

重离子束流望远镜原型系统 开发与应用

赵承心*, 张洪林, 孙文超, 牛晓阳, 杨海波, 何芮, 黄菊, 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

西安·2025.04



中国科学院近代物理研究所
Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences



目录

CONTENT

PART ONE

研究背景与意义

PART TWO

重离子束流望远镜系统设计

PART THREE

在束测试及数据分析

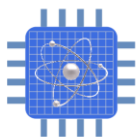
PART FOUR

重离子束流望远镜未来升级



研究背景与意义

PART ONE

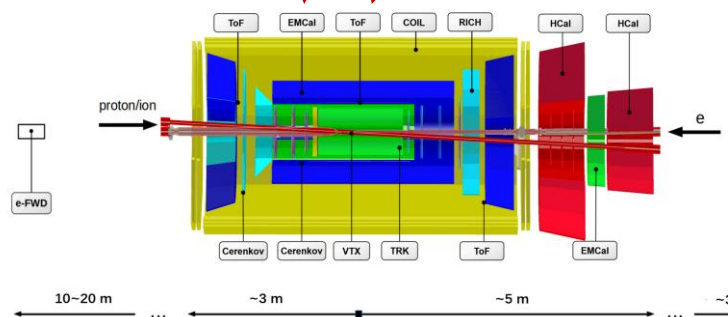
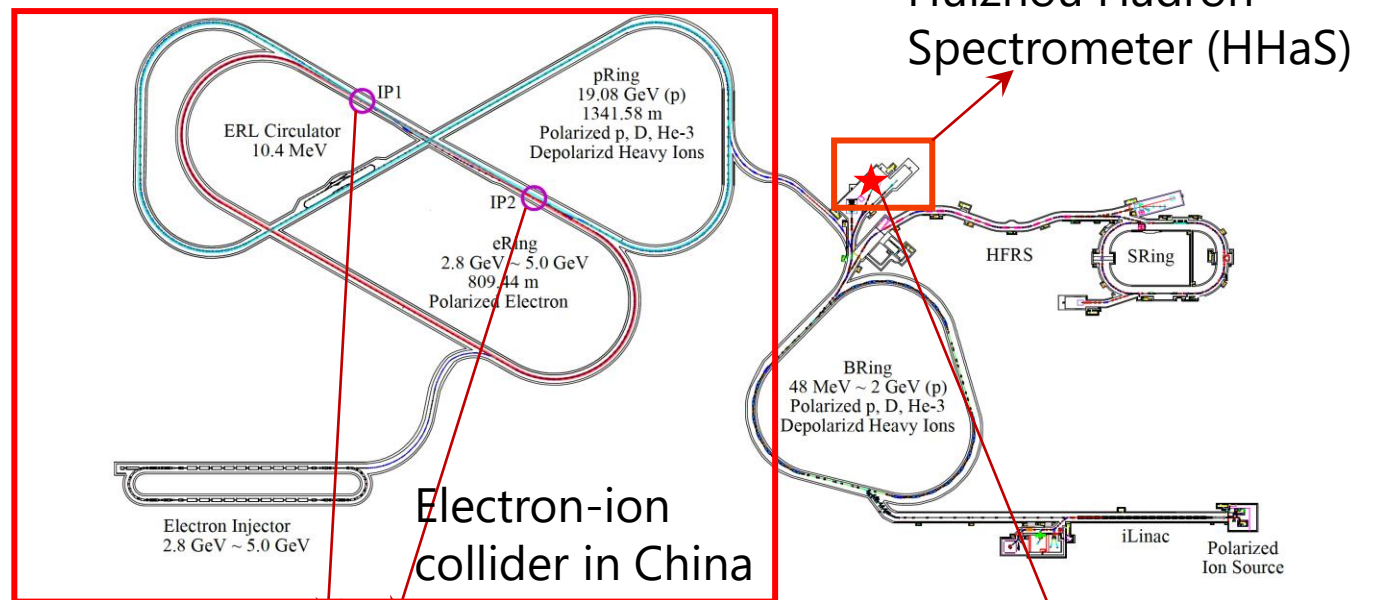


HIAF 作为一台强流重离子加速器，未来建设的EicC, HHaS等装置中将会使用**多种位置探测器需要进行位置精度标定**，并且在实验终端上将建设的**顶点探测器和径迹探测器急需技术验证**。

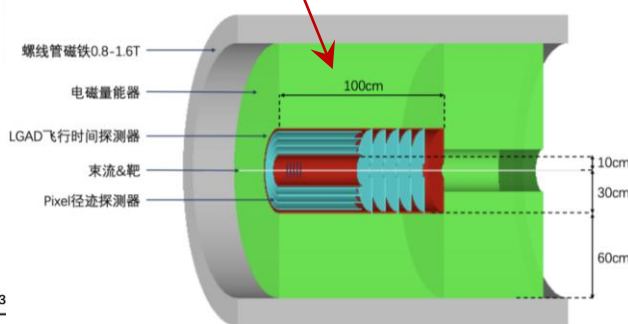


HIAF装置区

- 具备高亮度、高强度、宽能区
- 面向核物理、天体物理和超重元素合成前沿
- 对束流探测技术提出了高精度、高时间分辨率、大动态范围等严苛要求。

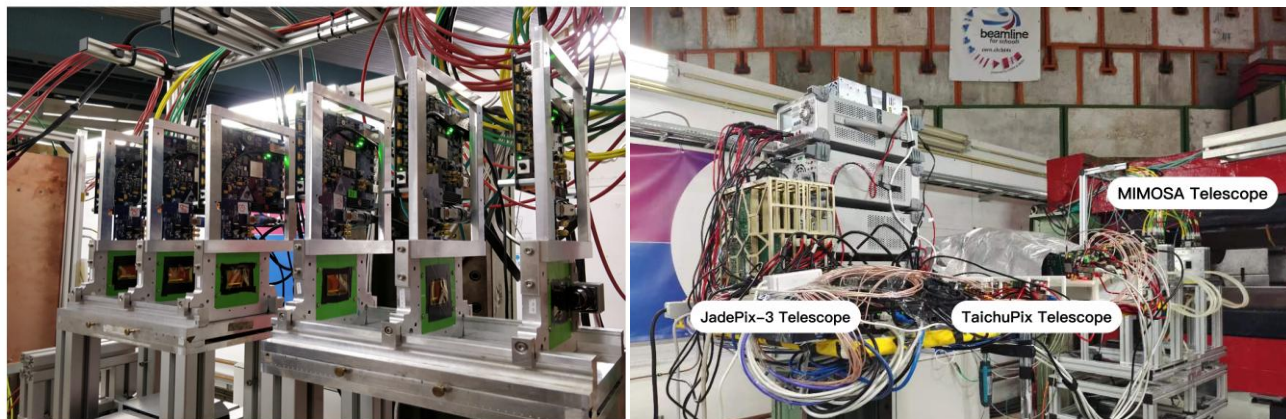


EicC顶点探测器概念图



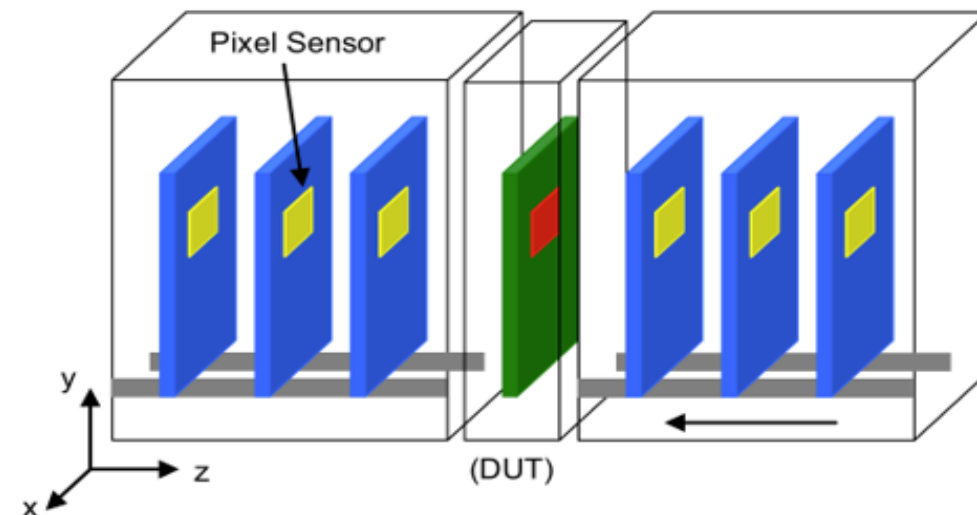
HHaS径迹探测器概念图

目前国内外未有专用于重离子的束流望远镜；重离子束流望远镜由上下游两个探测臂，每个探测臂包含三个探测层，可以精确测量粒子径迹，进而能够标定探测器。



- ◆ 国内外基于像素探测器的束流望远镜：
- ◆ 国外：EUTELESCOPE, ADENIUM等；
- ◆ 国内：JadePix-3束流望远镜等。

上述均为轻粒子束流望远镜



束流望远镜设计概念图

重离子束流望远镜包含：

- 上下游各三层探测器，用于精确测定离子径迹；
- 待测器件置于上下游探测器中间；

技术难点

01

具备能量测量能力的像素芯片探测器，用于提升重离子位置分辨

02

像素探测器多位多通道的数据输出，带来的高速数据传输和存储需求

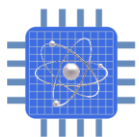
03

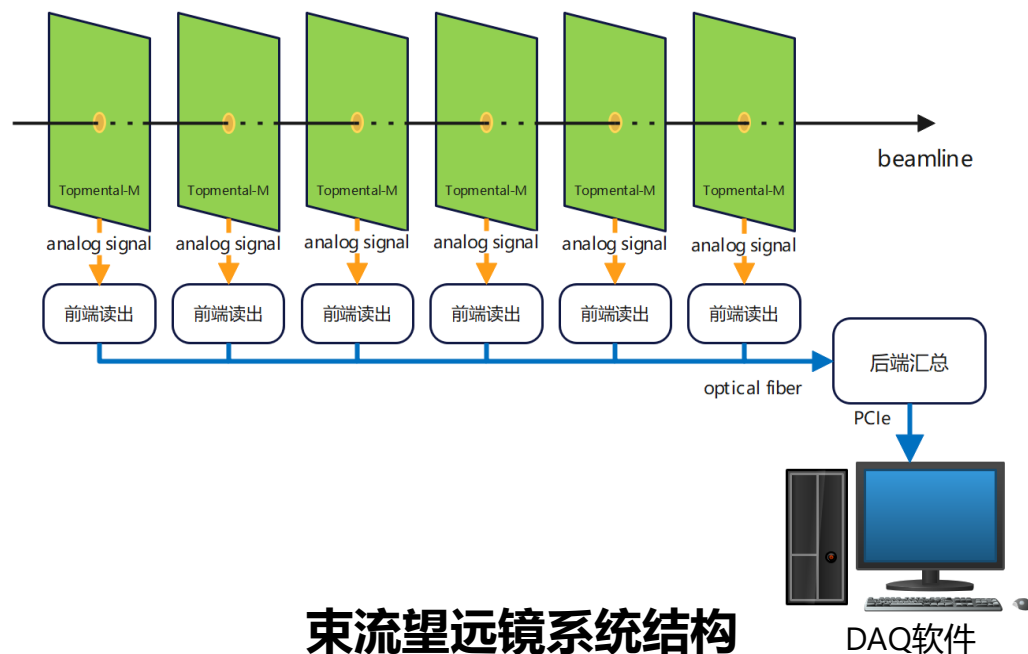
多层像素探测器联合使用，多探测层的空间位置校准和径迹重建难度加大



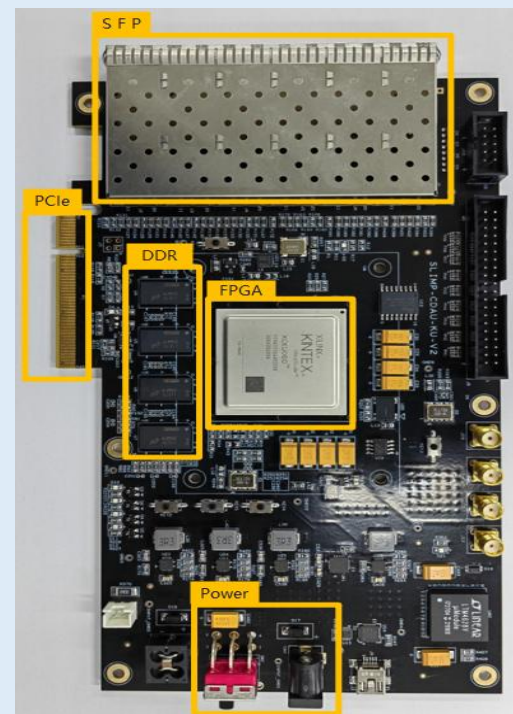
重离子束流望远镜 系统设计

PART TWO

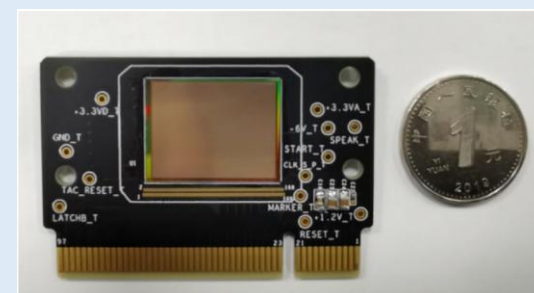




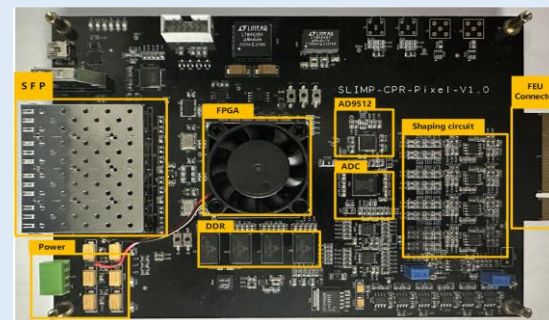
束流望远镜系统结构



后端汇总板硬件



Topmetal-M像素探测器芯片



前端读出板硬件

1

提升重离子定位精度

基于全国产的具备能量测量能力的Topmetal-M像素探测器芯片，解决重离子束流望远镜离子高精度定位需求；

2

满足系统高数据带宽需求

前端使用高速ADC快速读出探测器数据，后端采用高带宽设计满足多个探测器的数据带宽，数据带宽最大64Gbps；

3

解决多层探测器位置偏差校准

通过精准可配置的时间戳解决探测器数据对齐，通过束斑找寻和空间重建算法解决探测器空间位置对齐。

The diagram illustrates the system architecture of the GTX-based data acquisition system. It shows the interconnections between various modules, including the Data Transmission Unit, Clock Module, Command Parser, ADC Driver, Data Packing Module, Data Embedder, Chip Driver, and DAC Driver. The flow of data, control signals, and status information is detailed, along with clock signals from an oscillator and CDAU. A legend defines the line types for clock, data, bus, and status signals.

Legend:

- clk (orange dashed line): Clock signal
- data (blue solid line): Data signal
- Bus (green dashed line): Bus signal
- status (cyan solid line): Status signal

System Components and Connections:

- CDAU** (Control and Data Acquisition Unit) connects to the **Data Transmission Unit** via **SFP** (Serial Fiber Port).
- Oscillator** (200M) provides clock signals to the **Clock Module** and **Command Parser**.
- Clock Module** provides clock signals (clk 66M, clk 100M, clk 25M, clk 200M, clk 100M) to the **Data Transmission Unit** and **Command Parser**.
- Command Parser** receives **GTX uplink data & Commands** and provides **Measurement data** to the **Data Embedder**.
- ADC** (Analog-to-Digital Converter) provides **SPI Bus** and **LVDS** signals to the **ADC Driver**.
- ADC Driver** provides **ADC data** to the **Data Packing Module**.
- Data Packing Module** provides **ADC data** to the **Data Embedder**.
- Data Embedder** provides **status data** to the **Data Unit**.
- Data Unit** provides **status data** to the **Data Embedder**.
- Chip Driver** and **DAC Driver** are connected to the **Data Transmission Unit** and provide **control signal** and **SPI Bus** signals to the **Topmetal-M** and **DAC** (Digital-to-Analog Converter).

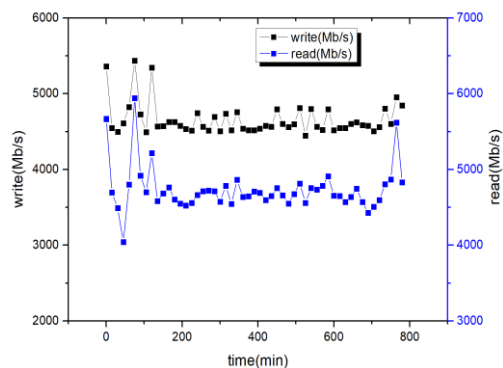
Front-end Core Modules:

- Command Parser:** Receives **Commands from GTX** and **Measurement data**. It processes these into **Read data** and **Output data**, which are then sent to the **GTX uplink data**.
- Data Transmission Unit:** Receives **GTX input** and **GTX uplink data**. It processes these into **frame_gen** and **frame_check**, which are then sent to the **GTX output**.

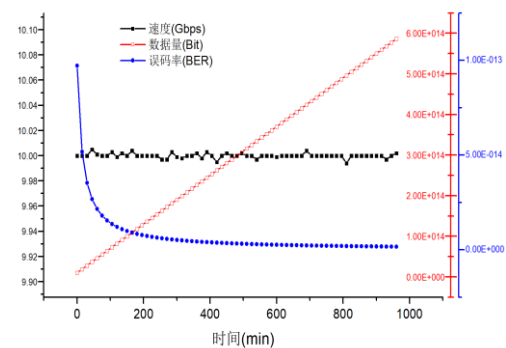


- ✓ GTH 传输器：负责与前端板之间的高速光纤通信。
- ✓ 指令仲裁器：协调多路指令通道的访问控制。
- ✓ 数据分发模块：对前端板的数据进行预处理与分流。
- ✓ DDR4 & PCIe 模块：实现对 DDR4 存储器与 PCIe 总线的数据读写控制。

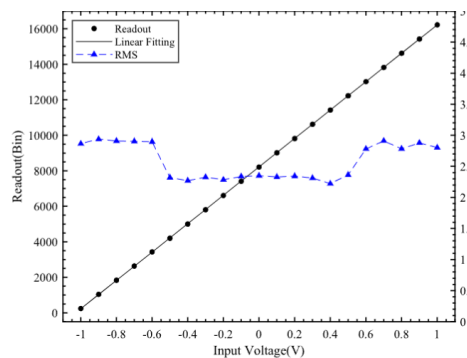
实验室测试，前后端光纤传输速率稳定，误码率极低；后端与上位机通信稳定，无错误发生；联调探测器稳定工作，无异常。



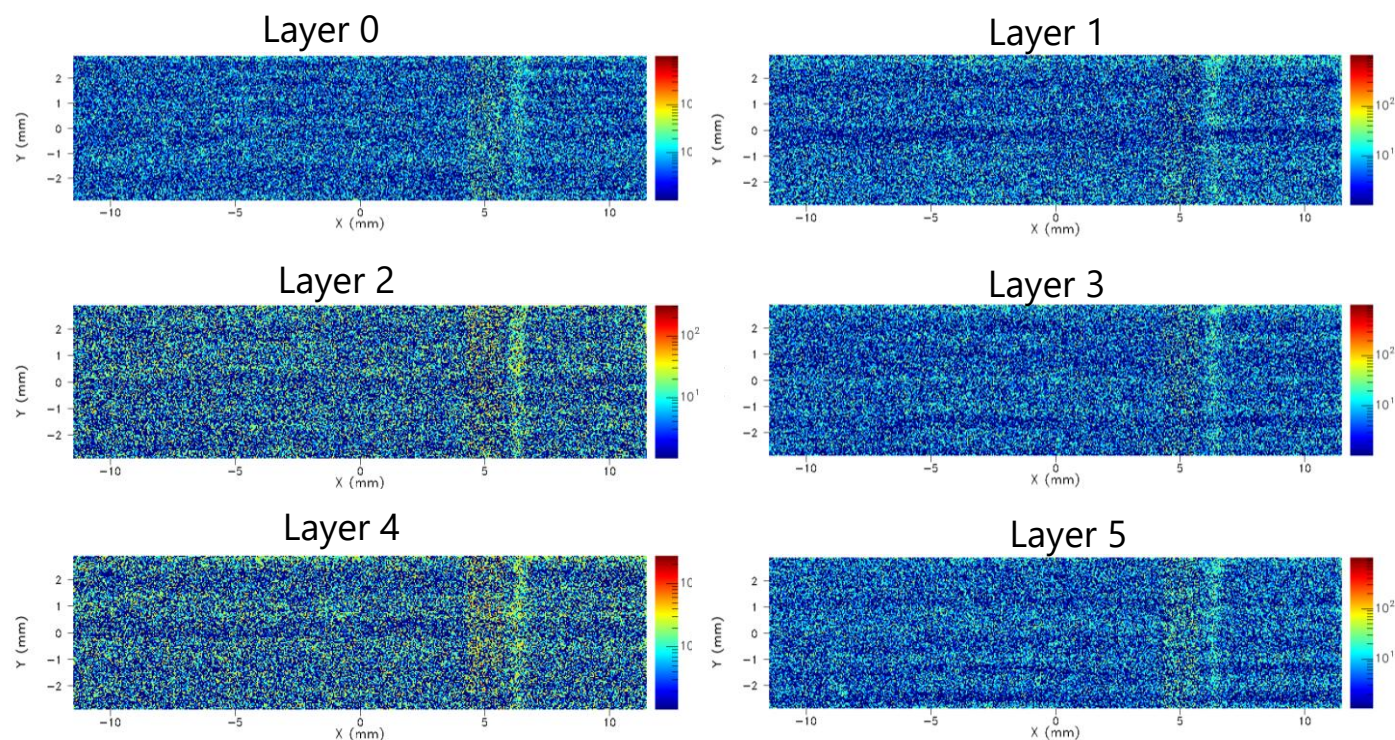
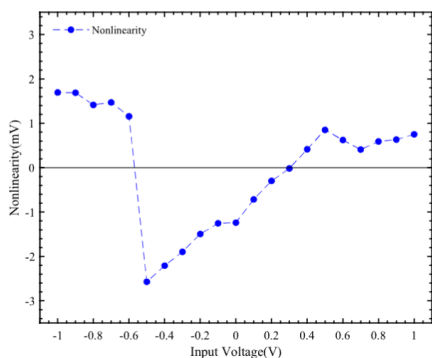
后端的PCIe传输速率



前后板光纤通讯测试



前端板数据采集线性表现



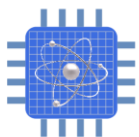
六层像素探测器芯片实验室本底结果

- 系统单板光纤传输速率达**10Gbps**，后端汇总速率高达**60Gbps**。误码率低至 **2.3×10^{-15}** 。
- 后端的PCIe传输读写速率均在**4500Mb/s**上下。在传输测试中未出现错误。
- 数据采集最大非线性偏差为**0.128%**，最大数据采集噪声约**2.57mV**；



在束测试及数据分析

PART THREE



利用高能碳离子束完成重离子束流望远镜的在束测试；从数据的初步分析可知高能碳离子束的在每层的团簇清晰，初步验证了利用高能重离子能实现对粒子轨迹精准探测。

重离子束流实验：

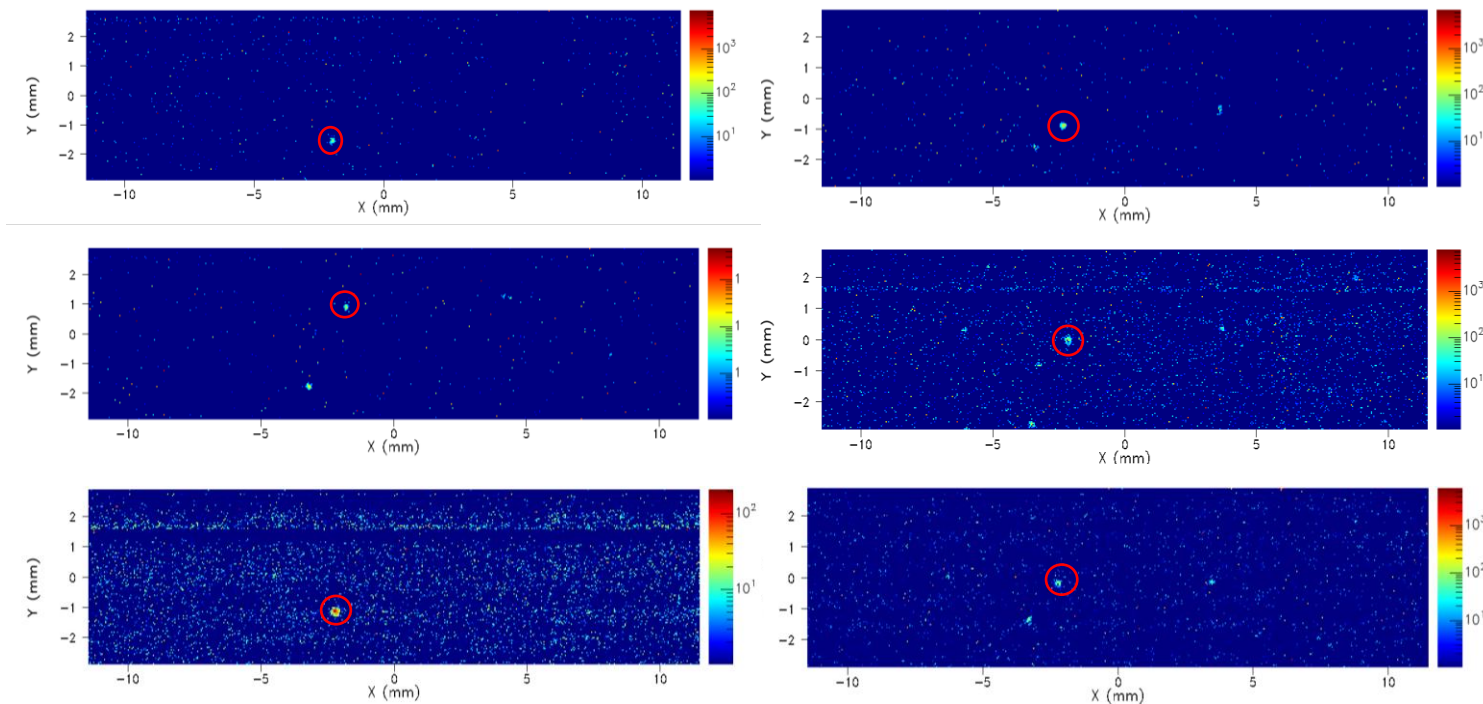
束流种类： $^{12}\text{C}^{6+}$

束流能量：392.92 MeV/u

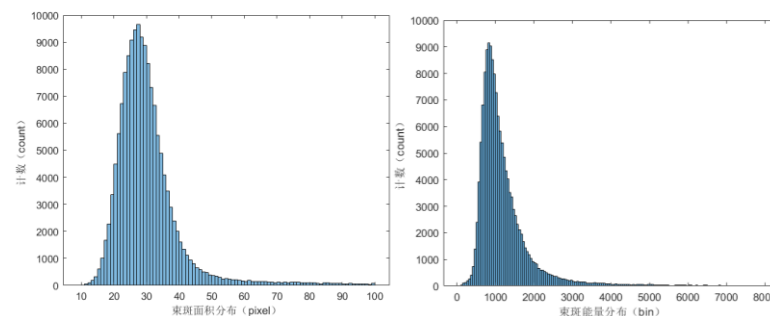
Si中LET：37.37 keV*cm²/g

束流Flux：100 – 15000ions/ pulse

脉冲周期：8s



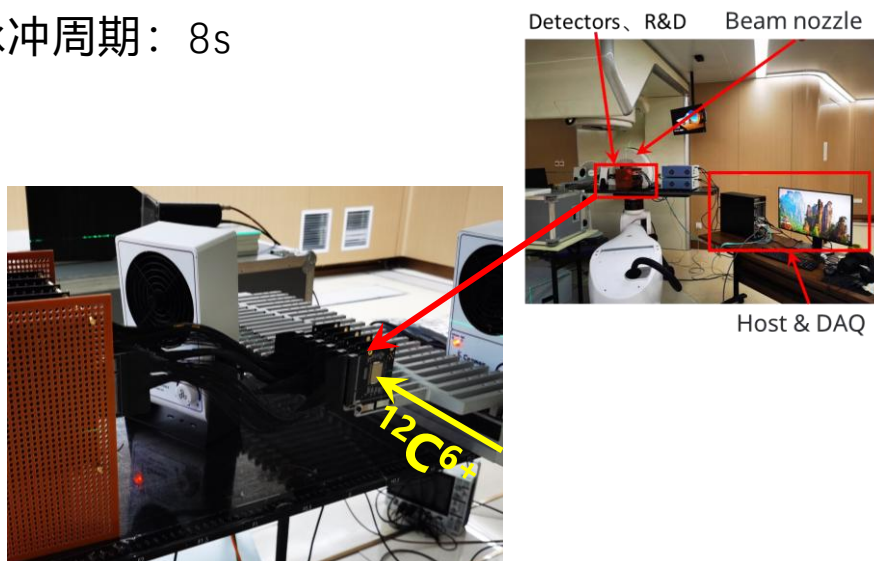
碳离子在每层形成的团簇示例



团簇尺寸：~29像素

团簇能量：~1200 bin

基本呈线性关系



原始数据的离线处理分离团簇数据，通过Corryvreckan框架实现高效且精准的束斑寻找与空间位置重建，完成预对齐-多次迭代对齐，最终获得原型机的位置分辨测量结果。

数据处理需求：

高效且精准的束斑找寻

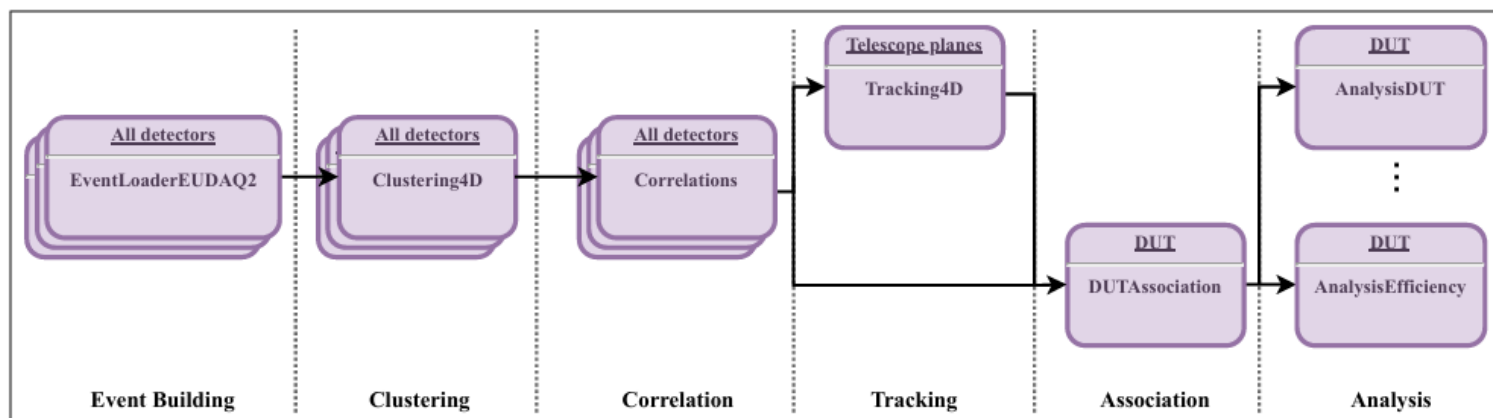
数据处理实现：

基于连通区域检测的束斑找寻算法

空间位置重建和束流径迹重建

Corryvreckan架构

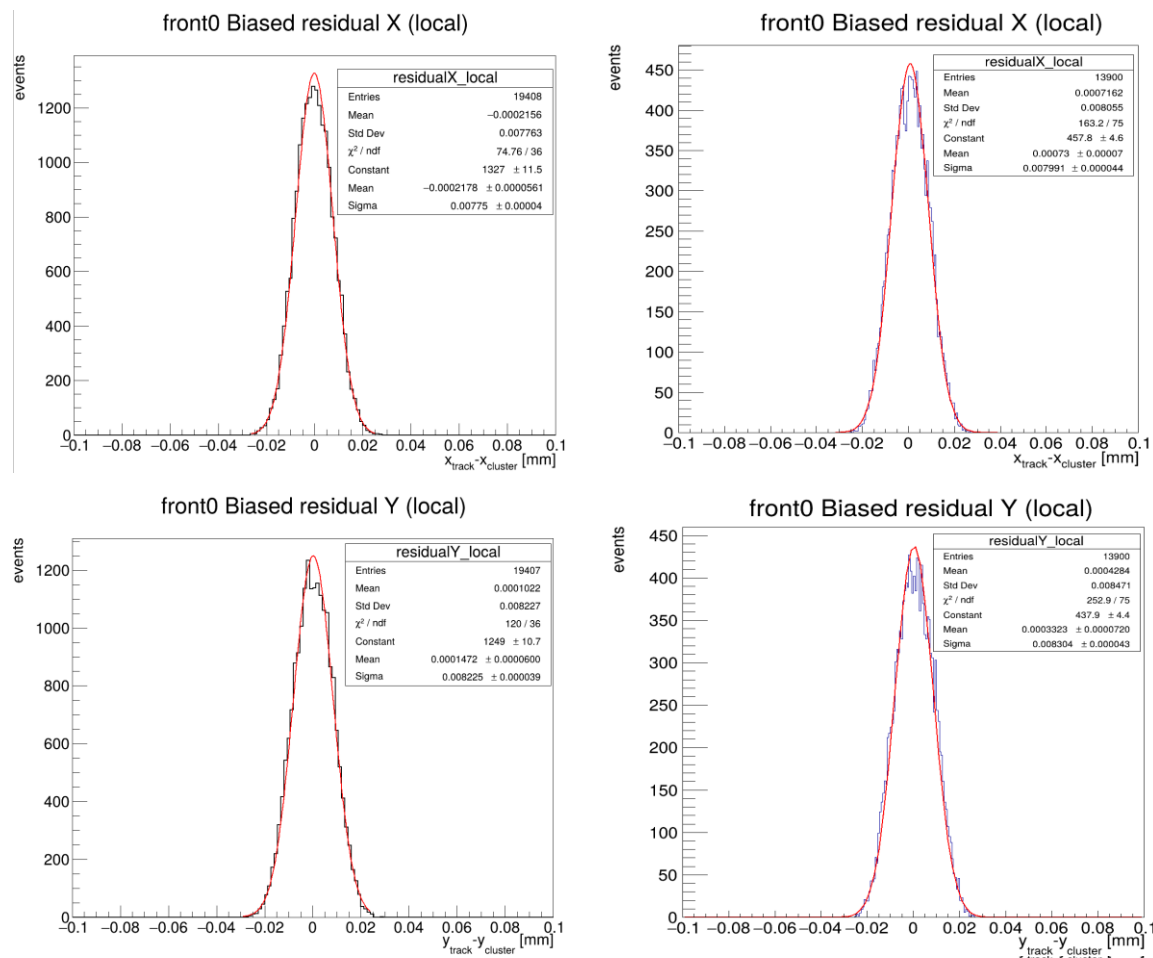
得到原型机的测试结果



离线处理
分离团簇
利用工具分析结果

Corryvreckan典型重建链流程图

X向分辨率在 $6.44\ \mu\text{m} - 8.89\ \mu\text{m}$ 之间，Y方向分辨率在 $8.23\ \mu\text{m} - 11.36\ \mu\text{m}$ 之间；在剔除能量权重后，X方向分辨率在 $7.99\ \mu\text{m} - 9.92\ \mu\text{m}$ 之间，Y方向分辨率在 $8.47\ \mu\text{m} - 11.73\ \mu\text{m}$ 之间。



位置分辨率 (X/Y μm)

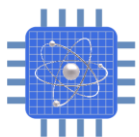
层数	带能量权重	不带能量权重
Layer0	6.44/8.23	7.99/8.34
Layer1	7.13/8.24	8.72/9.66
Layer2	8.89/11.36	9.92/11.73
Layer3	8.14/10.55	9.87/11.41
Layer4	6.44/10.75	8.73/10.61
Layer5	7.97/10.49	8.35/9.77

第一层分辨率示例 (左: 带能量权重)



重离子束流望远镜 未来升级

PART FOUR



重离子束流望远镜未来升级

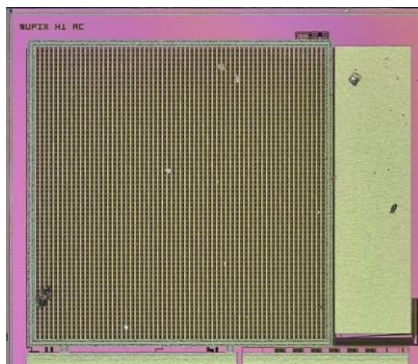


中国科学院近代物理研究所
Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences

重离子束流望远镜通过升级探测器，从Topmetal-M到Nupix-H1，优化了峰值保持电路，实现了更高的能量测量精度，Nupix_H1的MIP响应测试表现良好和位置分辨达到4.55 μm 。



Topmetal-M像素探测器
第一代像素探测器能量测量无法保持峰值。

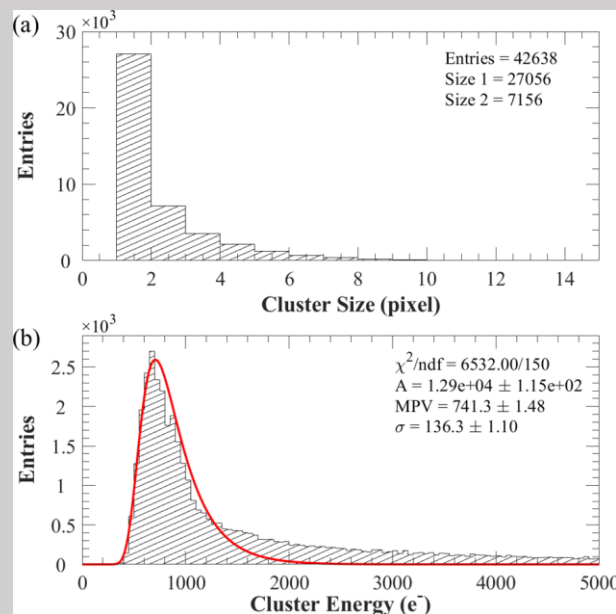
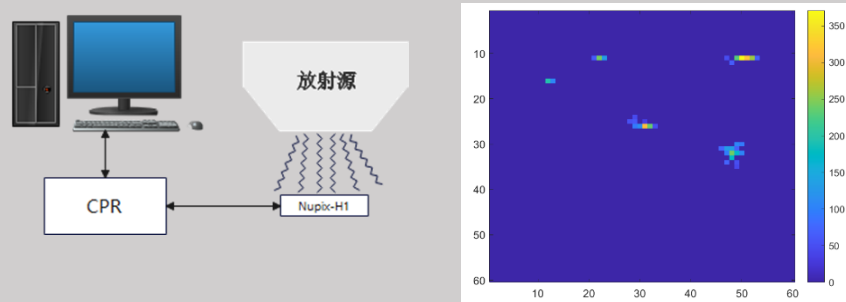


Nupix-H1像素探测器

新一代硅像素探测器电路中设计了**峰值保持电路**，有望实现**更高的能量测量精度**。

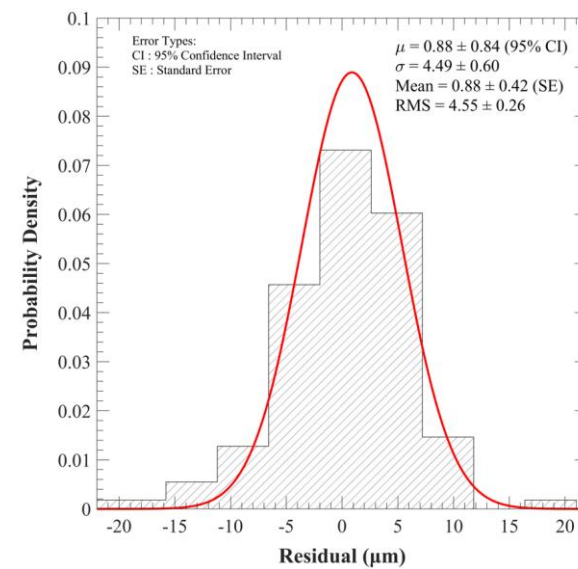
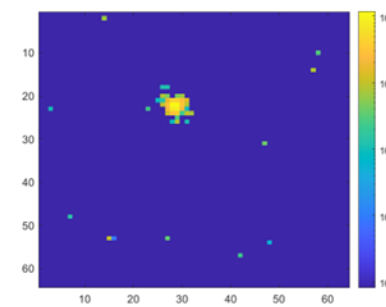
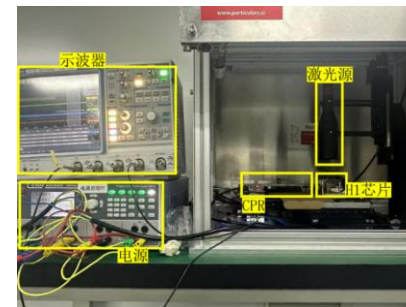
升级

MIP响应测试



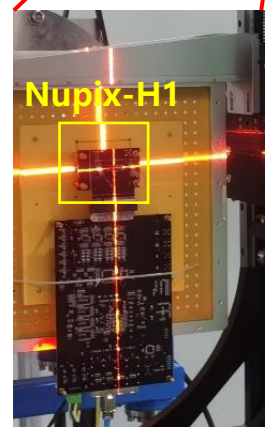
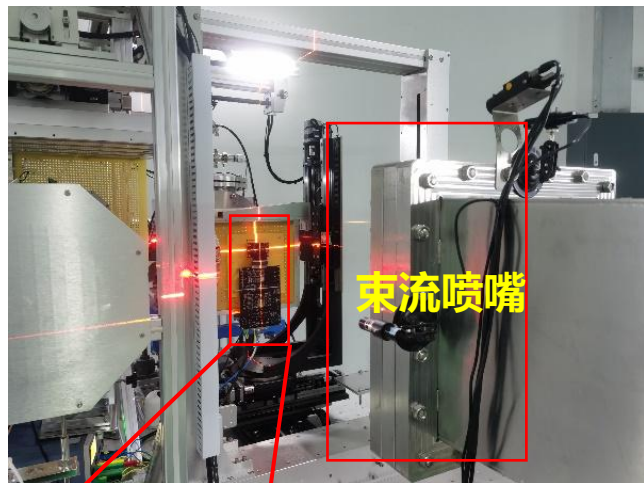
团簇大小：1-2像素 (80%)
MPV 值约为741.3e⁻

位置分辨表征



1064nm激光刻度
位置分辨：4.55 μm

进一步的，使用100MeV/u和200MeV/u能量的质子进行测试，Nupix-H1展现了不同团簇大小的能量分布呈线性关系，为重离子束流望远镜未来升级提供重要数据支撑。



实验条件

地点：SESRI

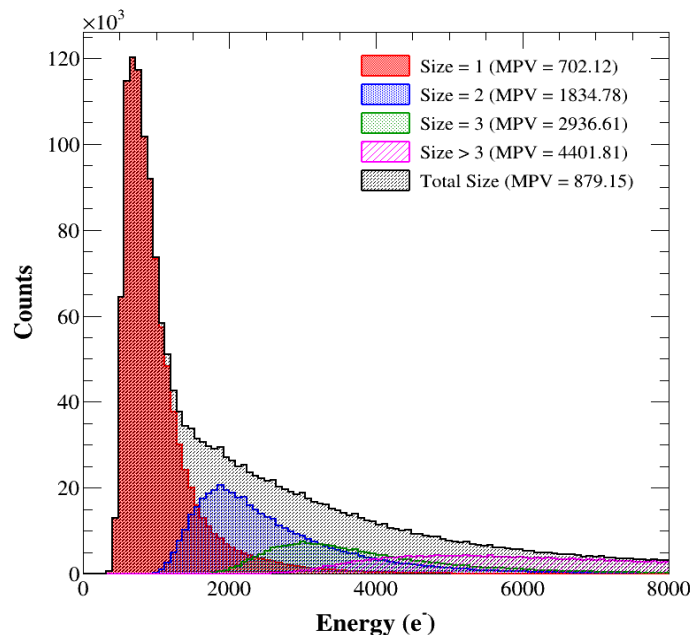
类型：质子

能量：100MeV/u、200MeV/u

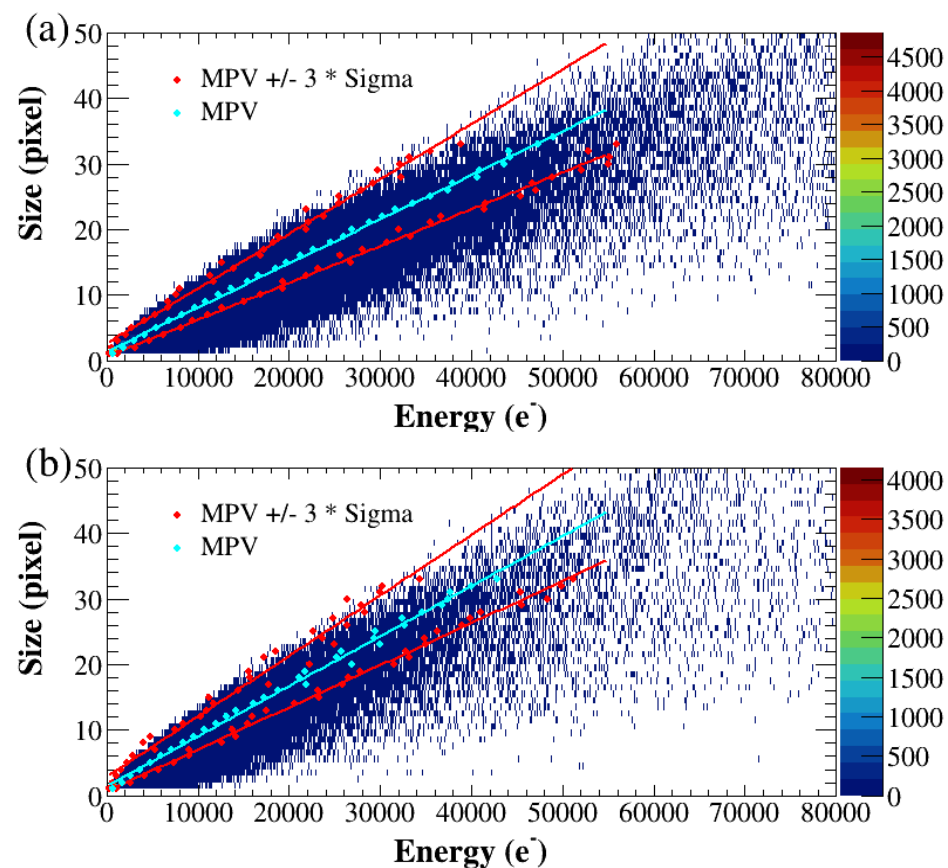
平均注量：

$2\text{E}5\text{-}5\text{E}5 \text{ ions/ (cm}^2\cdot\text{s)}$

100MeV/u下不同团簇分布情况



100MeV/u和200MeV/u团簇vs能量分布



在能量小于50ke-时，不同团簇的能量呈现线性关系



THANKS



中国科学院近代物理研究所
Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences