



HIAF终端顶点探测器研发

赵承心*, 黄菊, 牛晓阳, 廖健巍, 孙文超, 张洪林, 杨海波, 何芮, 韩伟佳

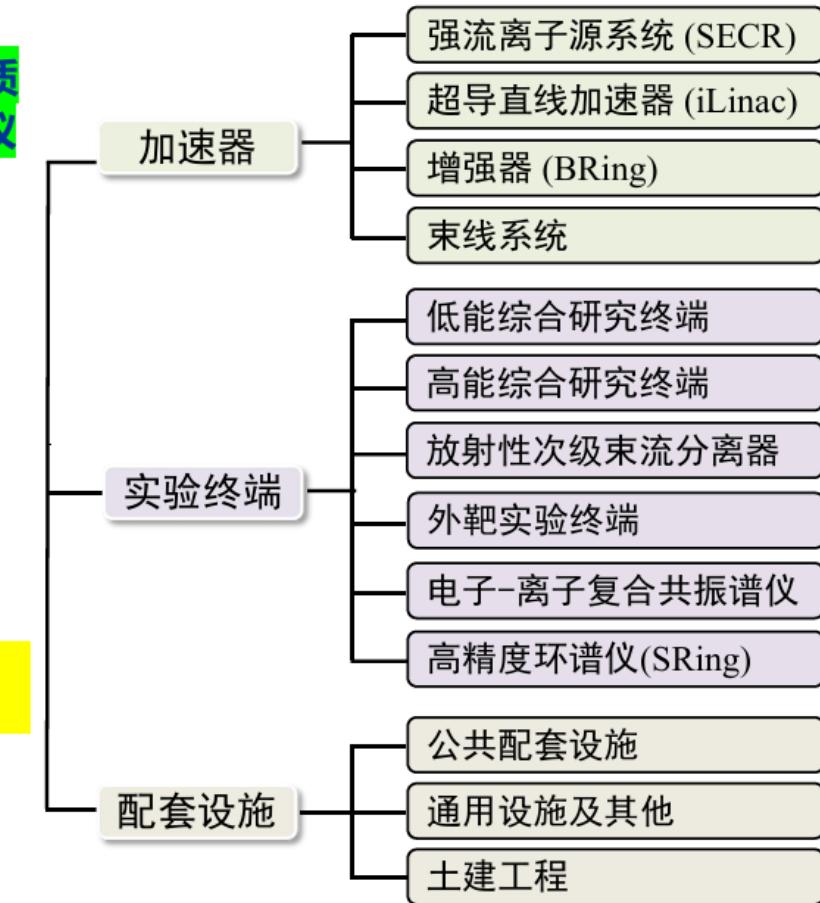
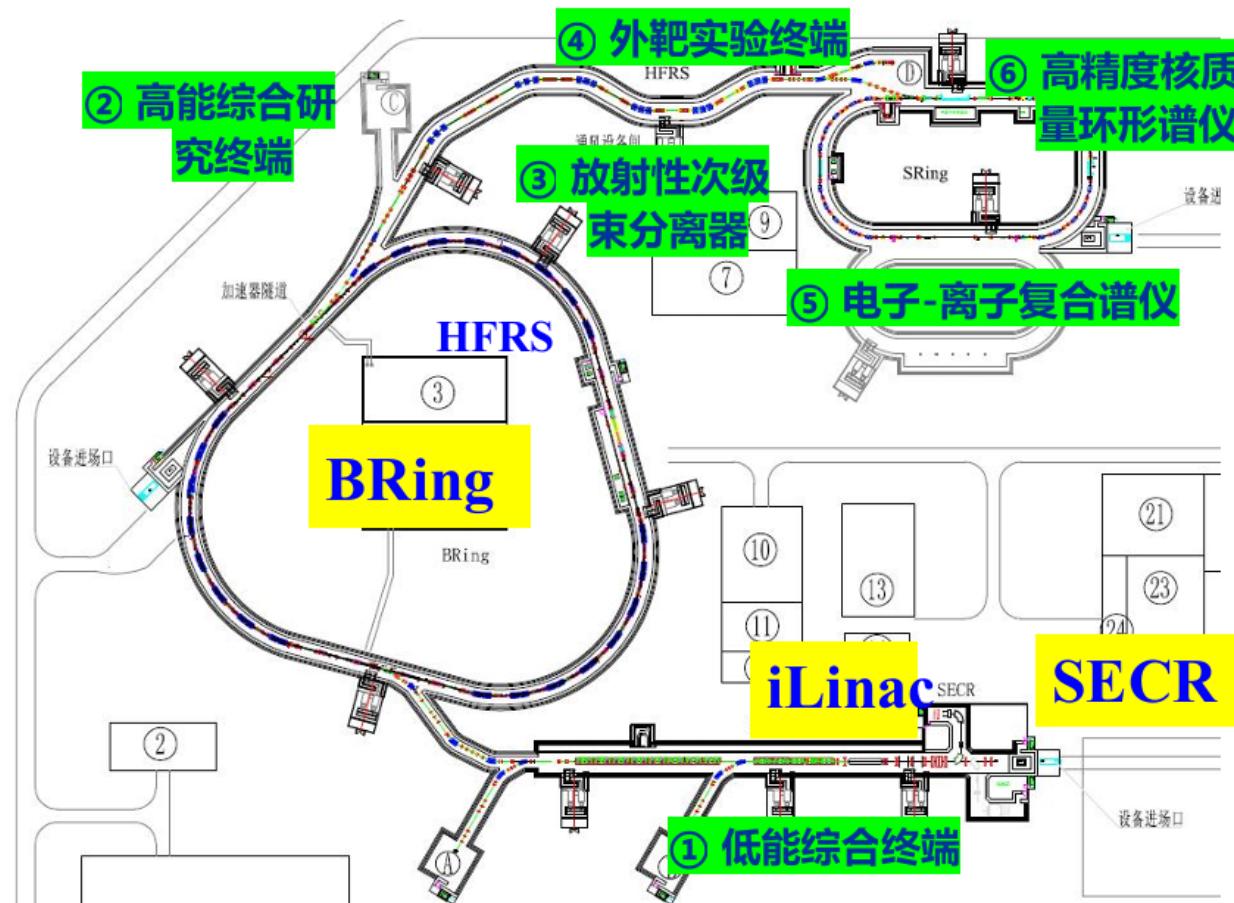
中国科学院近代物理研究所-夸克物质中心-像素探测器室

半导体辐射探测器研讨会

2025.04

强流重离子加速器装置 (HIAF)

- 国家重大科技基础设施，突破核物质研究进展
- 高流强、高能量、高功率，抢占前沿研究制高点
- 开放共享，打造多学科科研平台

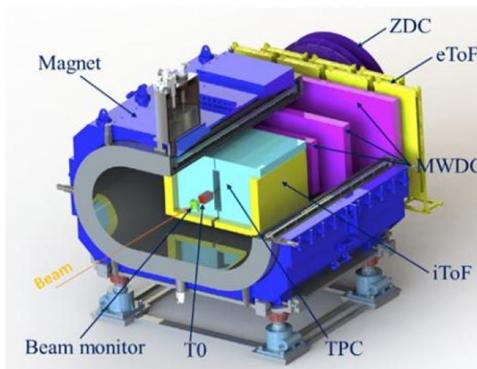


高能综合研究平台



① 核物质相结构终端

↓
寻找QCD相变临界点

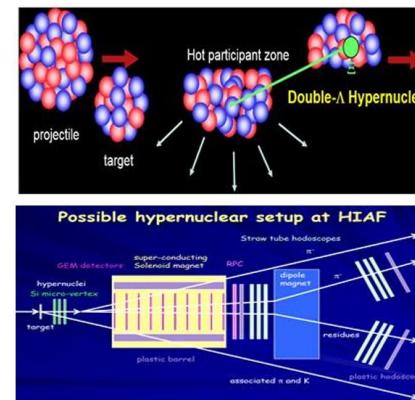


- 宽能量范围全离子
- 高品质慢引出束流

离子种类	能量 (GeV/u)	流强 (ppp)
p	9.3	6.0×10¹²
¹² C ⁶⁺	4.2	1.2×10 ¹²
⁷⁸ Kr ¹⁹⁺	1.7	6.0×10 ¹¹
²⁰⁹ Bi ³¹⁺	0.85	2.4×10 ¹¹
²³⁸U³⁵⁺	0.835	2.0×10¹¹

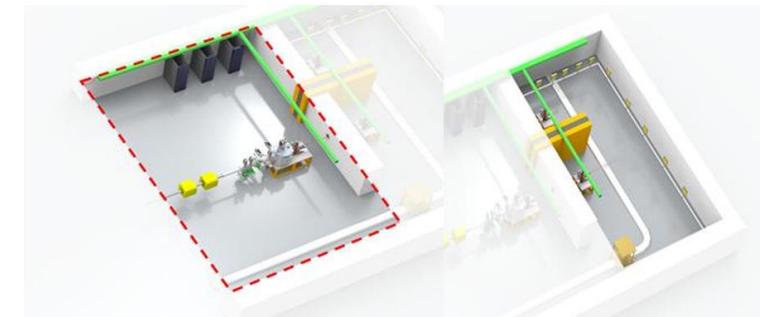
② 超核终端

↓
研究超核性质、扩展超核存在版图



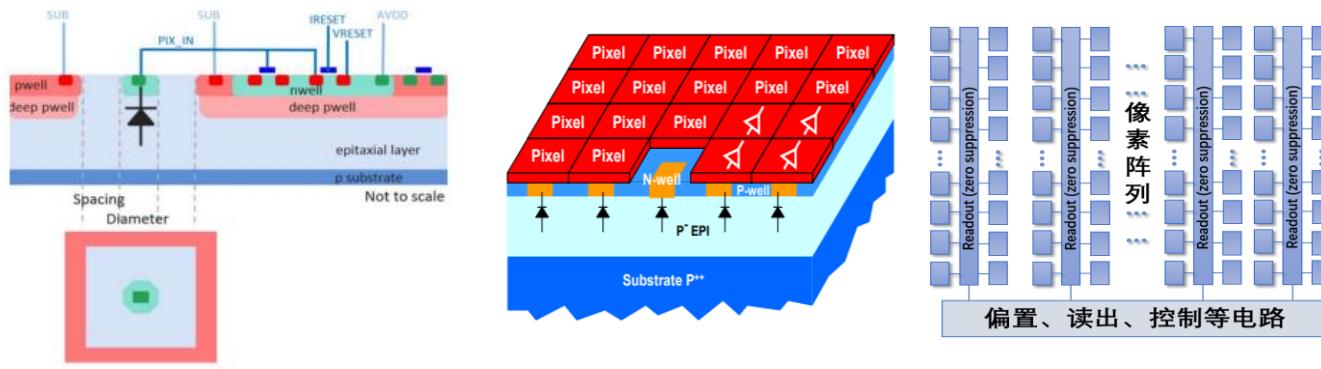
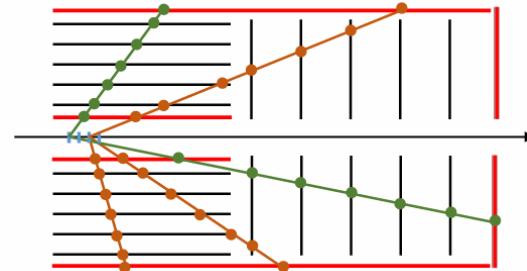
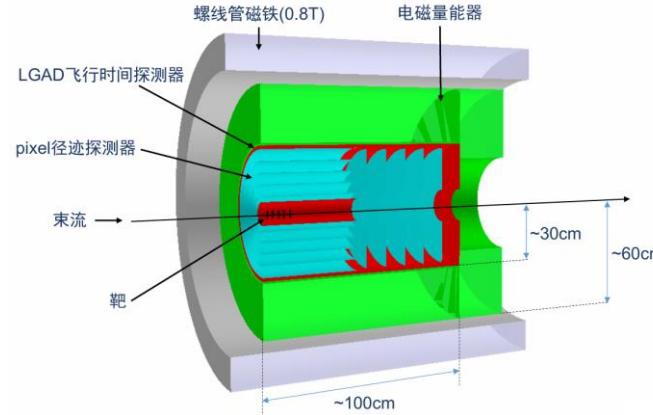
③ 高能单粒子效应终端

↓
模拟整机和小卫星空间运行环境的综合、复杂辐射场



• 顶点及径迹探测器：

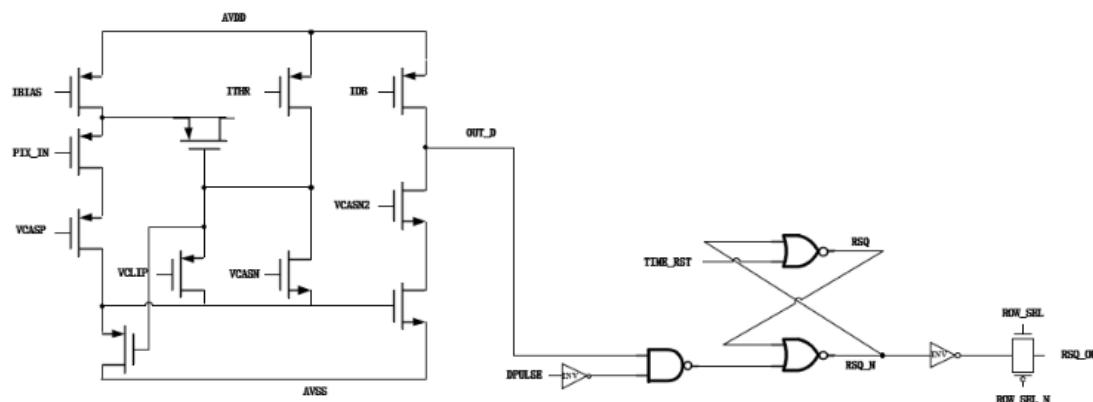
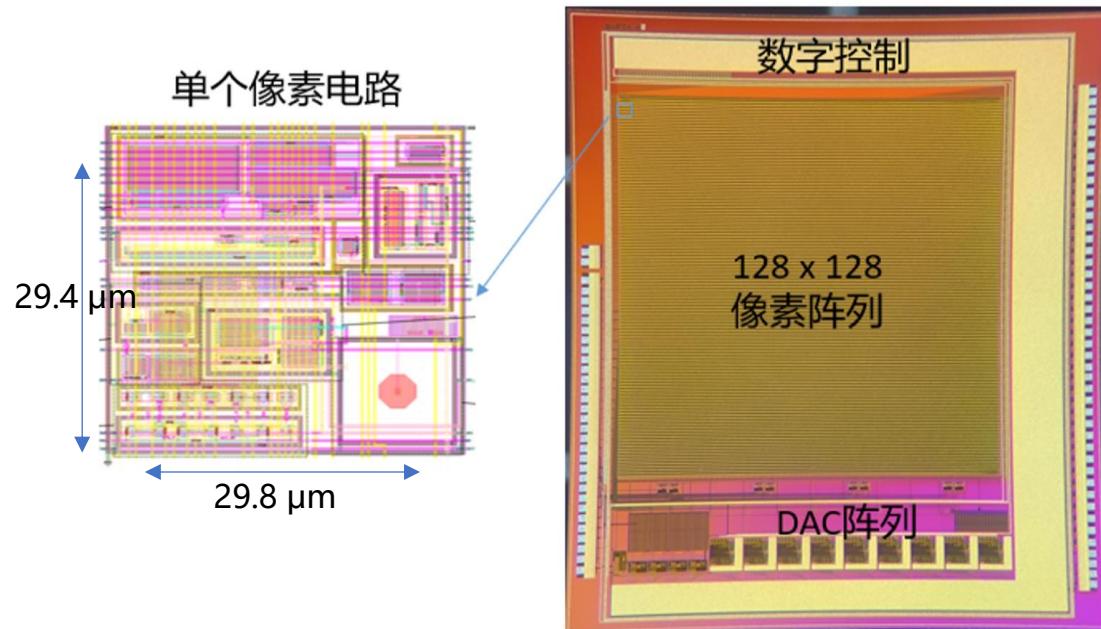
- 径迹重建：连接探测器数据，还原粒子入射径迹
- 能损测定：基于磁场数据计算动量、电荷等粒子特性
- 顶点定位：主碰撞点识别与次级衰变点追踪



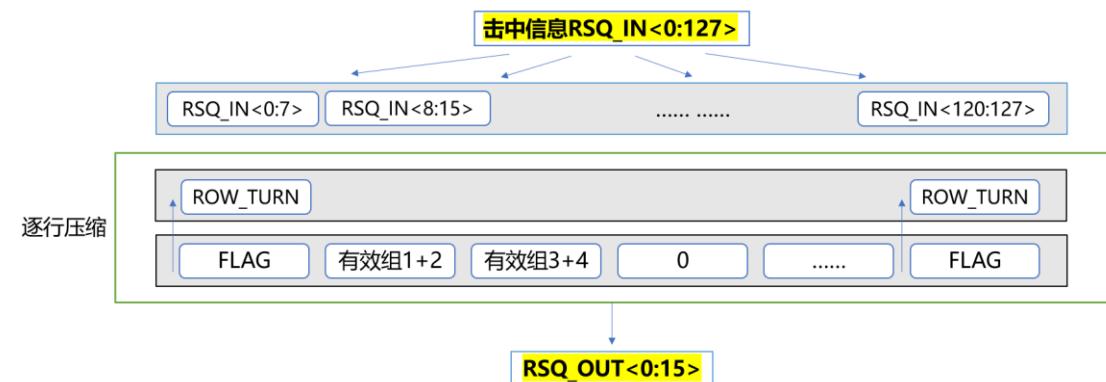
• 单片式硅像素探测器：

- 能够实现很小的像素尺寸 (eg. 10 μm)
- 成本较低、方便集成
- 物质率低->适合作为顶点和径迹探测器使用
- STAR HFT和ALICE ITS已经安装使用

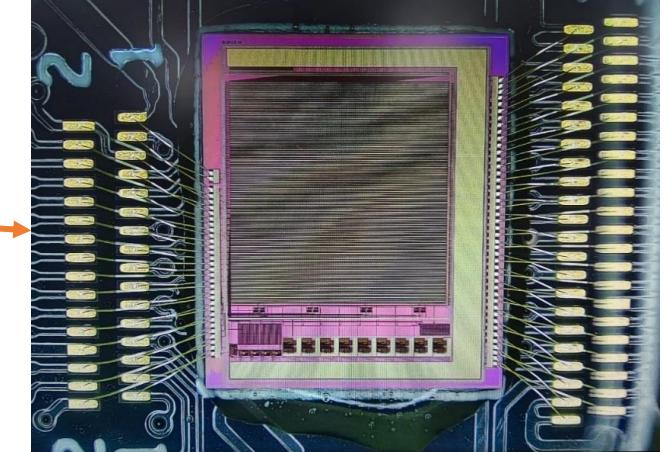
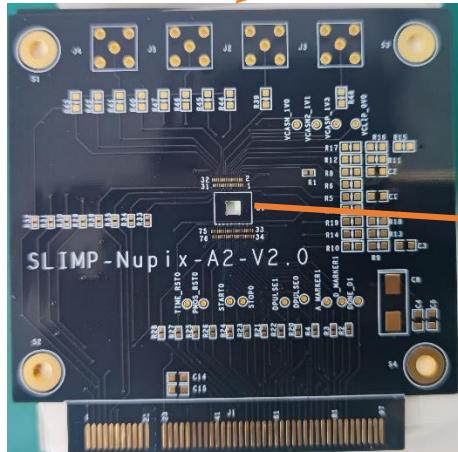
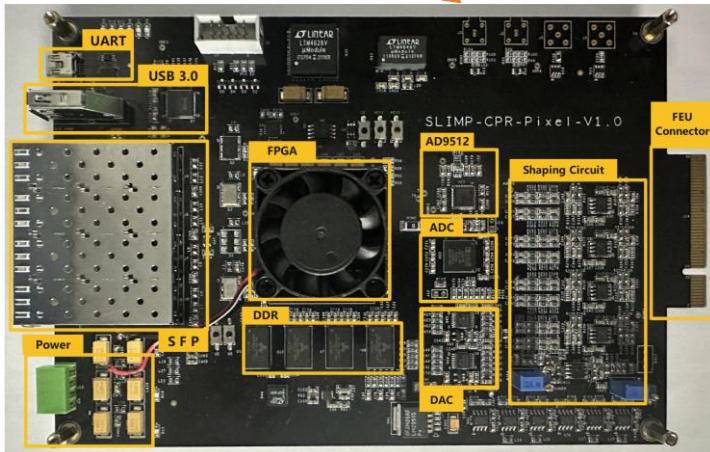
Nupix-A2: 芯片结构



- **工艺:** GSMC130nm四阱高阻工艺
- **阵列:** 128行 x 128列;
- **像素:** $29.4 \mu m \times 29.8 \mu m$;
- **DAC阵列:** 9个8bit IDAC及4个10bit VDAC;
- **数字控制:** 通过SPI总线接口调节DAC配置，控制像素模块的工作、复位和扫描，并对数据进行压缩和读出；

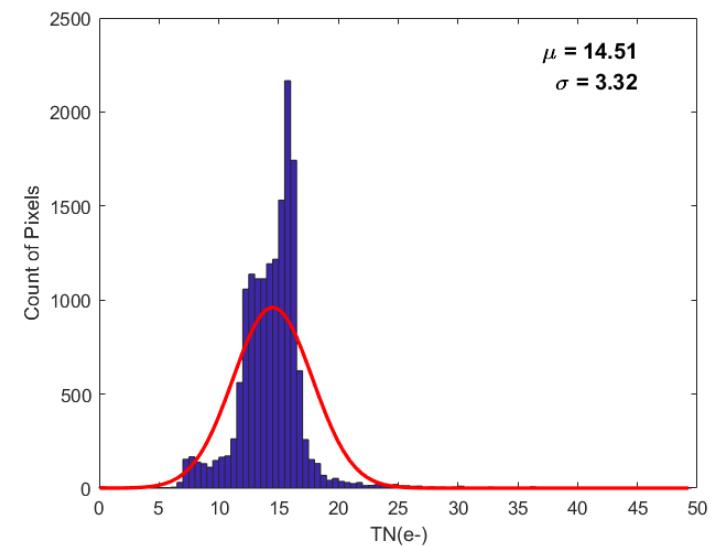
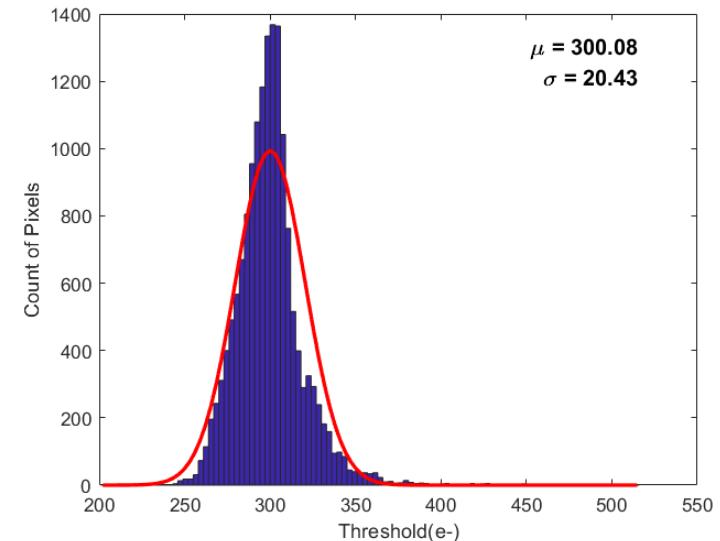
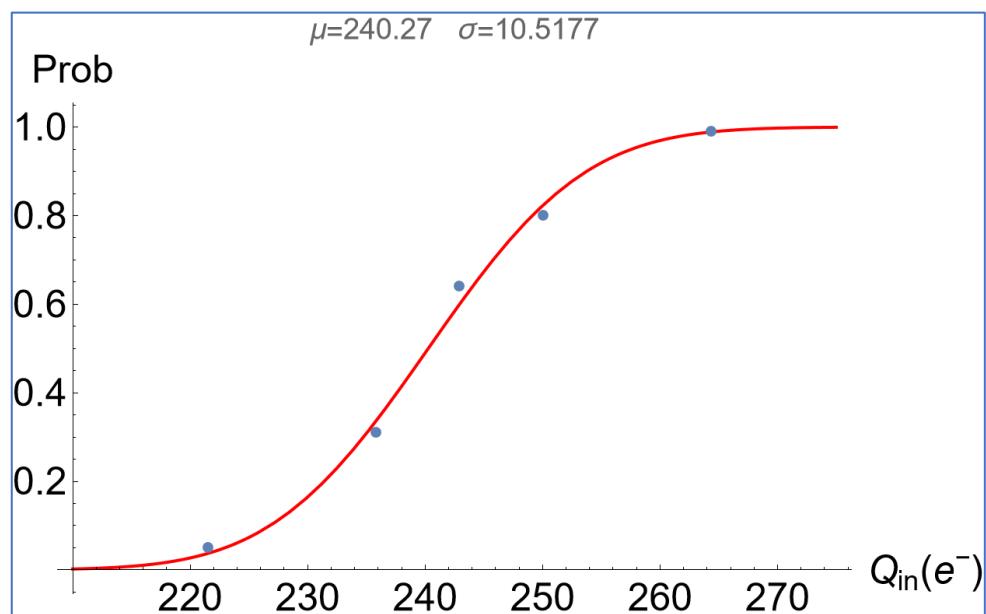


实验室测试平台



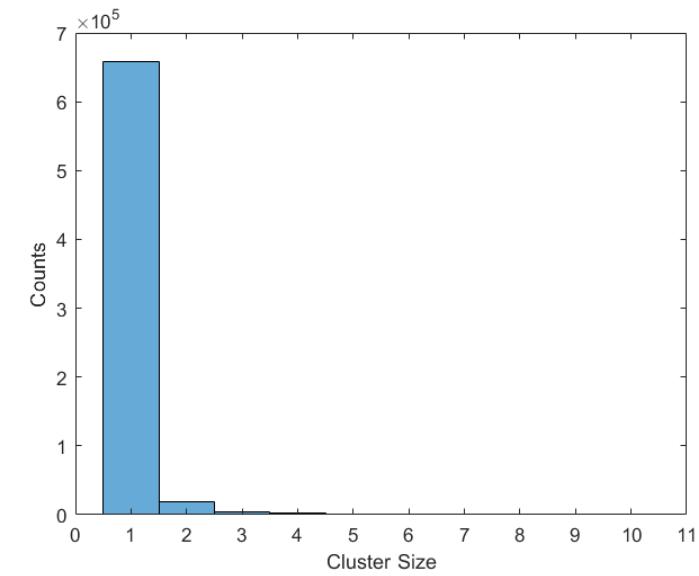
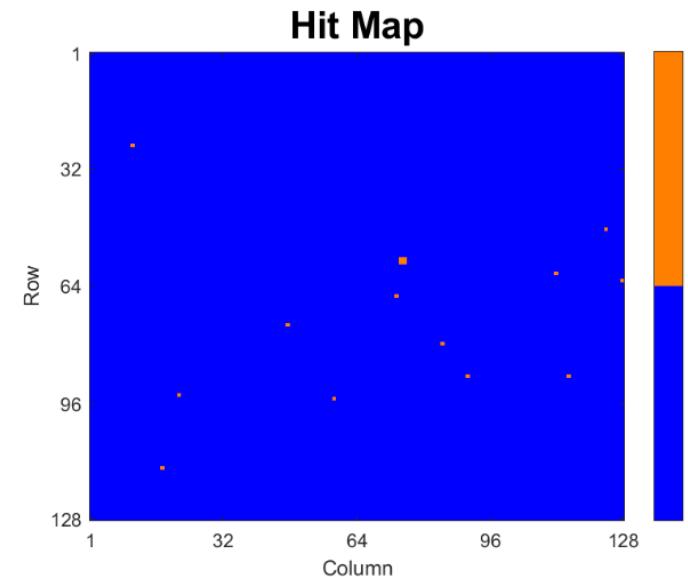
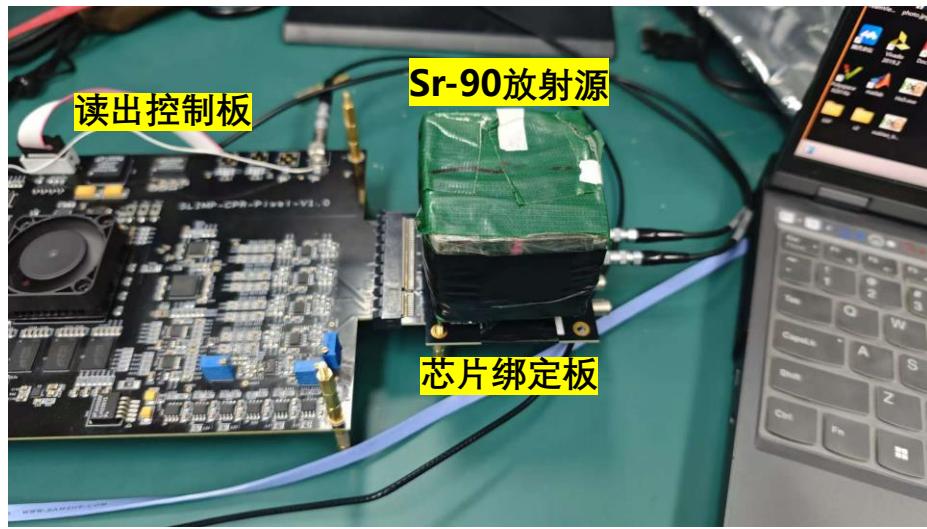
Nupix-A2：电学测试

- 使用S曲线拟合的方式，刻度整个像素阵列的阈值和噪声分布；
- 阈值分布统计的标准差 $\sigma=20.43\text{ e-}$ ，反应比较器阈值的离散度；
- 噪声统计分布的均值 $\mu=14.51\text{ e-}$ ，反应比较器电路噪声；
- Total Noise = $\sqrt{\text{FPN}^2 + \text{TN}^2} = \sqrt{20.43^2 + 14.51^2} = \mathbf{25.06\text{ e-}}$



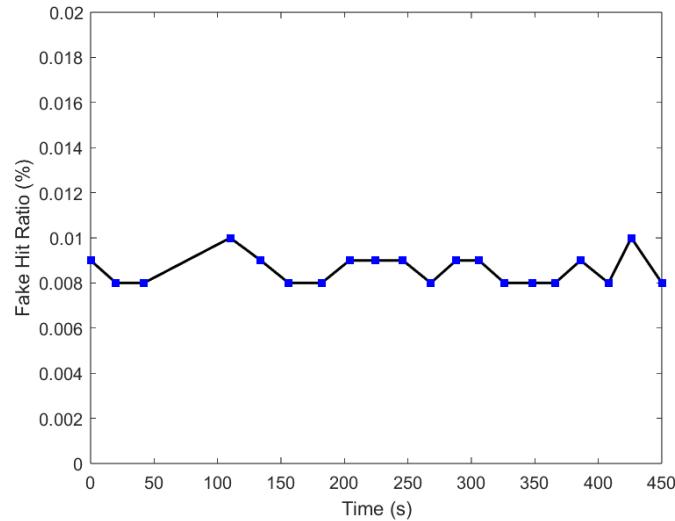
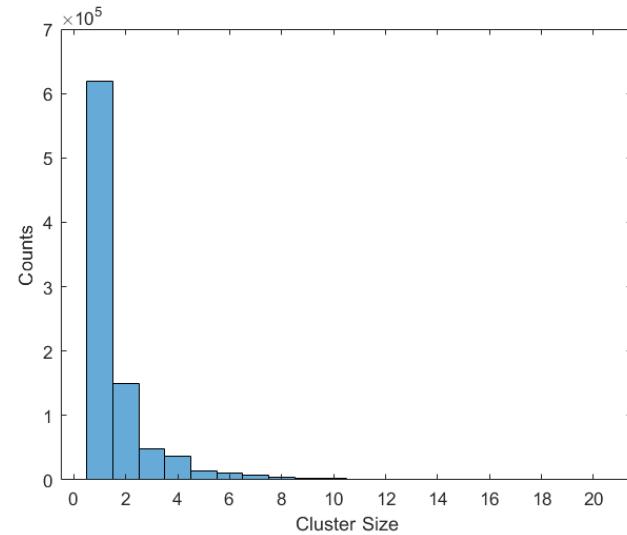
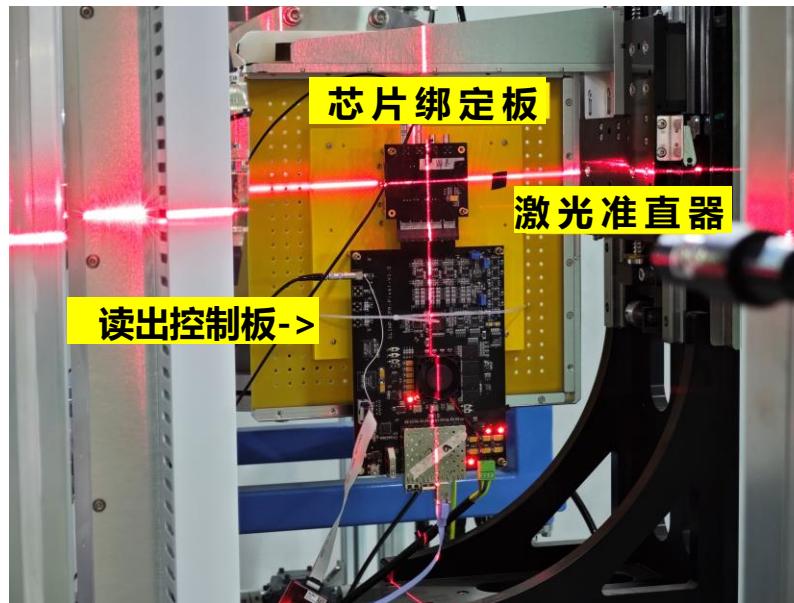
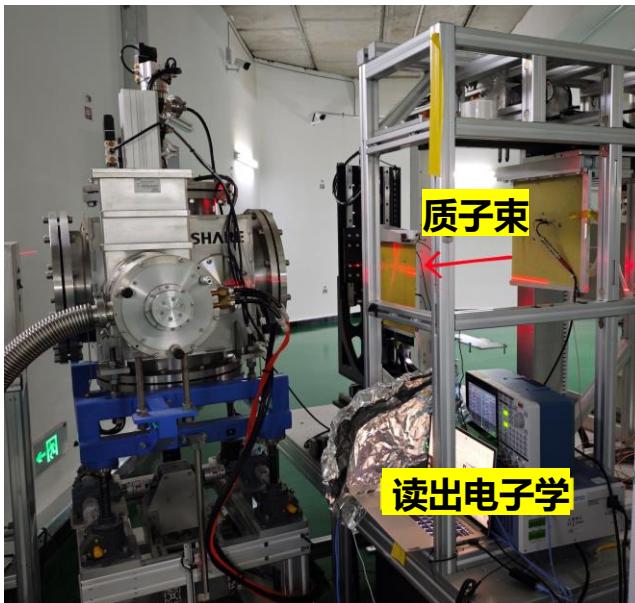
Nupix-A2: Sr-90测试

- 采用放射源 ^{90}Sr (释放 β 粒子) 进行测试
- 单像素团簇占比达到95.35%，双像素团簇占比2.8%，而3~10个像素团簇占比约为1.71%。



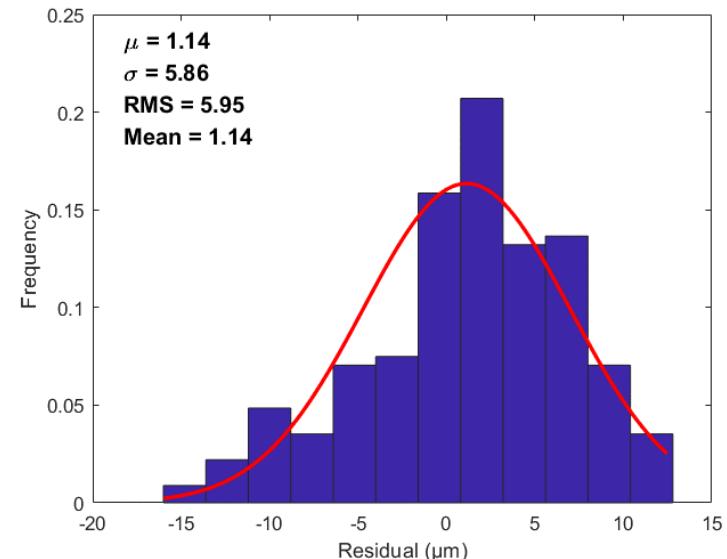
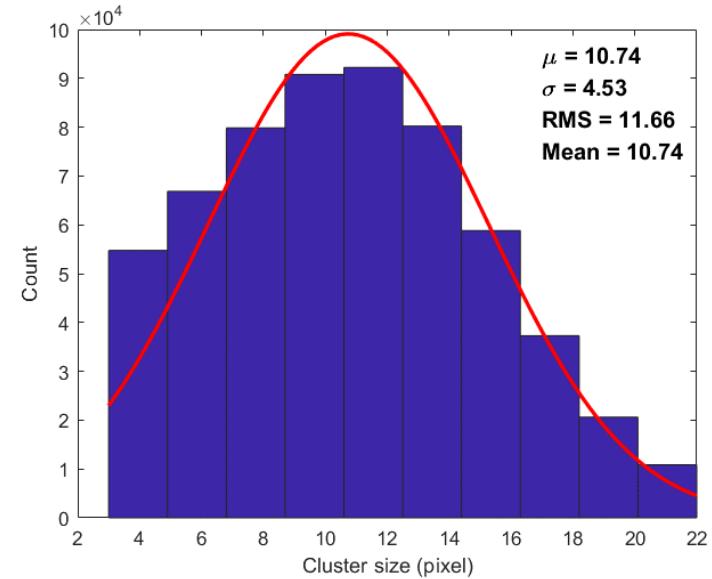
Nupix-A2：质子束流测试

- 于哈尔滨工业大学空间环境地面模拟装置，使用200MeV的质子进行束流测试；
- 总注量 $\sim 1.12 \times 10^8 \text{ ion/cm}^2$ ；平均通量 $\sim 2.9 \times 10^5 \text{ ion/cm}^2/\text{s}$ ；
- 99.7%的团簇面积小于15个像素，其中1~2个像素占比 $\sim 85.17\%$ ；
- 持续检测芯片误翻转比率维持不变，均值约为0.009%。



Nupix-A2：激光测试

- 采用波长1064nm，频率6000Hz的激光扫描芯片表面
- 激光束斑大小分布均值为10.74个像素
- 位置分辨率可达 $5.86 \mu\text{m}$



总结与展望

- **HIAF** —— 国际领先超导强流重离子装置，旨在驱动核物质研究与多学科创新，目前正在建设中；
- **顶点及径迹探测器** —— 通过定位粒子碰撞和衰变点并追踪带电粒子轨迹，支撑核物理领域的研究分析；
- **Nupix-A2** —— 为HIAF终端顶点及径迹探测器研发的MAPS原型芯片；
- Nupix-A2 基于GSMC130nm四阱高阻工艺，实现击中检测及零压缩读出，能够实现约25 e-的整体噪声水平；对 β 粒子和质子均响应良好，响应团簇以1个像素为主；抗辐射性能良好；同时在激光测试下能够实现约5.86 μm 的空间分辨率。
- **展望** —— 完整尺寸芯片；提高读出效率；尝试加入能量和时间测量.....



Thank you for your attention!

HIAF终端顶点探测器研发

汇报人：黄菊

huangju@impcas.ac.cn

chengxin.zhao@impcas.ac.cn

半导体辐射探测器研讨会

2025.04



BACK UP

HIAF终端顶点探测器研发

汇报人：黄菊

huangju@impcas.ac.cn

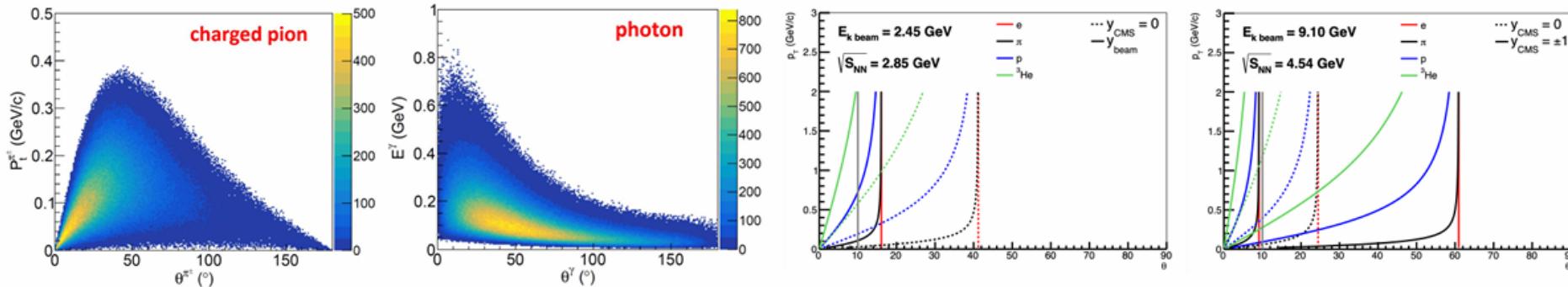
chengxin.zhao@impcas.ac.cn

半导体辐射探测器研讨会

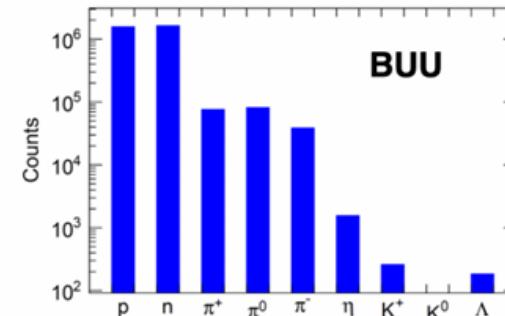
2025.04

谱仪性能需求

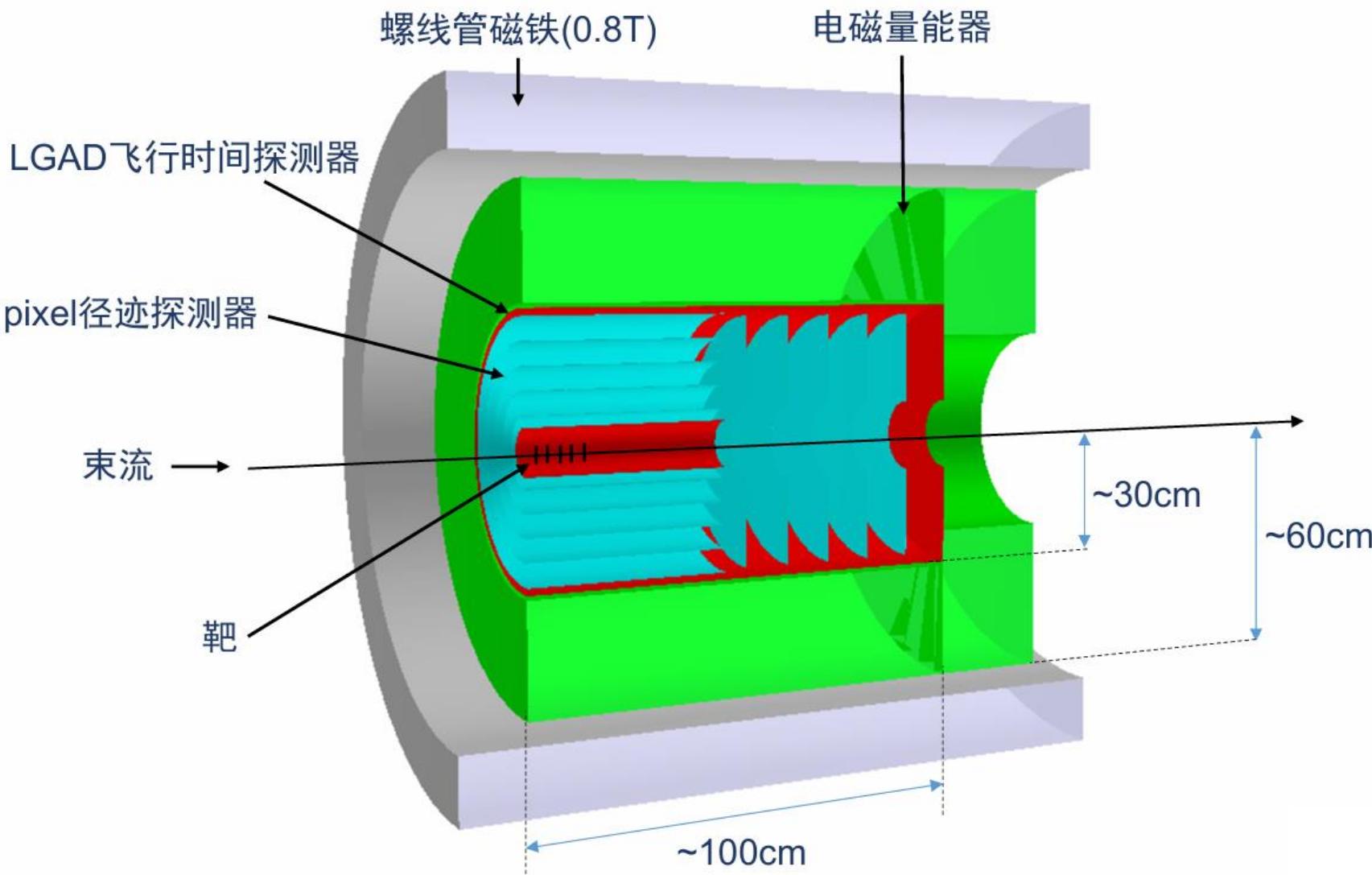
$$\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 (\gamma\gamma)$$



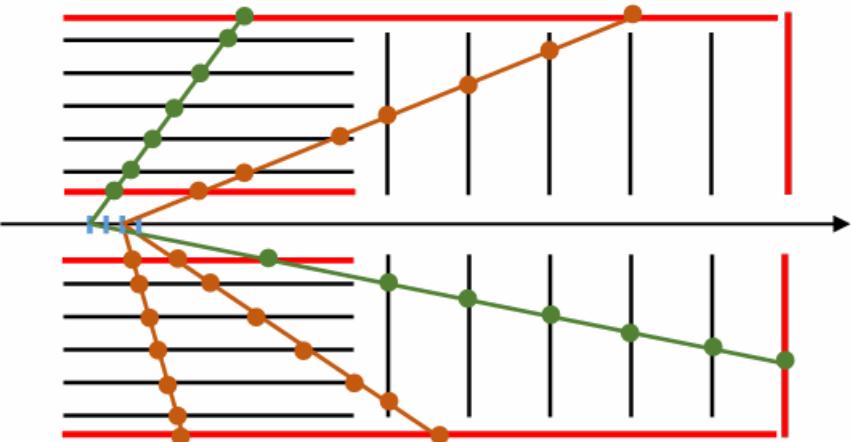
- 带电粒子横动量50MeV-500MeV
- γ 能量50MeV-1GeV
- 大方位角覆盖($\theta: 10^\circ \sim 100^\circ$, $\varphi: 0 \sim 2\pi$)
 - 覆盖重离子碰撞的中心快度区
- $e^{+-}, \gamma, \pi^{+-}, K^{+-}, p, d, t, {}^3\text{He}, {}^4\text{He}$ 粒子鉴别
 - $\pi^{+-}/e^{+-} \sim 100, n/\gamma \sim 8 \Rightarrow$ 为鉴别 e^{+-} 、 γ , 需大幅压低 π^{+-} 、 γ 本底
- 高位置分辨, 压低超核等衰变粒子本底
- 远超同能区现有实验的事例率



谱仪概念设计



硅径迹探测器



- 像素尺寸~ $100\mu\text{m}$
 - 使用很短(~30cm)的径迹长度即可得到较好的动量分辨: 4-6% (0.8T磁场)
 - 精确重建衰变顶点, 压低超核等本底
- 能量、时间双读出
 - 通过时间区分不同碰撞事例: $\Delta t \sim 10\text{ns}$ (1/100MHz)
 - dE/dx 用于区分不同轻核电荷Z
- 单pixel死时间~ $10\mu\text{s}$
 - 即使事例率高达100MHz, 每事例4条径迹情况下, 占有度仅~ 10^{-3}

