 0.0\%$
峰值位置	$\text{peak_T} > 215 \ \&\& \ \text{peak_T} < 250$	47989	$5.55 \pm 0.02\%$
上升时间	$\text{peak_RT} \geq 10 \ \&\& \ \text{peak_RT} \leq 35$	32734	$68.2 \pm 0.2\%$
峰半高全宽	$\text{peak_FWHM} \geq 30 \ \&\& \ \text{peak_FWHM} \leq 60$	11843	$36.2 \pm 0.3\%$

(电子学说压到1.6pC以内可以有效压低串扰)



- 使用SiO₂辐射体，探测器转动30度
- 模拟中 (2GeV π)，11.2%透过率的C6F14平均光电子数1.48，SiO₂平均光子数5.7光子数，3.9倍
- 实验比值0.59 : 1.32, 2.4~4.4倍

