

散裂中子源质子 束流望远镜系统 的研制

李岚坤^{1,3}，董明义^{1,2}，高泽^{1,3}
金梁程龙¹，章红宇¹，喻英豪⁴，
敬罕涛¹，樊瑞睿¹，郭宇航¹，董静¹

1.核探测与核电子学国家重点实验室，中国
科学院高能物理研究所

2.中国科学院大学

3.郑州大学，物理学院

4、南华大学，核科学技术学院

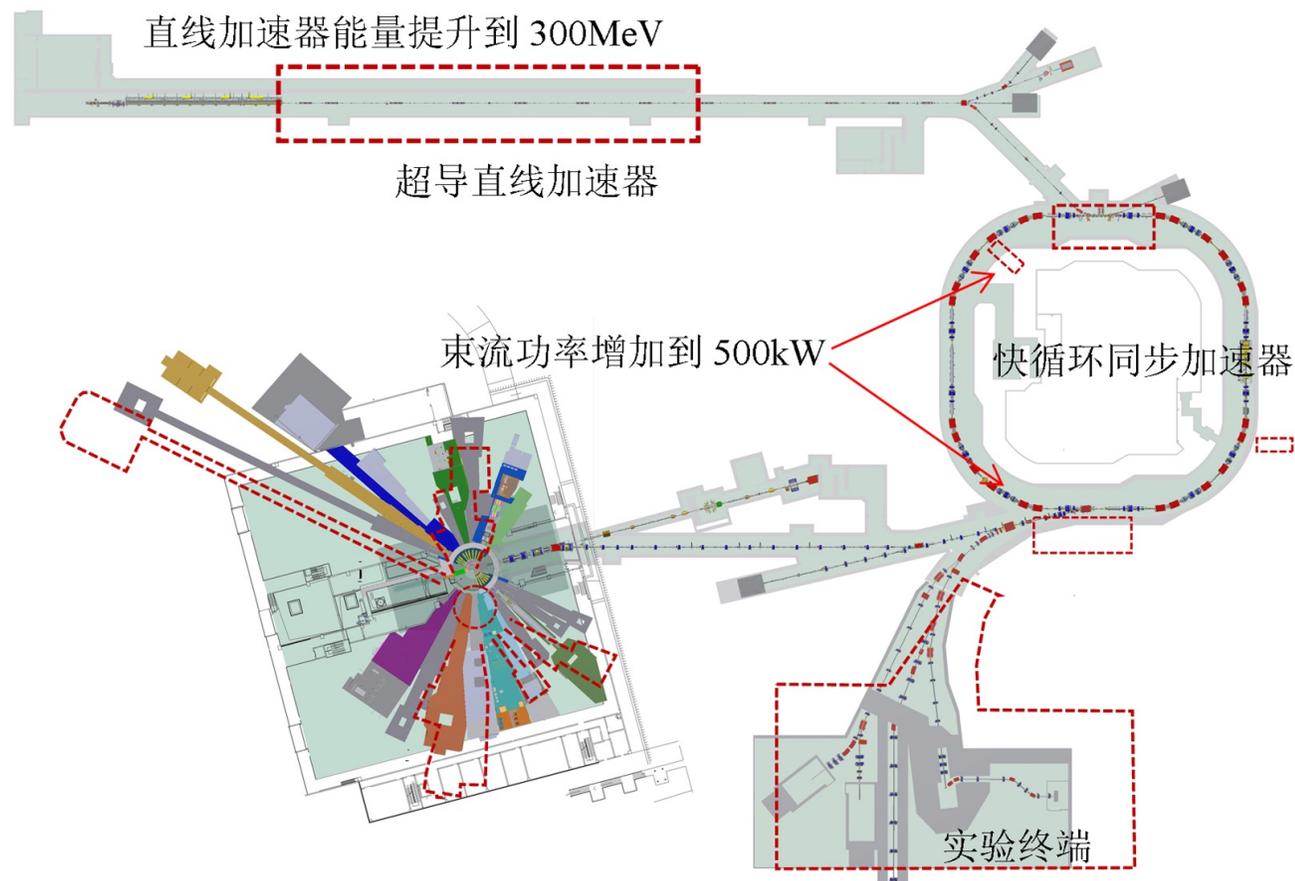
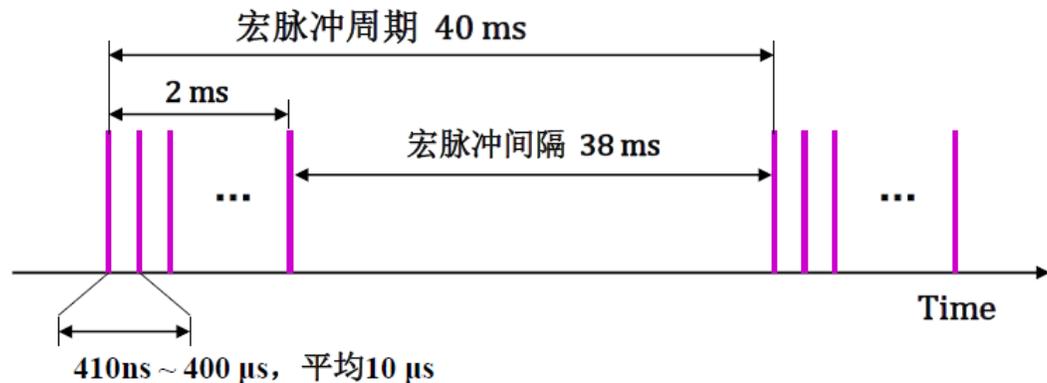
July.17.2024

目录

- 高能质子实验终端
 - 整体介绍
 - 谱仪探测系统
- 束流望远镜系统
 - 整体设计
 - 探测模块
 - 电子学系统
- 束流实验初步测试
 - 分析算法
 - 实验结果

高能质子实验终端 (HPES)

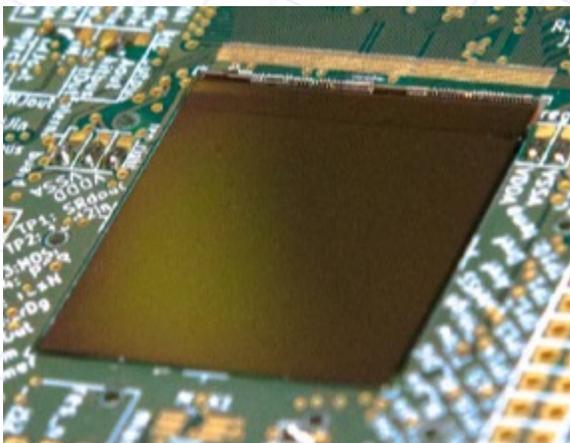
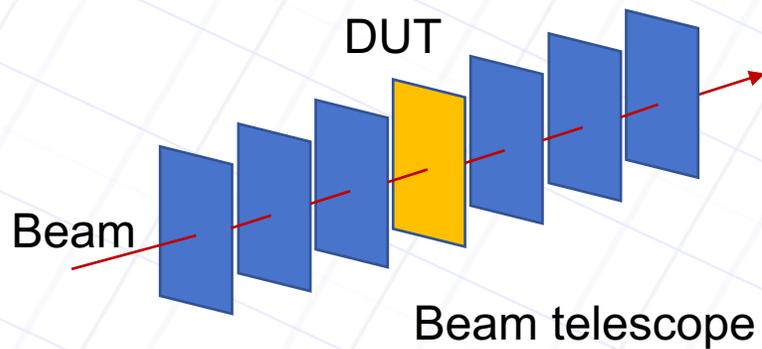
- CSNS二期建设的实验线站之一
- 国内唯一一台**专用高能粒子测试束线**
- 束流能量 **0.8 ~ 1.6 GeV**
- 通过环散射器引出准单粒子束流
- 具有能量高、能散小、准直性好、事例率高等优点
- 探测器研发过程中**不可或缺**的测试工具



谱仪探测系统

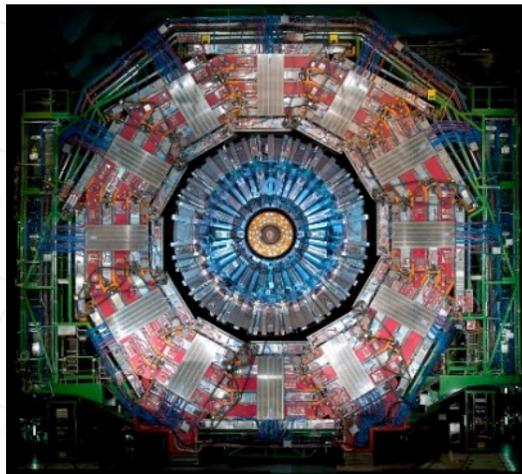
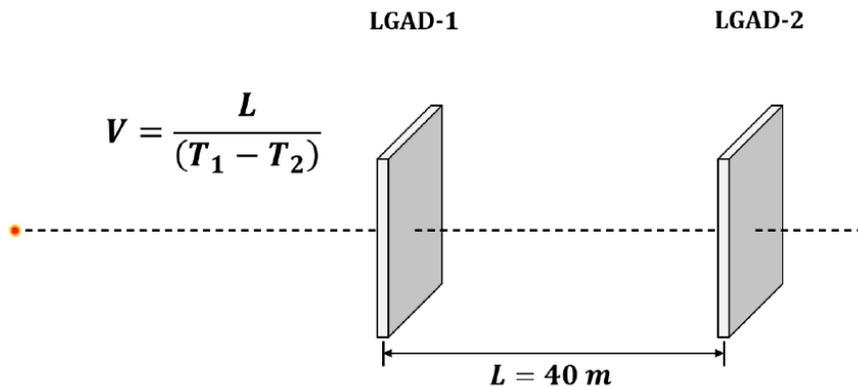
束流望远镜系统:

- 6层硅像素探测器组成
- 为待测设备 (DUT) 提供高精度的参考径迹
- 用于径迹探测器的性能研究



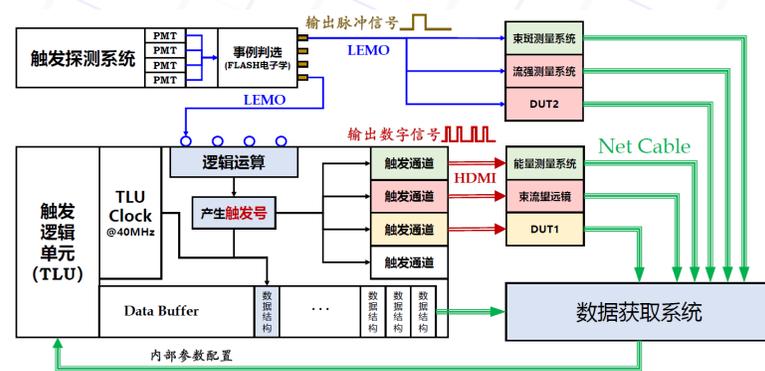
能量测量系统:

- 由间隔40 m的两个LGAD探测器组成
- 通过飞行时间 (TOF) 测量质子能量
- 用于量能器的标定



触发探测器系统

- 前后共3组塑闪探测器提供触发信号
- 通过触发逻辑单元 (TLU) 分发触发号

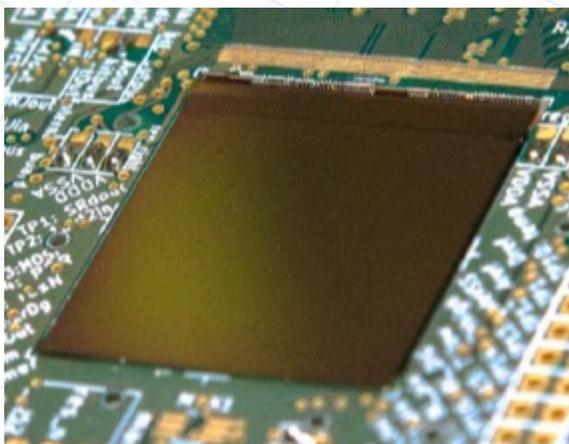


- 流强在线测量系统
- 流强刻度系统
- 束斑测量系统

束流望远镜

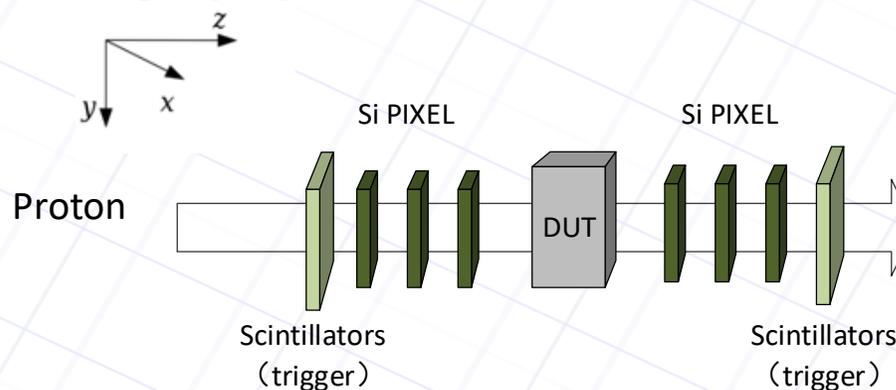
束流望远镜系统:

- HPES谱仪探测系统的核心
- 由6层硅像素探测器组成
- 高能质子垂直穿过6层望远镜系统和DUT (束流沿方向)
- 为待测设备 (DUT) 提供高精度的参考径迹
- 参考径迹在DUT测量平面的投影和DUT测量位置的残差→DUT空间分辨率



主要性能参数设计目标:

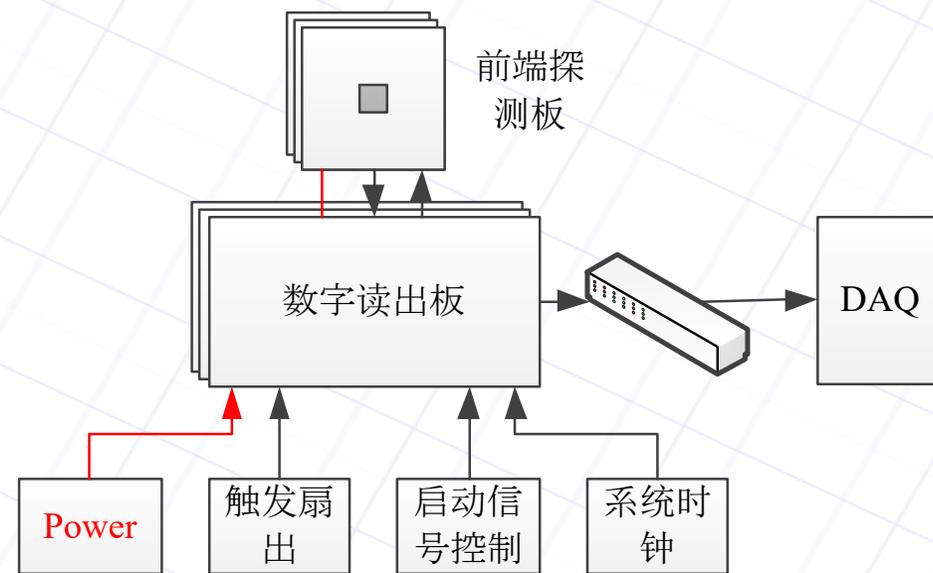
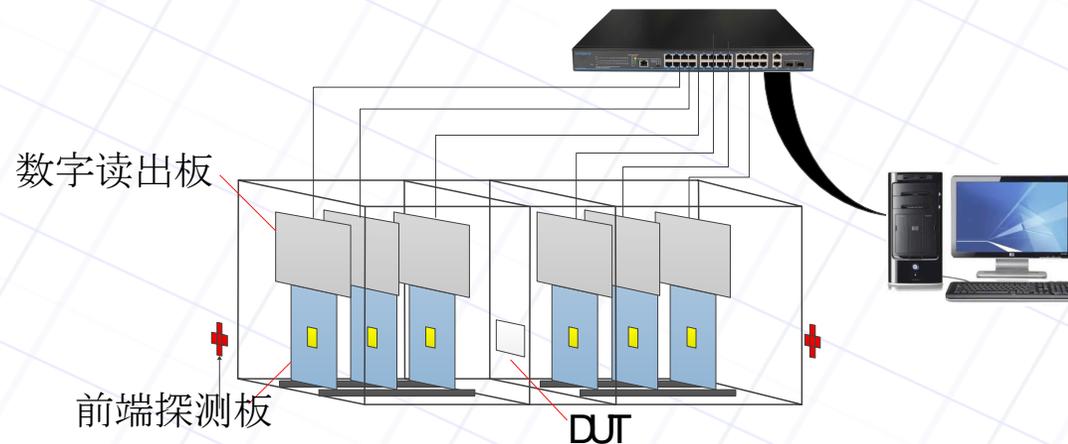
主要参数设计目标	HPES质子束流望远镜
望远镜层数	6
灵敏区面积 / cm^2	$> 3 \text{ cm}^2$
单层物质质量 / $\% X_0$	< 0.10
径迹位置分辨率 / μm	$< 10@1.6\text{GeV}$



束流望远镜

束流望远镜系统主要组成:

- 6层望远镜探测模块, 包括MAPS型硅像素芯片、前端PCB板和屏蔽盒
- 电子学系统, 用于配置芯片、提供电源和外部时钟、数据打包和传输等
- DAQ系统, 进行望远镜探测模块的独立控制和数据接收, 并提供在线监测功能
- 触发探测器+触发逻辑单元提供触发信号
- 冷却系统和高精度实验测试台等



束流望远镜

- 望远镜系统的模拟：
 - 模拟能量：1.6 GeV的质子源
 - 探测器模型：6层望远镜系统+DUT，每层物质量为0.088% X₀，间距20 mm
 - 芯片像素尺寸设置为：20.7 μm

- 空间分辨率：
 - DUT的测量残差 ~ 4.8 μm

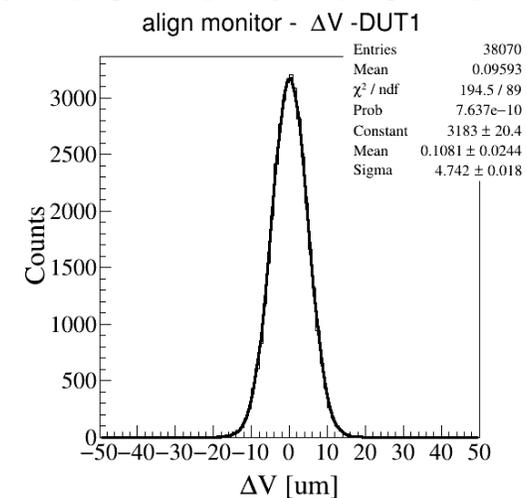
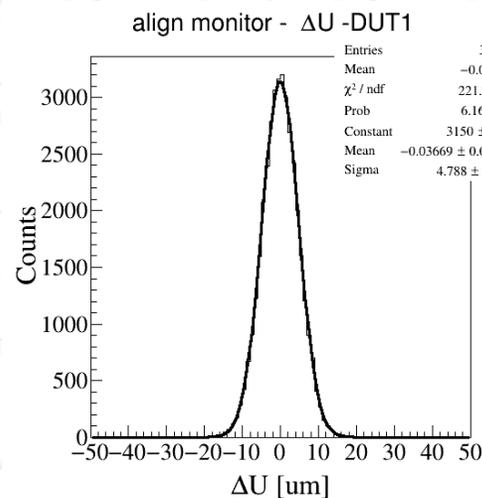
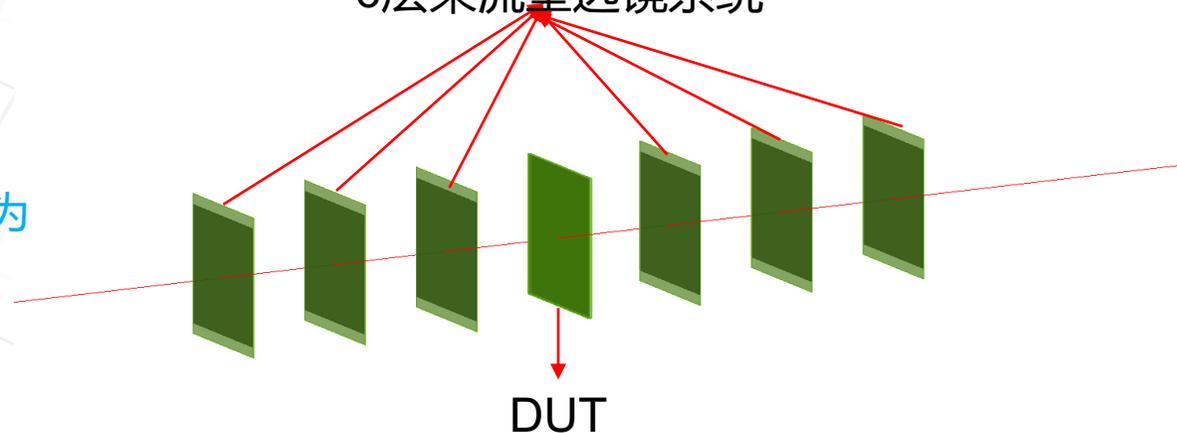
$$\sigma_{\text{meas}}^2 = \sigma_{\text{DUT}}^2 + \sigma_{\text{tel}}^2$$

$$\sigma_{\text{tel}}^2 = k\sigma_{\text{DUT}}^2$$

$$k = \frac{\sum_i^N z_i^2}{N \sum_i^N z_i^2 - \left(\sum_i^N z_i\right)^2}$$

- DUT的空间分辨率 ~ 4.4 μm
- **望远镜系统的空间分辨率约 2 μm**

6层束流望远镜系统



束流望远镜

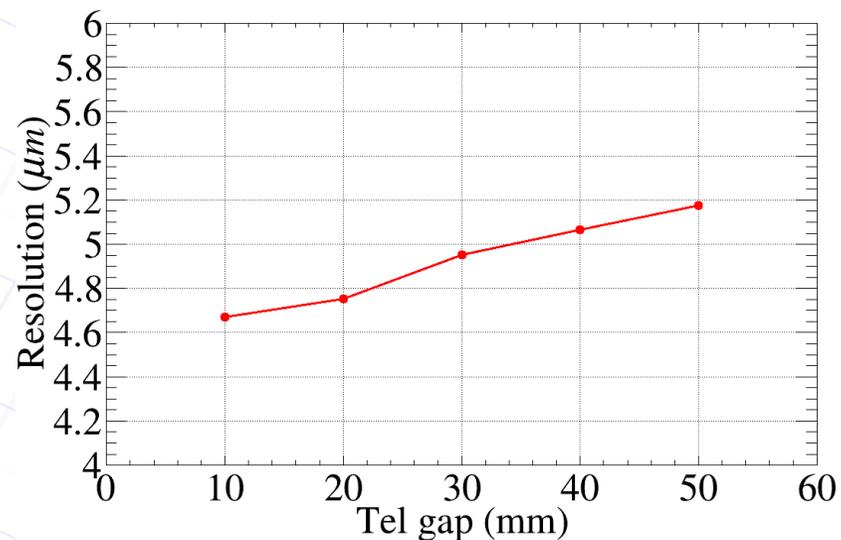
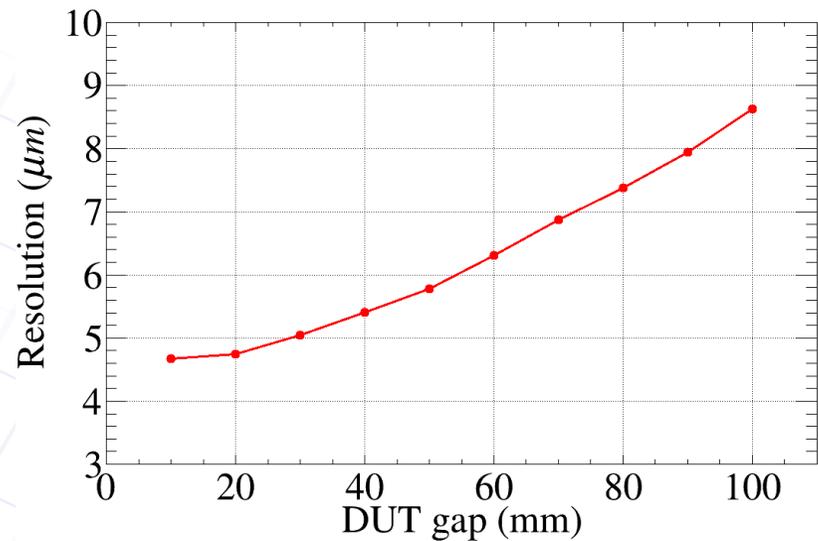
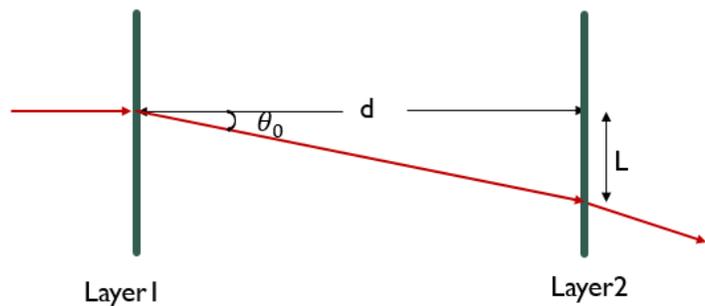
- 多次库伦散射:

$$\theta_0 = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c p} Z \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left(1 + 0.038 \ln \left(\frac{x}{X_0} \right) \right)$$

- 多次库伦散射带来的位置偏差:

$$L = d\theta_0$$

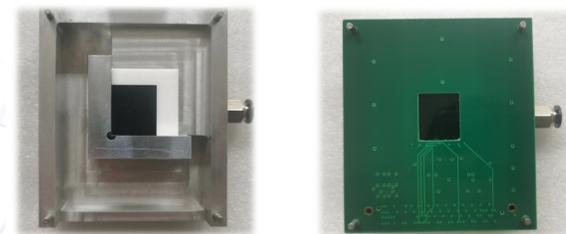
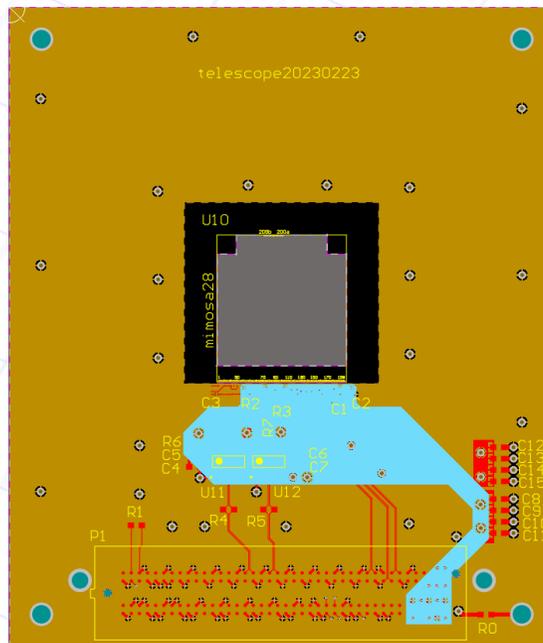
- 减少物质质量, 减少DUT与前后望远镜层的间距, 或减少望远镜层之间的间距都可以有效提高DUT的位置测量精度



望远镜探测模块

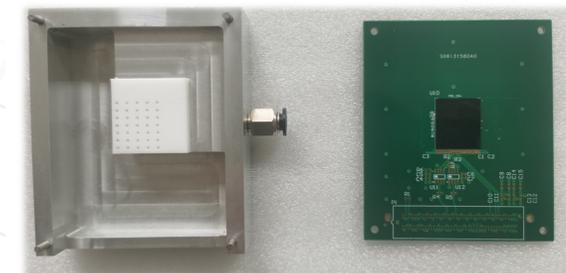
望远镜探测模块

- 采用MIMOSA-28芯片
 - 像素尺寸 $20.7\ \mu\text{m}$ → 空间分辨好于 $5\ \mu\text{m}$
 - 芯片尺寸 $22.22\ \text{mm} \times 22.71\ \text{mm}$ → 灵敏区面积约 $3.8\ \text{cm}^2$
 - 读出时间为 $185.6\ \mu\text{s}$
- 前端PCB板
 - 采用镂空设计，低质量的镂空区域的面积约 $3.6\ \text{cm}^2$ ，物质量约 $0.088\%X_0$ ($50\ \mu\text{m}\ \text{Si} + 100\ \mu\text{m}\ \text{Kapton}$ 遮光薄膜)
 - 通过FMC接口连接到后端电子学系统
- 铝制屏蔽盒用于保护芯片
- 搭建了6层束流望远镜的初步测试系统
 - 通过滑轨改变望远镜层间距
 - 通过水冷降低探测模块温度

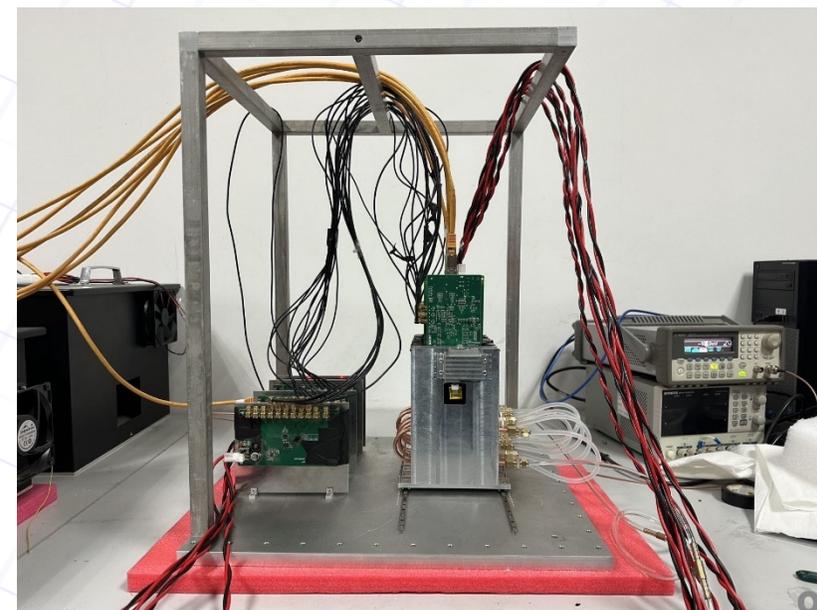
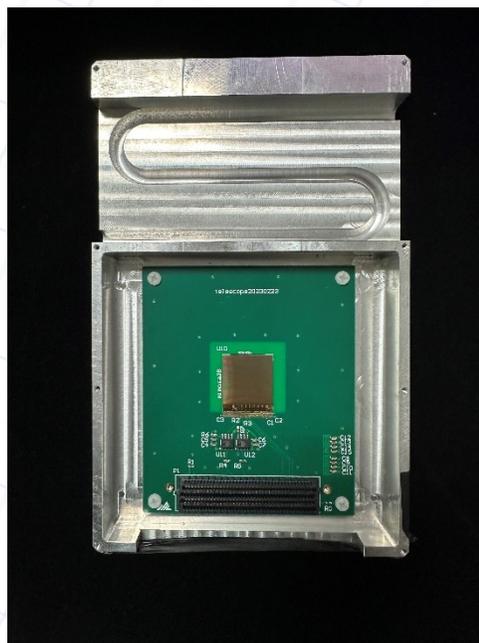


(a) 芯片放置

(b) 前端板放置



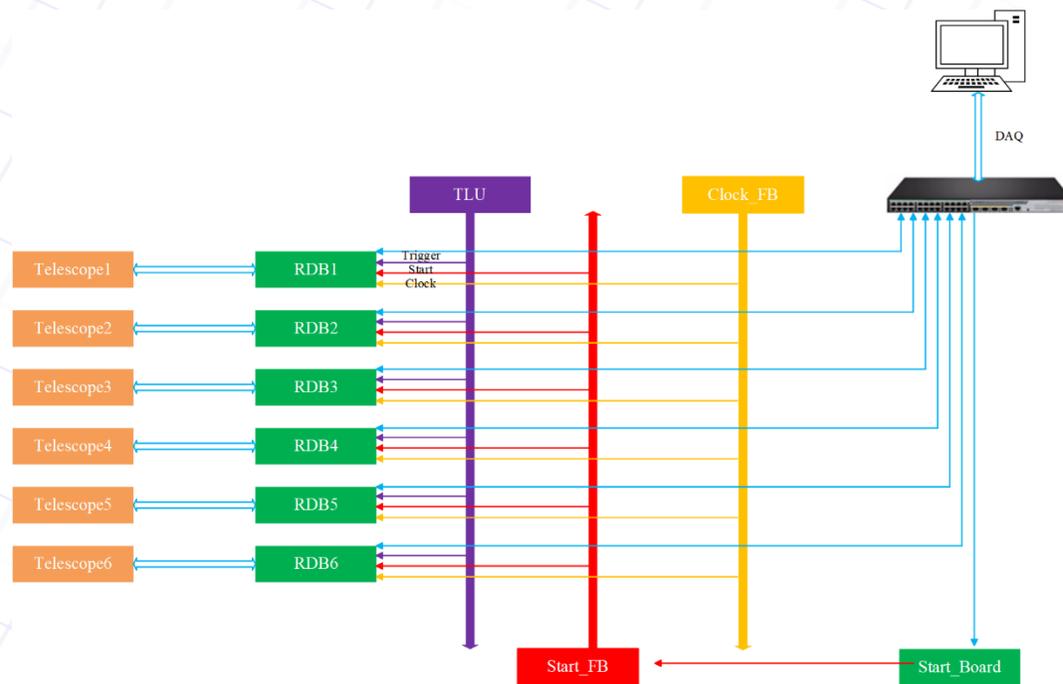
(c) 完成芯片工装



电子学系统

电子学系统

- 前端PCB板, 通过FMC接口连接后端电子学系统
- 数字读出板, 用于配置芯片、提供电源和时钟信号, 数据的接收、打包和传输等
- Start信号扇出板, 接收并分发Start和Stop控制信号
- 外部时钟扇出板, 用于提供100 MHz的外部时钟
- 初步测试系统中采用闪烁体提供脉冲信号作为触发, 并通过触发扇出板分发给探测模块



数字读出板



Start扇出板



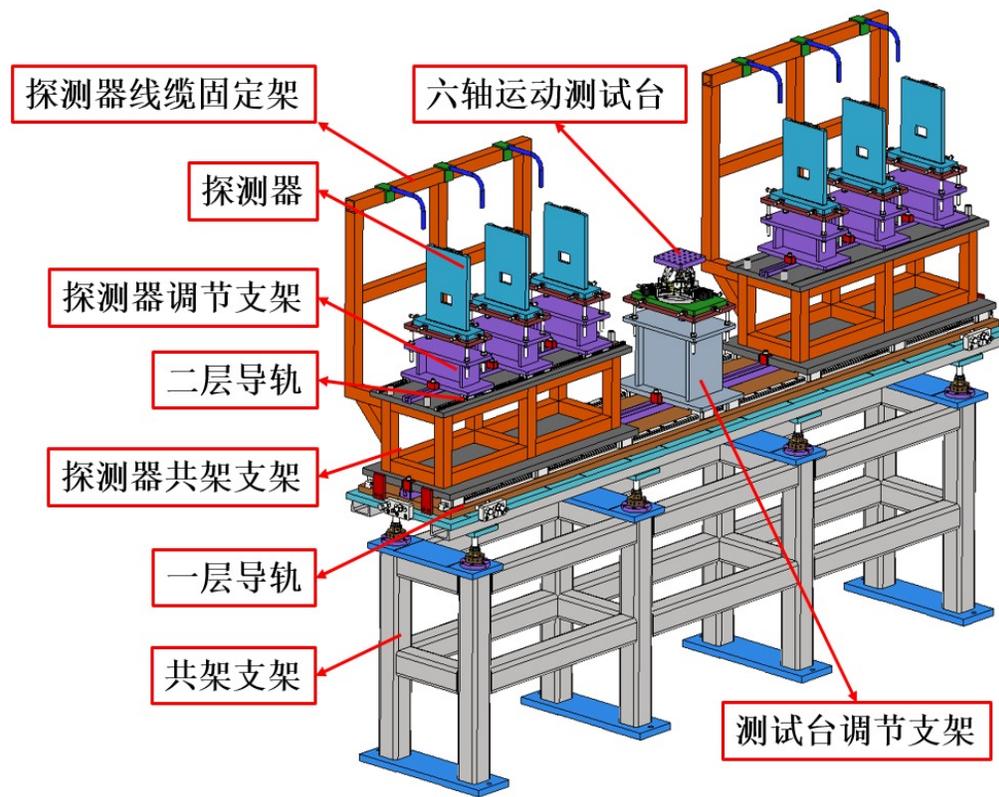
时钟扇出板



触发扇出板

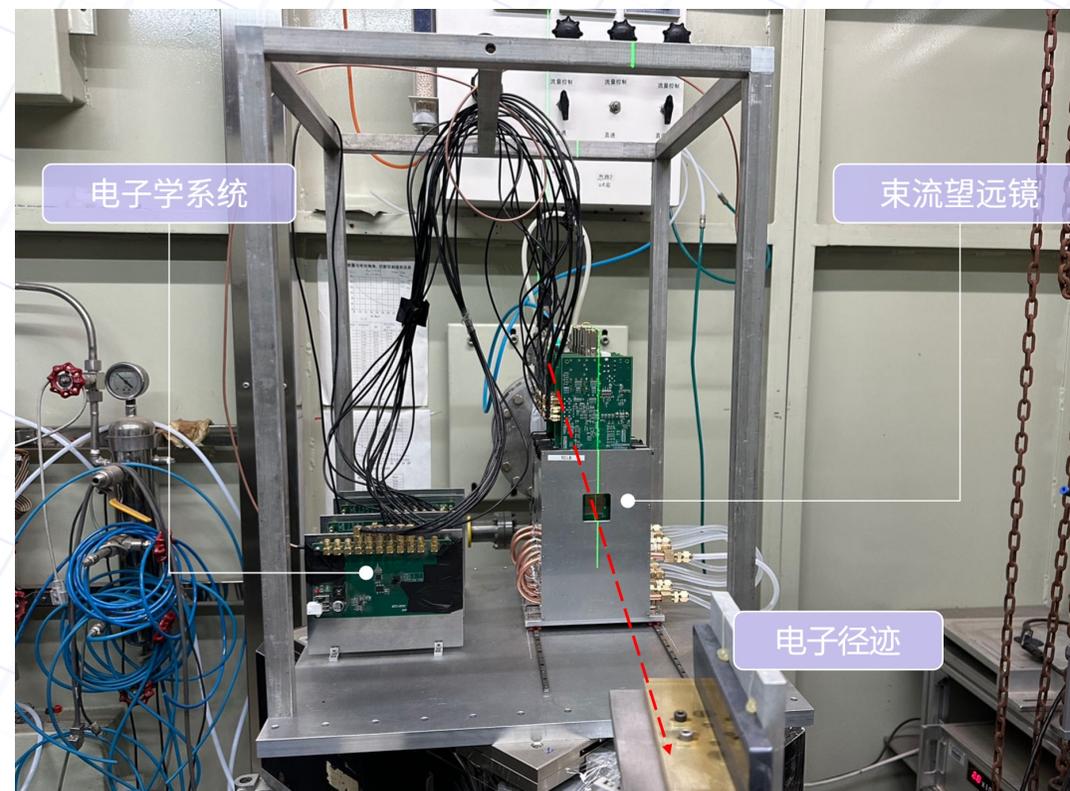
高精度实验测试台

- 6层望远镜探测模块分别安装在两个探测器共架支架
- DUT安装在六轴运动测试台→实现DUT在z方向的前后移动和任意方向的调节，最大行程 $\pm 30\text{mm}$ ，转动角度 $\pm 12^\circ$ ，重复定位精度在 0.001mm 以内。
- 一层导轨用于调节DUT和望远镜系统的间距，总长 3.2 m
- 二层导轨用于调节望远镜探测模块的间距，总行程为 1 m
- 6个探测器调节支架用于校准望远镜系统的位置



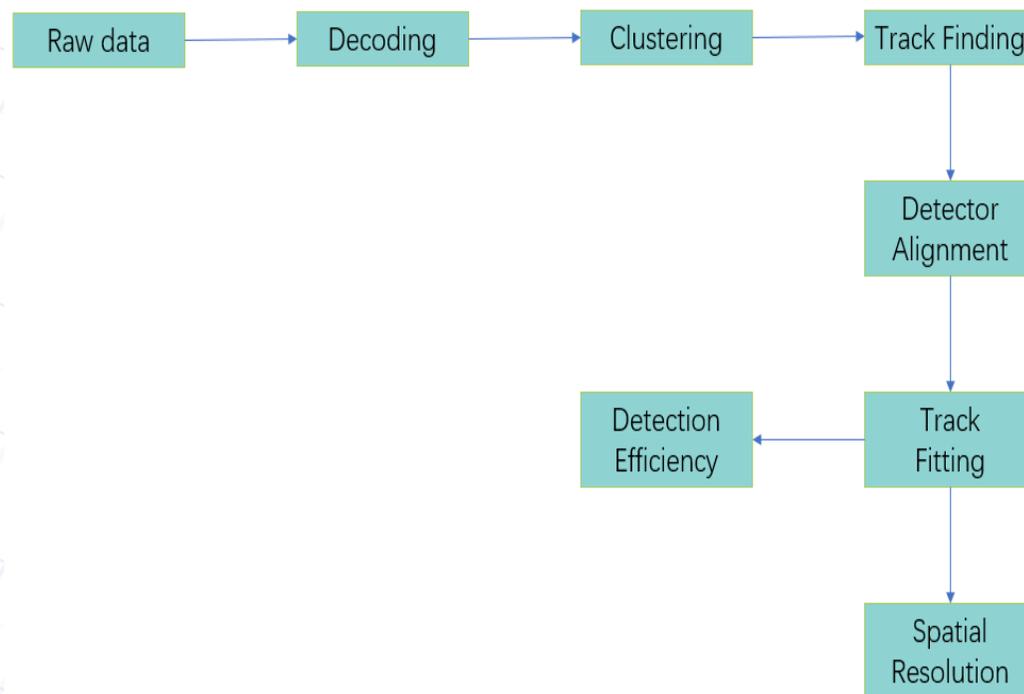
望远镜系统束流实验

- 束流能量 ~ 1.3 GeV, 能散较大
- 探测器系统
 - 6层望远镜系统, 以第三层为DUT
 - 望远镜系统每层间距为25 mm
- 闪烁体提供触发信号
- 初步研究束流望远镜系统在不同阈值、间距和质量下的空间分辨率和探测效率



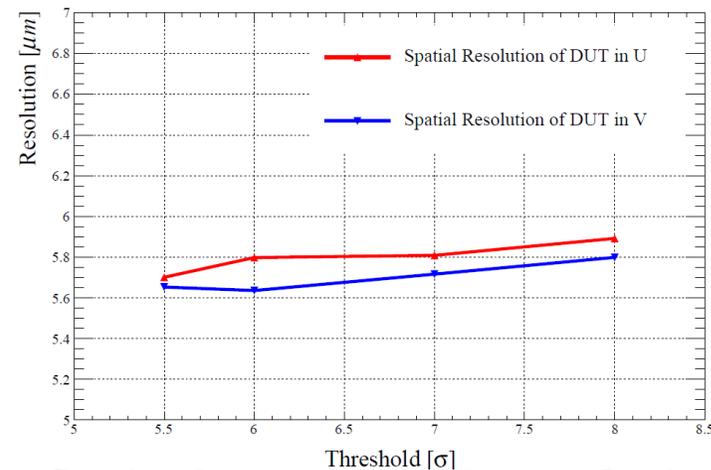
离线分析软件

- 为待测设备提供探测器校准、参考径迹的重建和性能分析
- 主要功能包括：
 - 数据解包 (Decoding)
 - 簇团重建 (Clustering)
 - 径迹寻迹 (Track Finding)
 - 探测器校准 (Detector Alignment) : 基于最小卡方的校准算法
 - 径迹重建 (Track Fitting) : 基于最小卡方的径迹重建算法或基于Kalman滤波的径迹重建算法

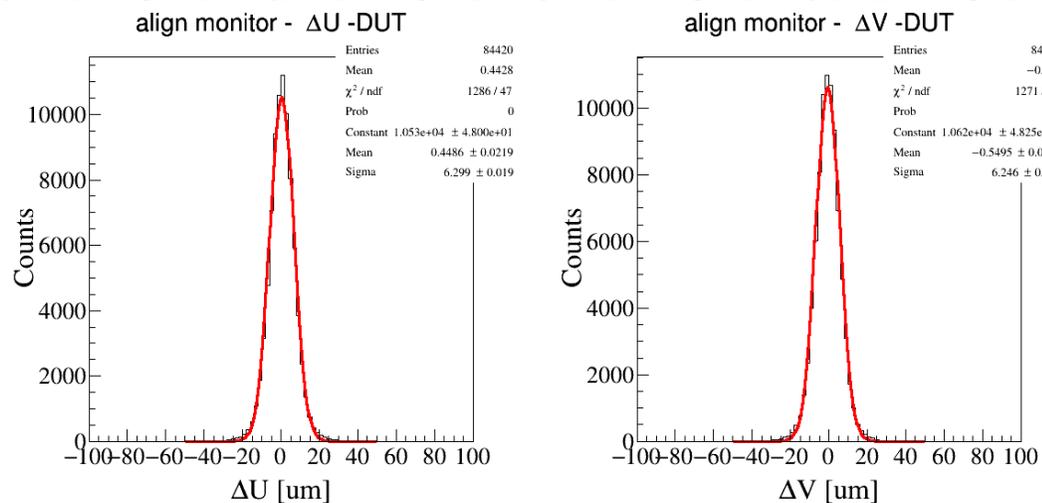


测试结果

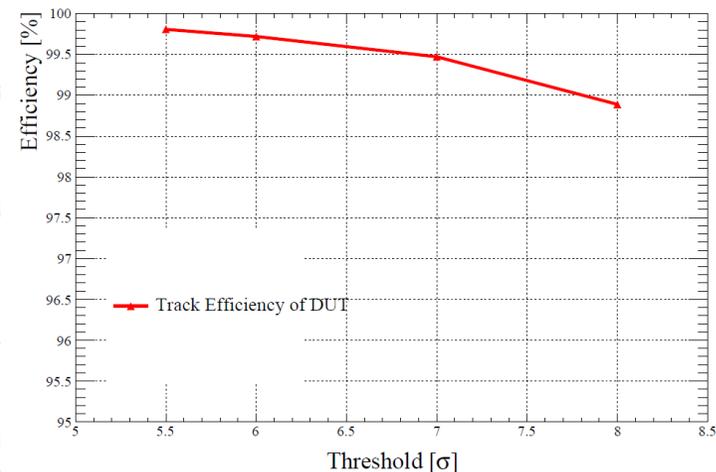
- DUT测量残差
 - 束流能量 ~ 1.3 GeV, 以第三层作为DUT
 - DUT测量残差 ~ 6.3 μm (阈值5.5 σ)
- DUT空间分辨率
 - DUT空间分辨率约5.7 μm , 望远镜分辨率: ~ 2.7 μm
- DUT的探测效率好于99.5%



DUT的测量残差随阈值的变化关系



阈值为5.5 σ 时DUT的测量残差分布



DUT探测效率随阈值的变化关系

测试结果

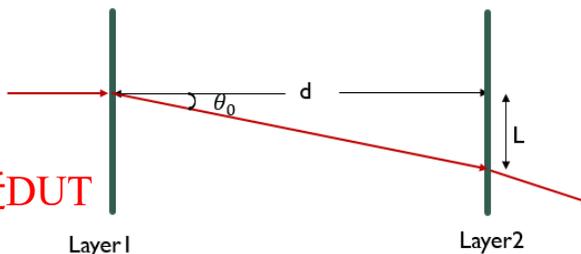
□ DUT与望远镜层间距的影响

➤ 利用滑轨，改变DUT与前后层间距分别为25-75 mm

➤ 多次库仑散射导致的位置偏差：

$$L = d \theta_0$$

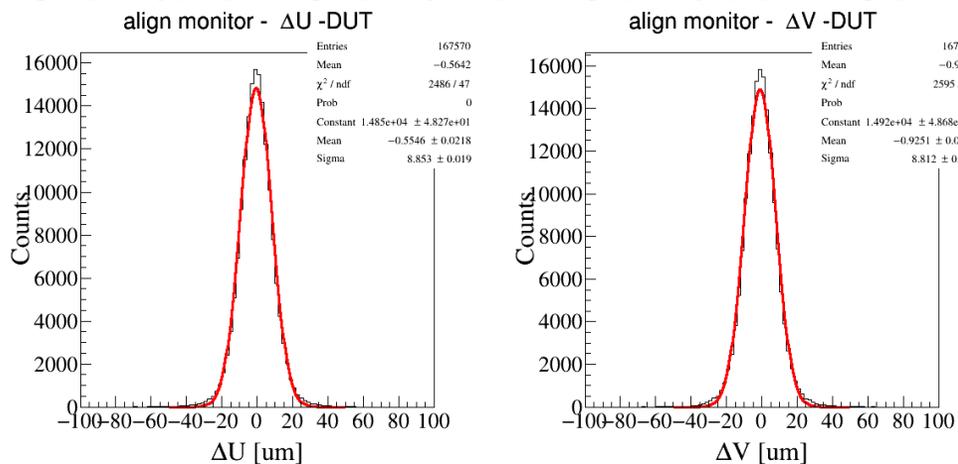
➤ 束流实验时望远镜系统应尽可能靠近DUT



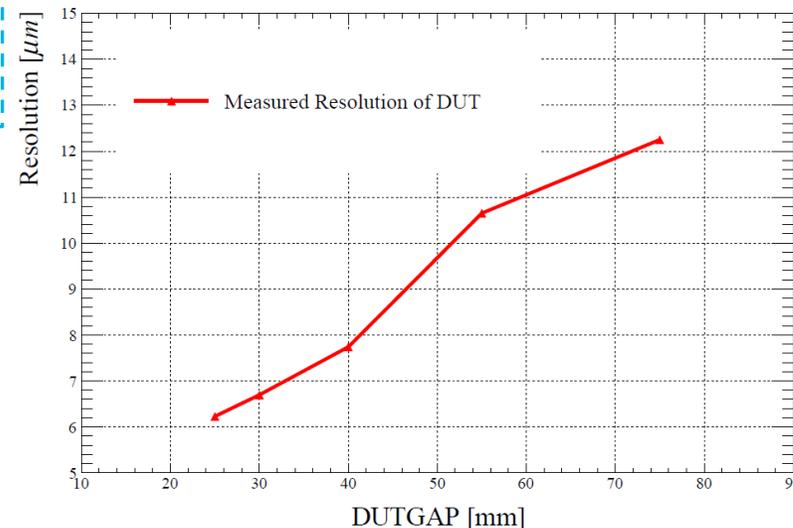
□ DUT质量的影响

➤ 在DUT背后放置一层1 mm厚的铝板→DUT质量约1.2% X_0

➤ DUT的空间分辨率(已扣除望远镜贡献)约8.4 μm ，变差了约33%



质量为1.2% X_0 时
DUT的测量残差分布



DUT测量残差随DUT与望远镜层
间距的变化关系

总结

- 完成了6层质子束流望远镜系统的设计，望远镜系统的**分辨预期约 $2\ \mu\text{m}$**
- 研制了**质量为 $0.088\%X_0$** 的望远镜探测模块，初步搭建了6层束流望远镜测试系统，验证了探测模块的功能正常
- 通过束流实验初步测试了6层束流望远镜系统的性能，在1.3 GeV时，**DUT的空间分辨率 $\sim 5.7\ \mu\text{m}$ ，望远镜系统的空间分辨率 $\sim 2.7\ \mu\text{m}$ ，探测效率好于99.5%**
- 后续将进行望远镜系统的优化、电子学系统的升级，和离线分析软件的开发等工作

**Thanks for your
attention !**

Back up

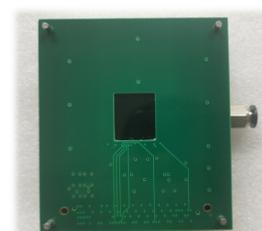
探测模块制作

高精度贴片及打线

- 通过L型定位面精确摆放芯片
- 打开抽气系统，移走L型定位面
- 通过定位销和PCB板上的定位孔精确放置前端芯片板
- 探测模块均匀受压以充分粘接
- 使用Hesse BJ855全自动引线键合机完成打线



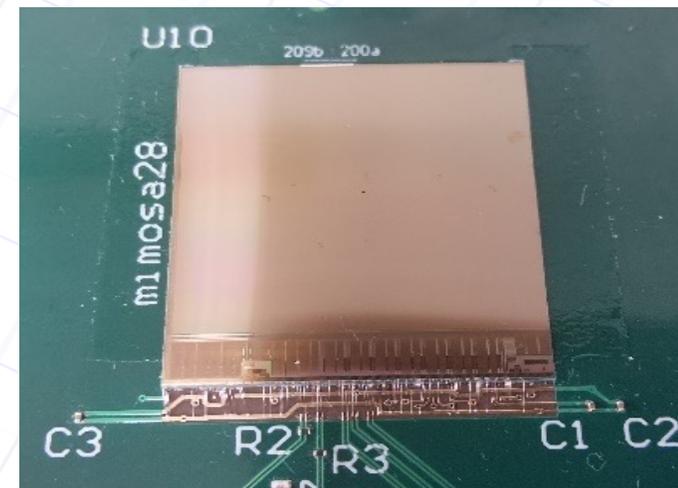
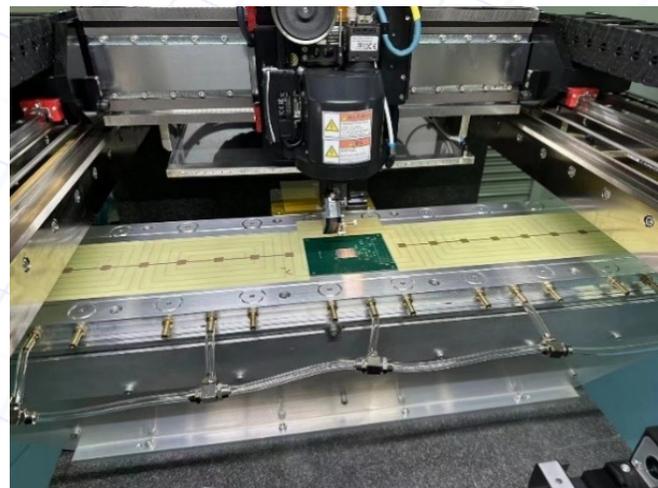
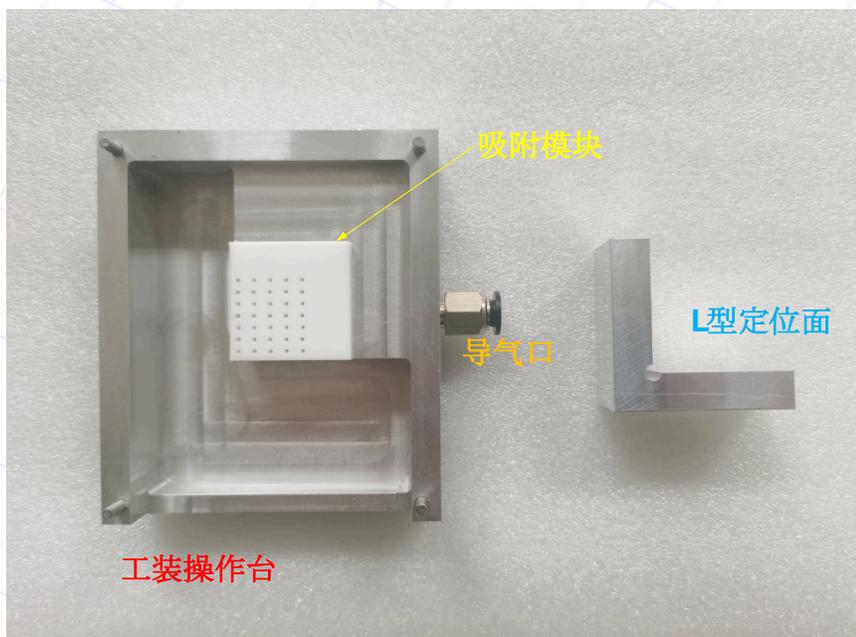
(a) 芯片放置



(b) 前端板放置



(c) 完成芯片工装



束流望远镜系统研制进展

✓ 已完成全部望远镜探测模块的阈值扫描测试

➤ MIMOSA芯片甄别器阈值电压设置:

$$\Delta V = V_1 - V_2$$

MIMOSA28芯片被分为4个Bank, 通过4个Bank独立的寄存器V1和芯片共用的V2设置阈值

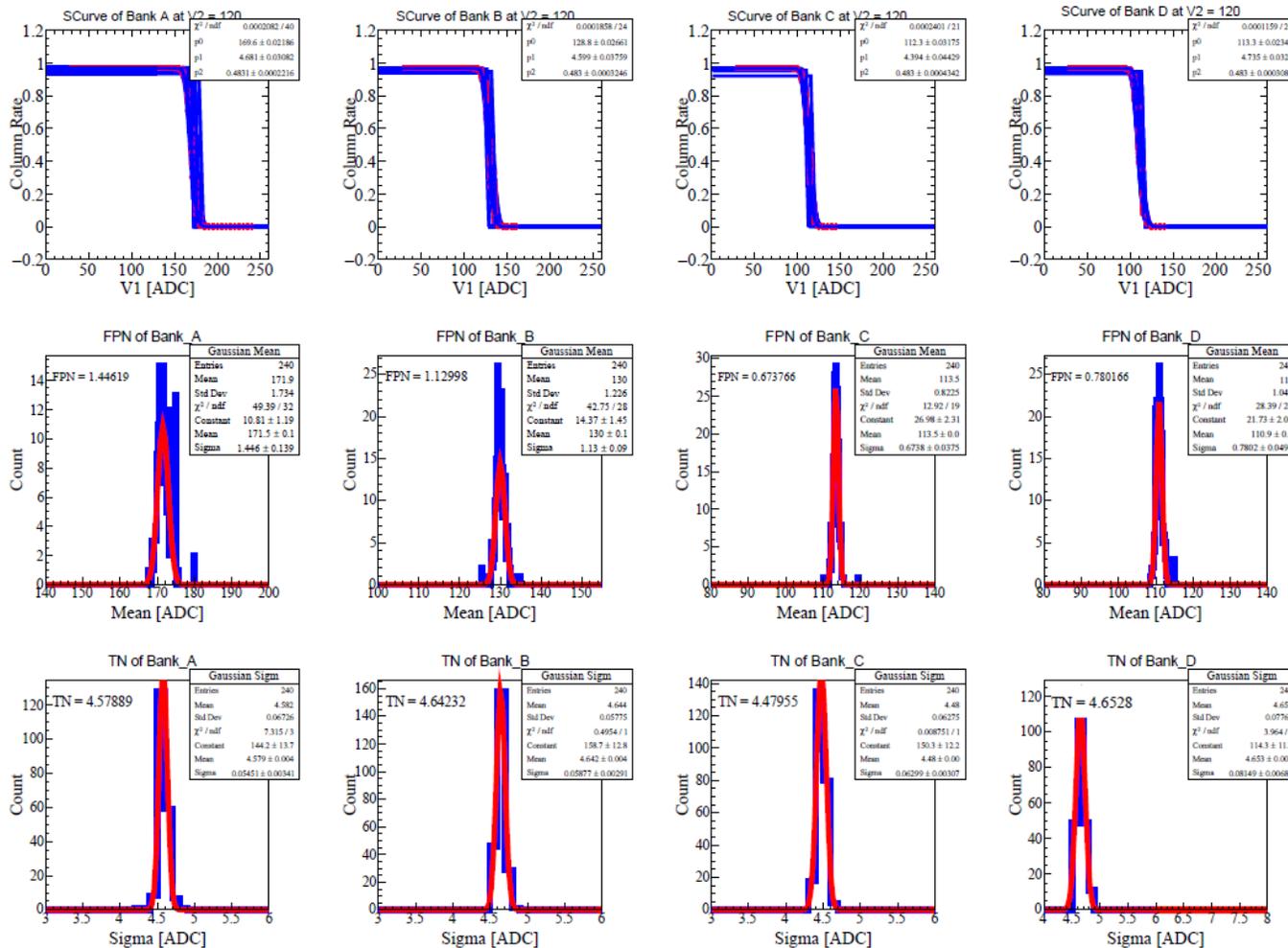
➤ 芯片噪声可分为固态模式噪声FPN和暂态噪声TN

➤ 芯片噪声定义为:

$$\sigma = \sqrt{FPN^2 + TN^2}$$

➤ 甄别器阈值设置:

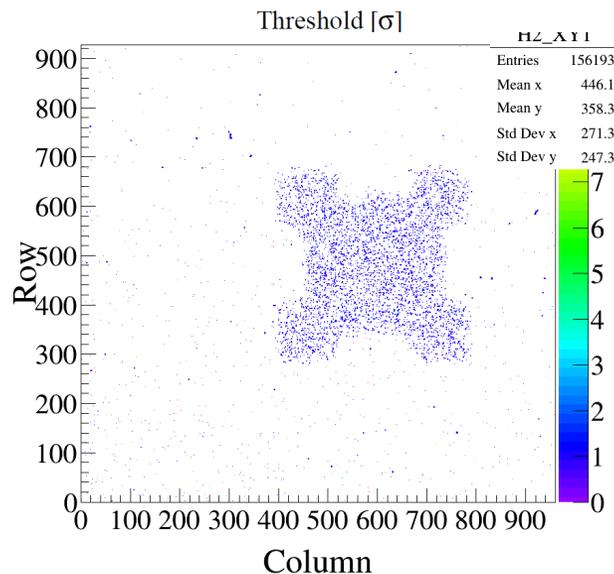
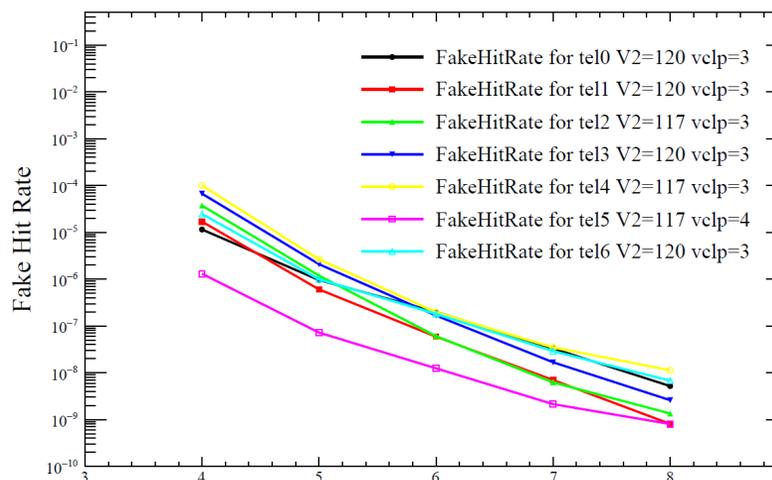
$$Mean_{FPN} + n\sigma$$



束流望远镜系统研制进展

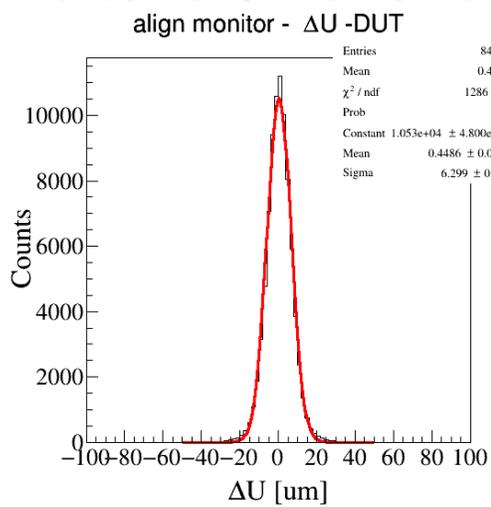
- ✓ 已完成全部望远镜探测模块的阈值配置，在阈值 $> 5.5 \sigma$ 时，噪声引起的FakeHitRate $< 10^{-6}$
- ✓ 通过 ^{55}Fe 放射源验证了探测模块的响应、DAQ系统取数和数据解包等功能正常
- ✓ 已完成了6层望远镜探测模块的同步读出，长时间工作状态下触发号和帧号完全对齐

FakeHitRate VS Threshold

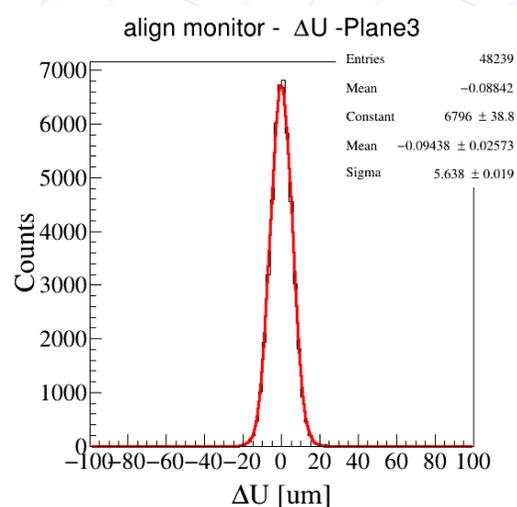
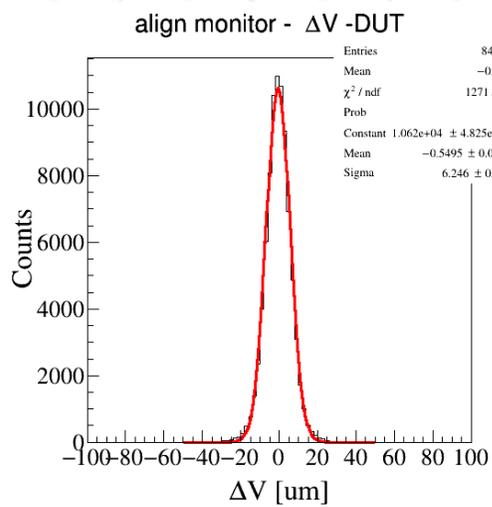


模拟残差

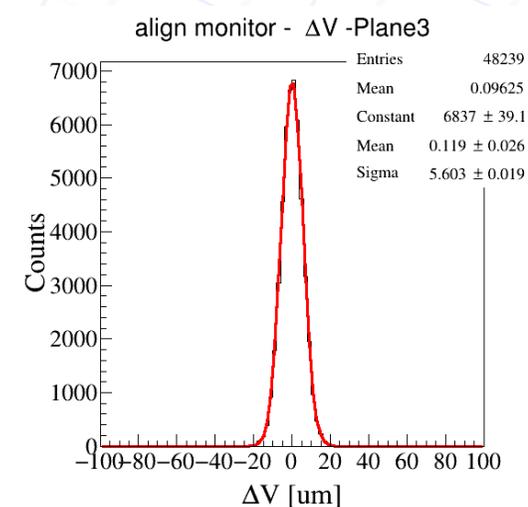
模拟残差 $\sim 5.6 \mu\text{m}$ \rightarrow 模拟未考虑能散



阈值为 5.5σ 时DUT的测量残差分布



Allpix2模拟所得的DUT测量残差分布



探测器校准

探测器校准:

第一步 获取探测器初始偏移:

- 方法: 径迹入射方向基本垂直于芯片→相邻两层同一径迹产生的击中坐标残差分布均值=相邻两层XY方向的偏移

探测器校准:

- 使用最小卡方算法或线性回归的方式计算六个校准参数

- 校准参数M:

$$M = (\Delta u, \Delta v, \Delta w, \Delta \alpha, \Delta \beta, \Delta \gamma)$$

- 测量残差和校准参数的关系可以表示为:

- 测量残差

$$r_j = J_j^T M^T \quad r_j = \begin{pmatrix} u_j^c - u_j \\ v_j^c - v_j \end{pmatrix}$$

- 雅可比矩阵

$$J_j^T = \begin{pmatrix} -1 & 0 & \tan \phi & v_j \tan \phi & u_j \tan \phi & v_j \\ 0 & -1 & \tan \psi & v_j \tan \psi & u_j \tan \psi & -u_j \end{pmatrix}$$

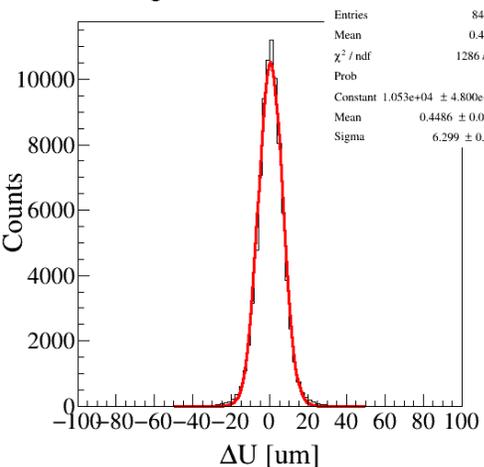
其中 $\tan \phi$ 和 $\tan \psi$ 分别是径迹在XZ和YZ平面的斜率

- 构造函数和线性回归计算校准参数M

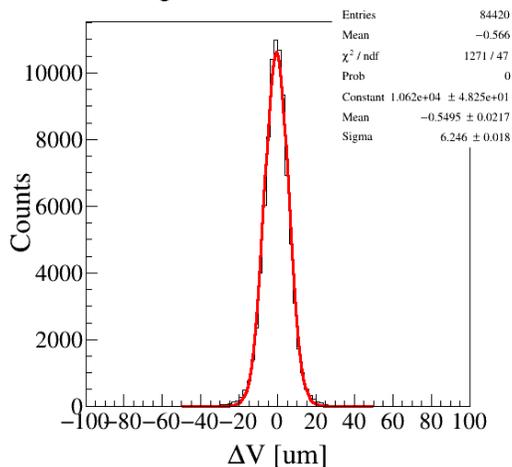
$$M^T = (JJ^T)^{-1} Jr = \sum_j J_j J_j^T \sum_j J_j r_j$$

- 校准后的精度好于 $0.5 \mu\text{m}$

align monitor - ΔU -DUT



align monitor - ΔV -DUT



径迹重建

径迹重建:

- Kalman滤波径迹拟合, 通过协方差矩阵引入多次库伦散射
- 最小二乘法拟合, 获得径迹初始参数(x_0, y_0 和斜率)
- 预测: 根据状态传递模型 F_k 预测径迹参数和协方差矩阵

$$\hat{x}_k^{k-1} = F_{k-1} \hat{x}_{k-1}$$

$$C_k^{k-1} = F_{k-1} C_{k-1} F_{k-1}^T + Q_{k-1}$$

- 计算Kalman增益: 根据测量模型 H_k 和协方差矩阵计算Kalman增益

$$K_k = C_k^{k-1} H_k^T (H_k C_k^{k-1} H_k^T + U_k)^{-1}$$

- 更新: 根据测量值和预测值的残差更新径迹参数及协方差矩阵

$$\hat{x}_k^k = \hat{x}_k^{k-1} + K_k (m_k - H_k \hat{x}_k^{k-1})$$

$$C_k^k = (I - K_k H_k) C_k^{k-1}$$

- 计算平滑增益:

$$S_k = C_k \cdot F^T \cdot (C_k^{k-1})^{-1}$$

- 反向平滑:

$$\hat{x}_{k-1}^s = \hat{x}_{k-1} + S_k (\hat{x}_k^s - \hat{x}_k^{k-1})$$

$$C_{k-1}^s = C_{k-1} + S_k (C_k^s - C_k^{k-1}) S_k^T$$

径迹参数:

$$\hat{x} = \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 + z_0 \tan \theta_x \\ y_0 + z_0 \tan \theta_y \\ \tan \theta_x \\ \tan \theta_y \end{pmatrix}$$

状态传递模型

$$\hat{x}_k = F_{k-1} \hat{x}_{k-1} + w_{k-1}$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 & d_z & 0 \\ 0 & 1 & 0 & dz \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ dx \\ dy \end{pmatrix} + Q_k$$

测量模型: $\hat{m}_k = H_k \hat{x}_k + \epsilon_k$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ dx \\ dy \end{pmatrix} + V_k$$

多次库伦散射的协方差矩阵可以表示为

$$Q_k = \begin{pmatrix} z_0^2 \langle P_3, P_3 \rangle & z_0^2 \langle P_3, P_4 \rangle & z_0 \langle P_3, P_3 \rangle & z_0 \langle P_3, P_4 \rangle \\ z_0^2 \langle P_3, P_4 \rangle & z_0^2 \langle P_4, P_4 \rangle & z_0 \langle P_3, P_4 \rangle & z_0 \langle P_4, P_4 \rangle \\ z_0 \langle P_3, P_3 \rangle & z_0 \langle P_3, P_4 \rangle & \langle P_3, P_3 \rangle & \langle P_3, P_4 \rangle \\ z_0 \langle P_3, P_4 \rangle & z_0 \langle P_4, P_4 \rangle & \langle P_3, P_4 \rangle & \langle P_4, P_4 \rangle \end{pmatrix}$$

$$\langle P_3, P_3 \rangle = \sigma^2(\theta) (1 + P_3^2 + P_4^2) (1 + P_3^2)$$

$$\langle P_3, P_4 \rangle = \sigma^2(\theta) (1 + P_3^2 + P_4^2) (P_3 P_4)$$

$$\langle P_4, P_4 \rangle = \sigma^2(\theta) (1 + P_3^2 + P_4^2) (1 + P_4^2)$$