



白光中子共振成像研究进展

滕文琛，易晗，唐靖宇，樊瑞睿，邱奕嘉，
王卫龙，郭罗坤，杨宇祺

2026年7月16日



研究背景



实验过程



实验结果

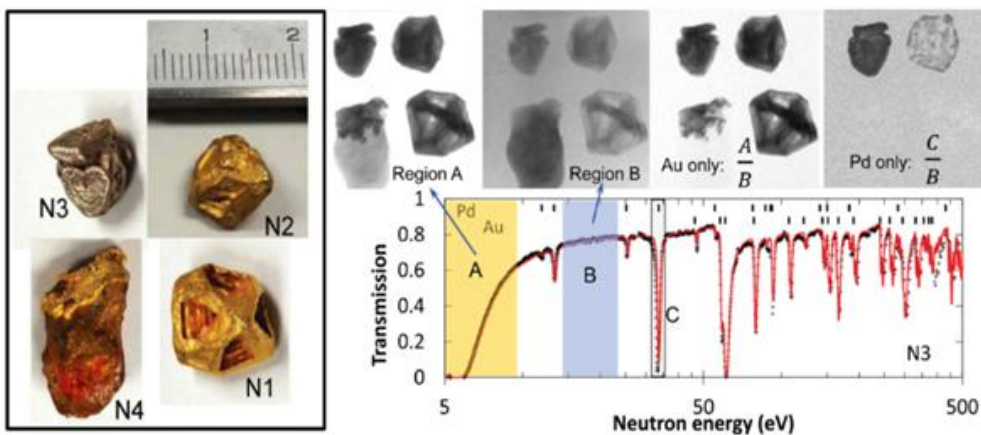


总结与展望

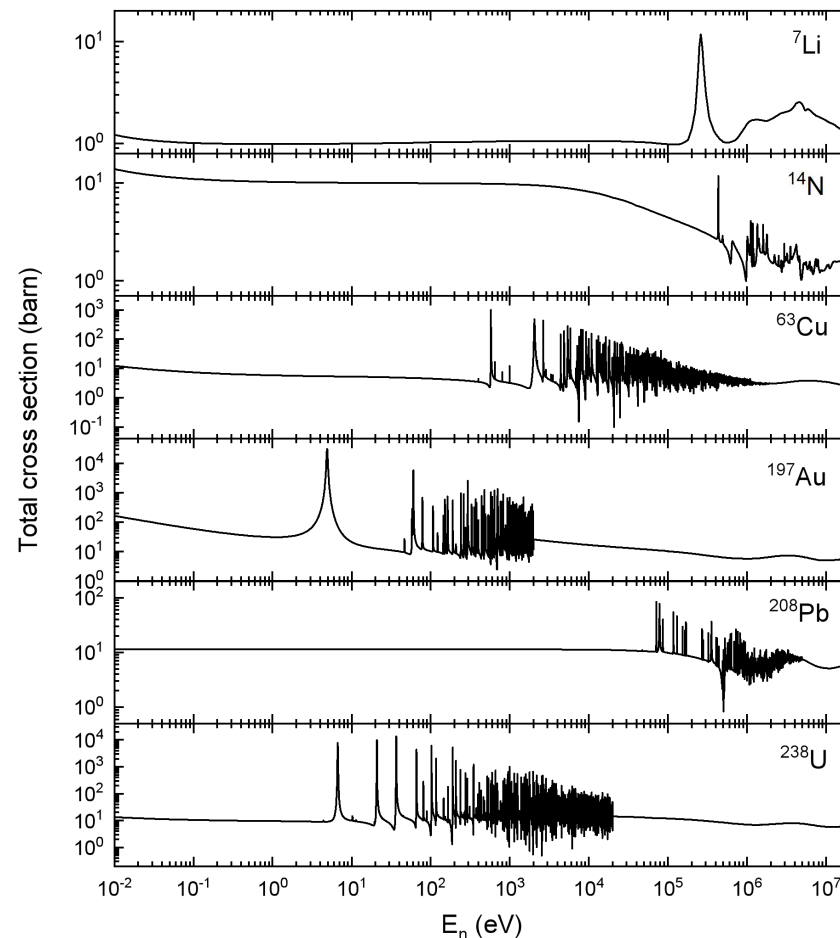
中子共振成像

利用核反应截面**共振结构**进行成像，每种元素只在特定能量点表现出**窄而强的吸收峰**（共振峰），当中子能量落在该共振能区时，透过样品的中子数明显减少。

- 优点：
- 可进行核素识别
 - 无需取样，完全无损
 - 中子穿透性强、可利用共振增强成像对比度

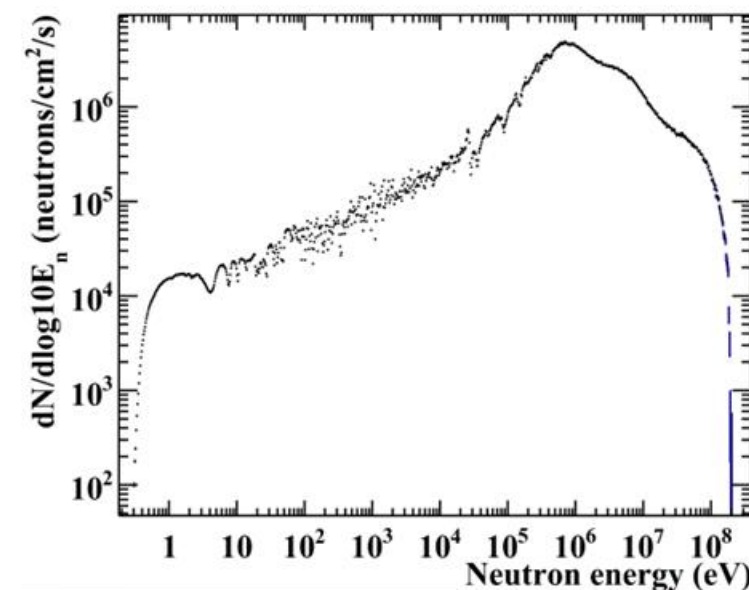
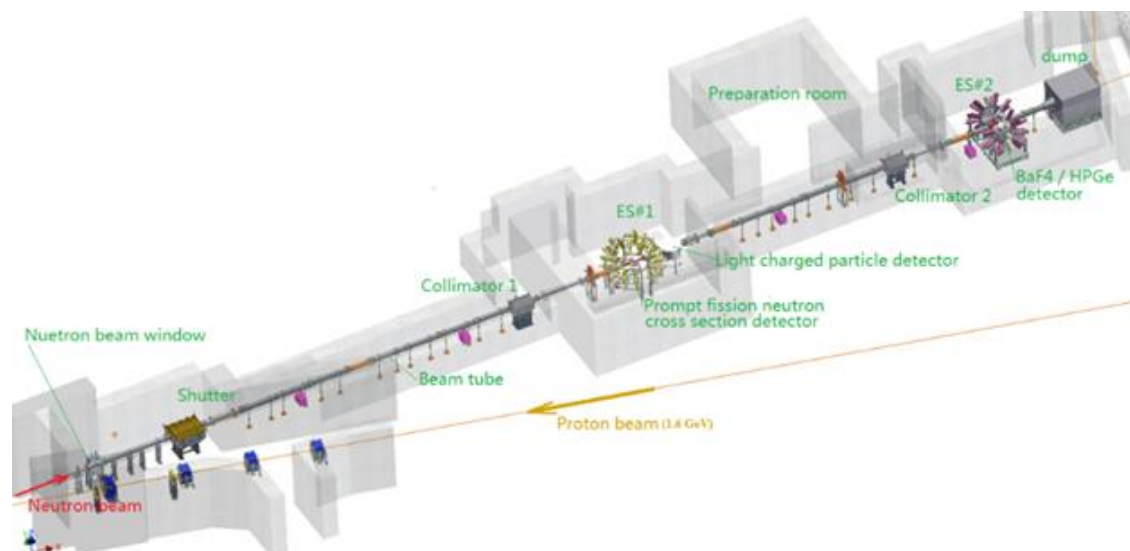


金属矿物的共振成像



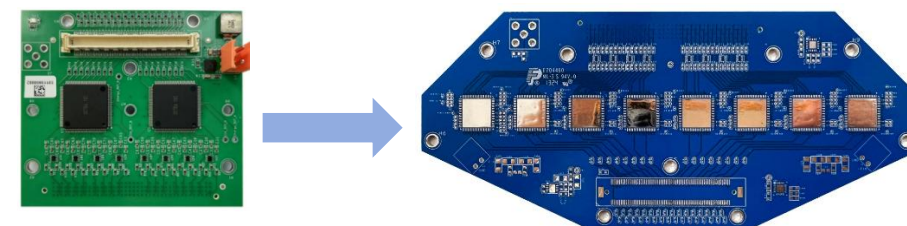
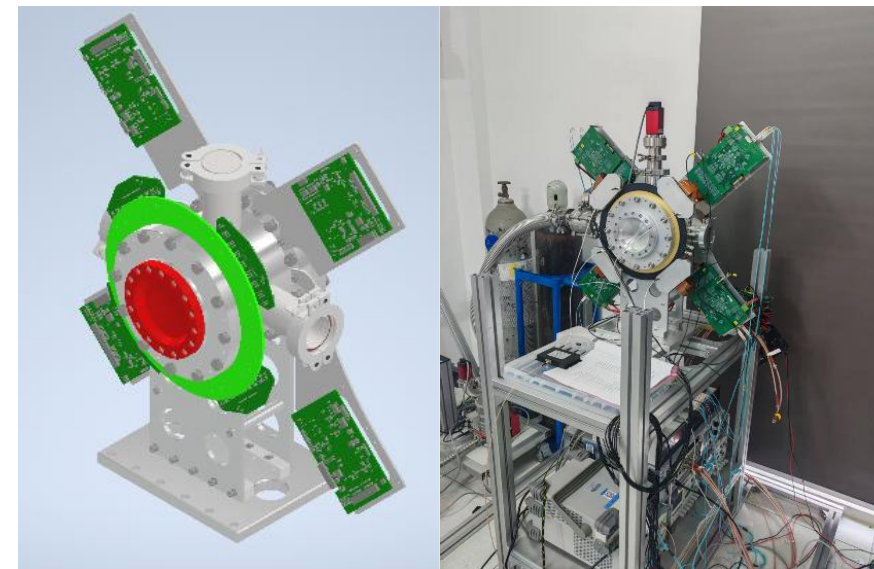
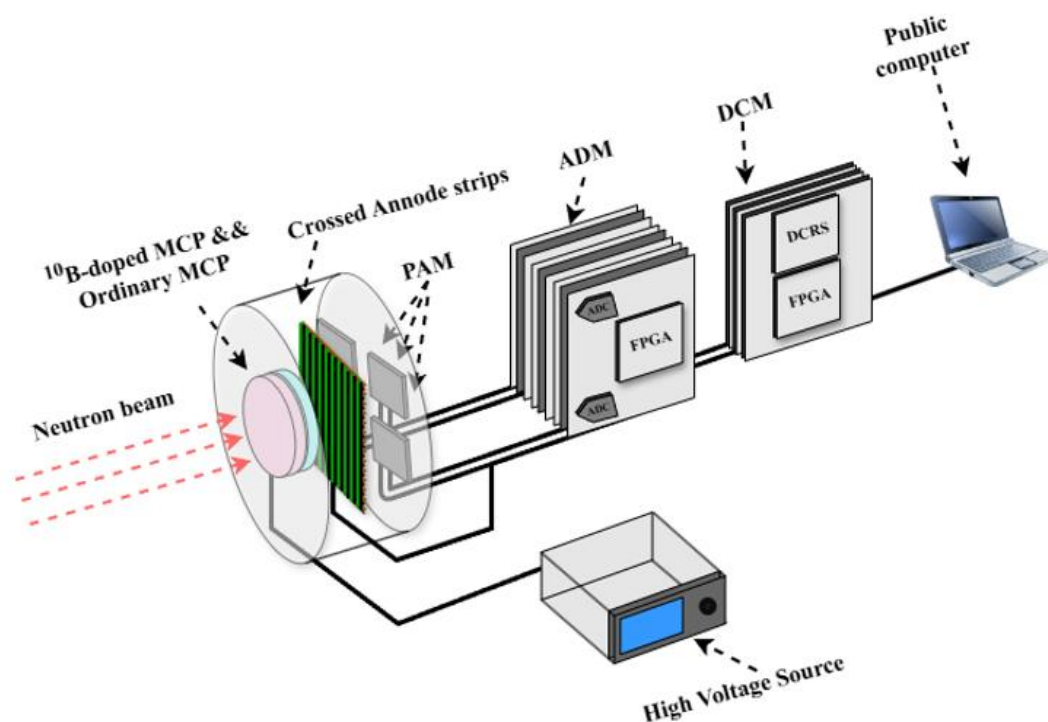
几种常见核素中子核反应的总截面

CSNS Back-n 具有**宽能量范围**(thermal to 300 MeV), 高中子通量以及好的能量分辨, 能够开展**eV-MeV**白光中子共振成像, 理论上可以实现几乎所有核素的鉴别。



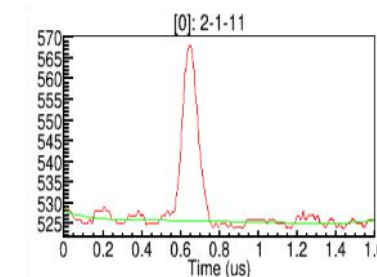
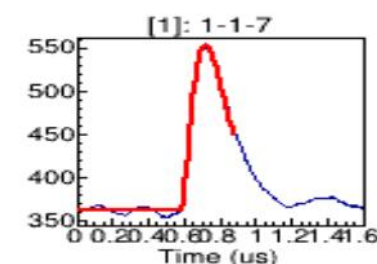
CSNS Back-n中子能谱

B-MCP探测器简介

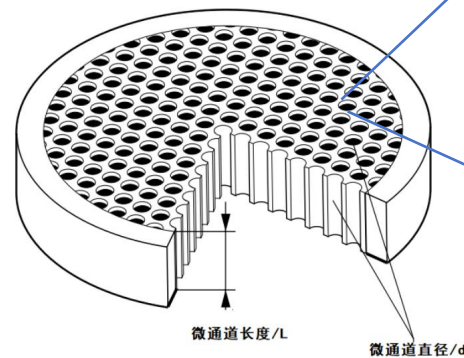
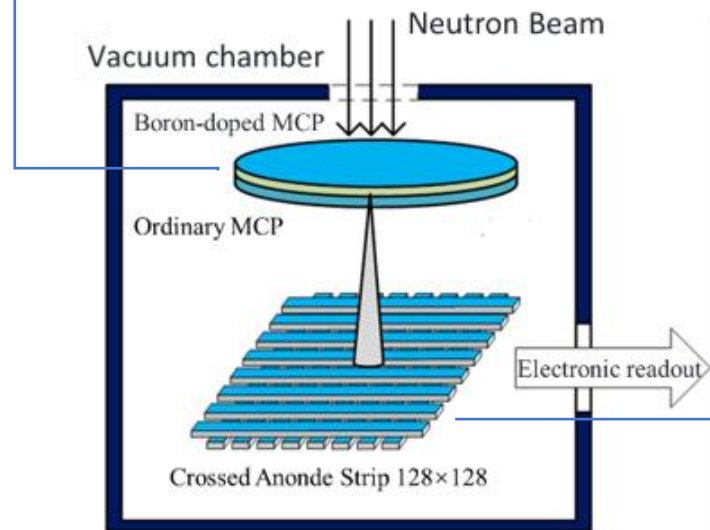
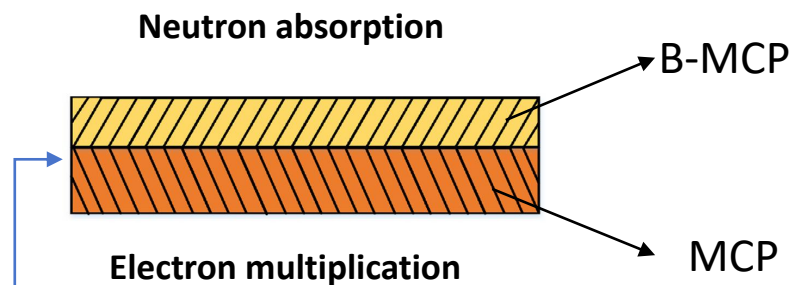


- PAM: 电荷灵敏前放
- ADM: 模数转换模块
- DCM: 数据集中模块

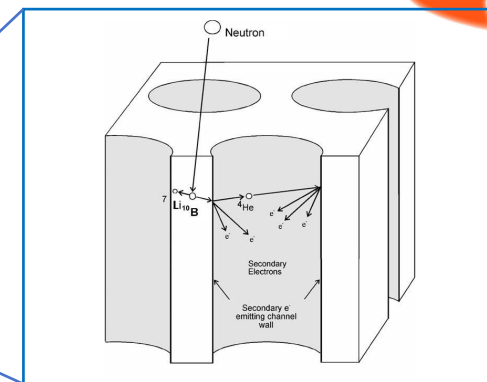
x4, 对应四个方向
4x2, 对应四个方向, 每个方向两块



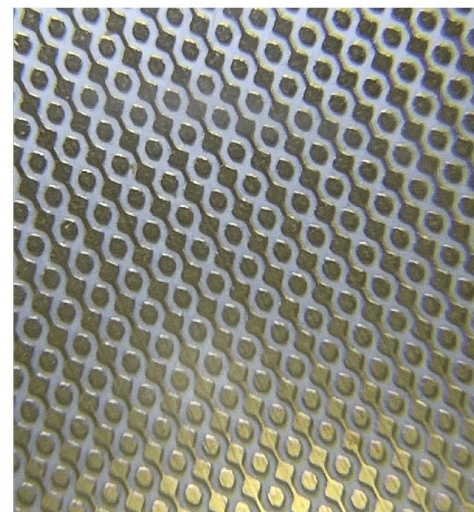
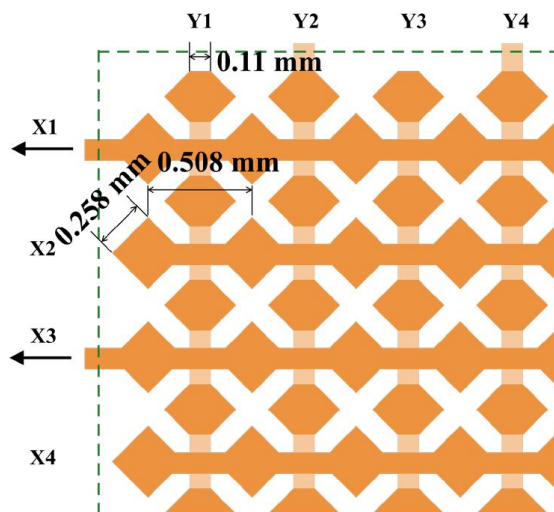
B-MCP探测器原理



MCP内部结构示意图



次级电子产生示意图



交叉条阳极, 128x128



研究背景



实验过程



实验结果

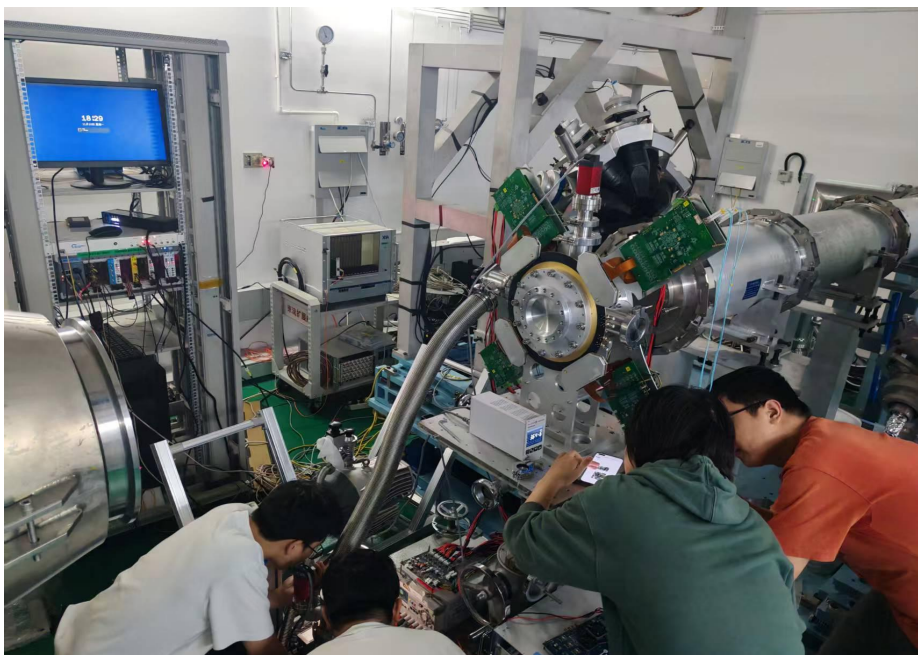


总结与展望

实验目标

研究探测系统升级后的探测系统性能

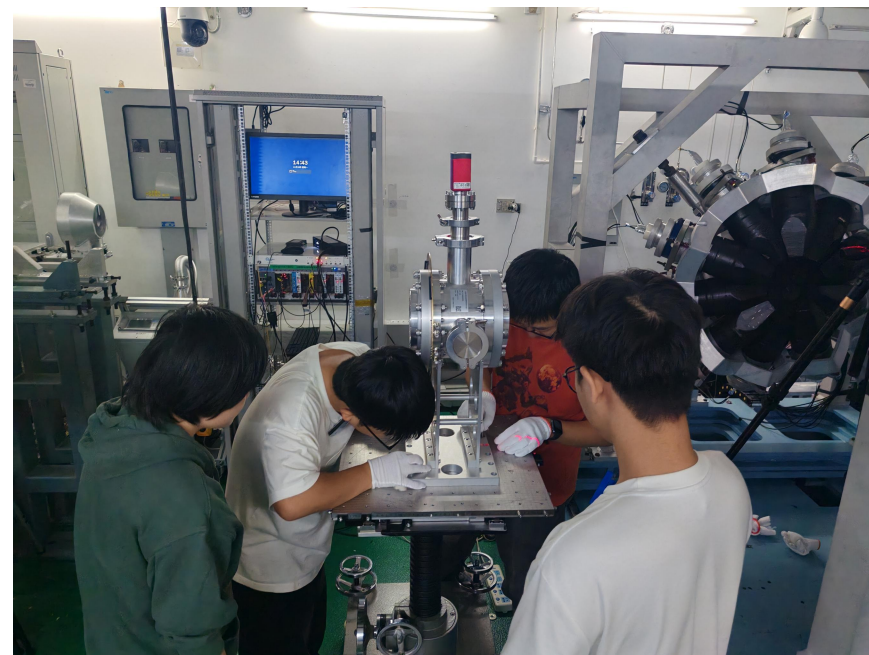
- 能量分辨
- 空间分辨
- 探测效率



研究NRTI探测系统对实际文物样品的实验效果；

研究标准样品与文物样品之间的实验效果区别

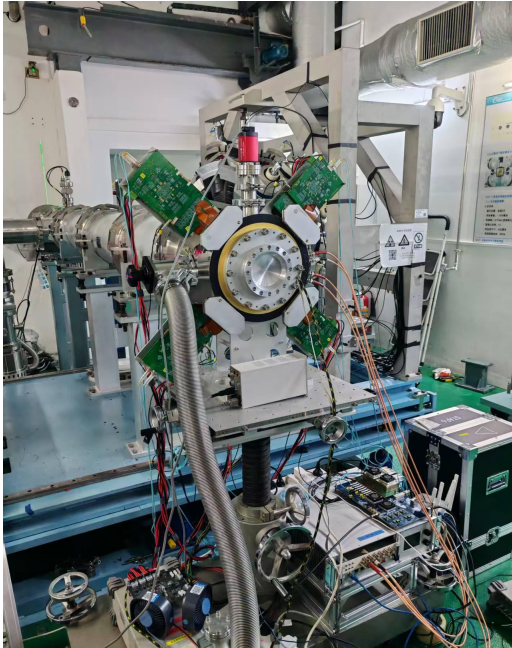
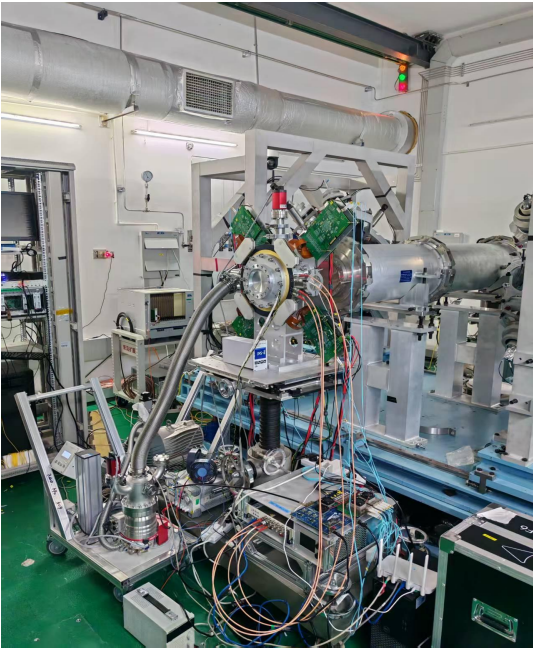
- 共振成像
- 定量分析

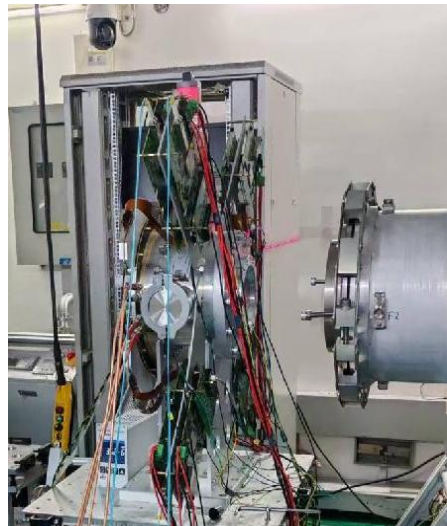


2025年11月实验概况

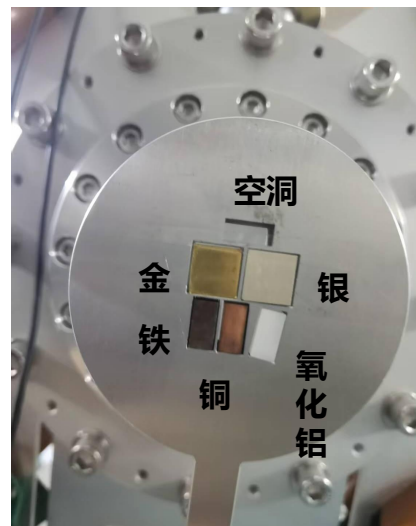
- ❑ 无样束班测量：24小时
- ❑ 标准样品测量：36小时
- ❑ 铜镜样品测量：96小时
- ❑ 铁钱样品测量：24小时
- ❑ 空速管：测量时间约90小时
- ❑ 真空：2.0E-4Pa
- ❑ 飞行距离：77.23m

实验阶段	高压配置	束斑参数	阈值 (X/Y)	核心计数率
初始调试	1450-1050-950-50	30-30-30	40/50 ADC	2600-5600 kb/s
标样测试	1500-1075-975-50	50-15-40/90	30/40 ADC	13000-13100 kb/s
铜镜	1500-1075-975-50	50-50-40	30/40 ADC	16000-16300 kb/s
铁钱测试	1500-1075-975-50	50-15-40	30/40 ADC	13000-15901 kb/s
空速管测试	1500-1075-975-50	50-15-40	30/40 ADC	12000 kb/s





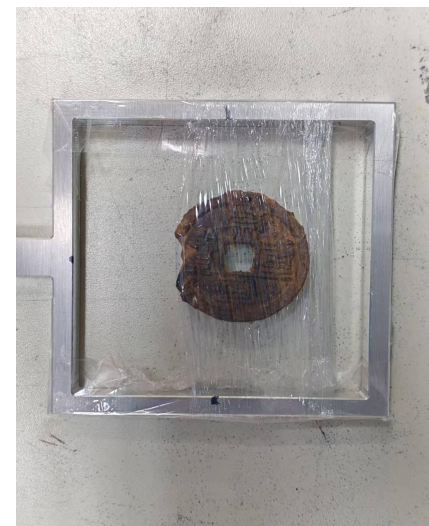
束斑测量



标准样品



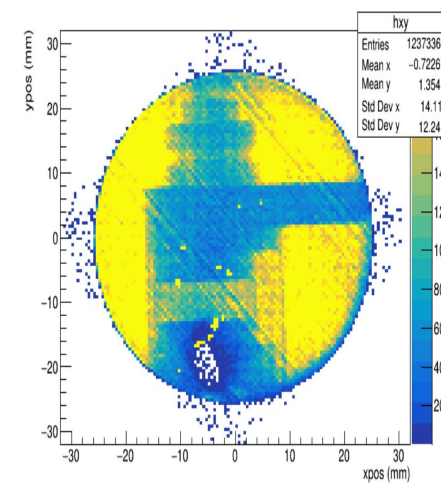
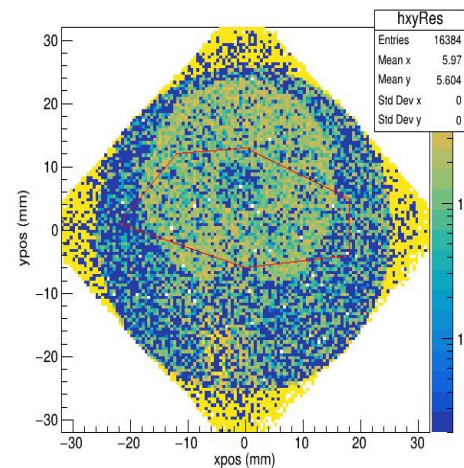
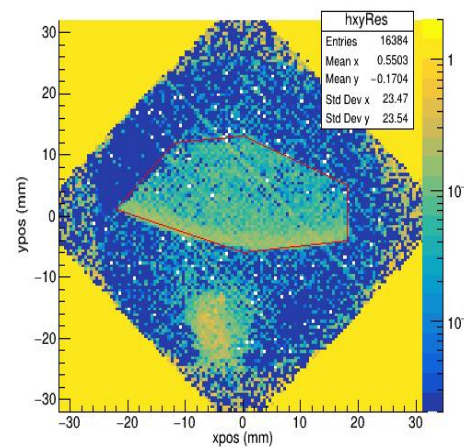
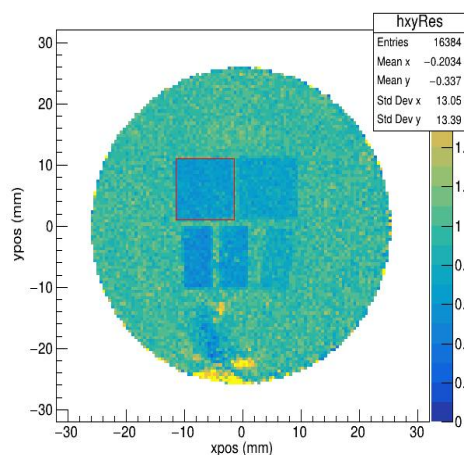
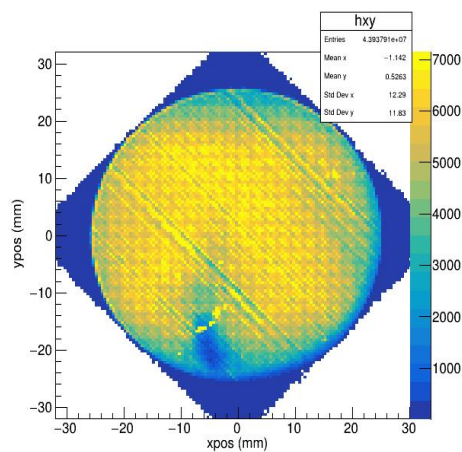
铜镜样品



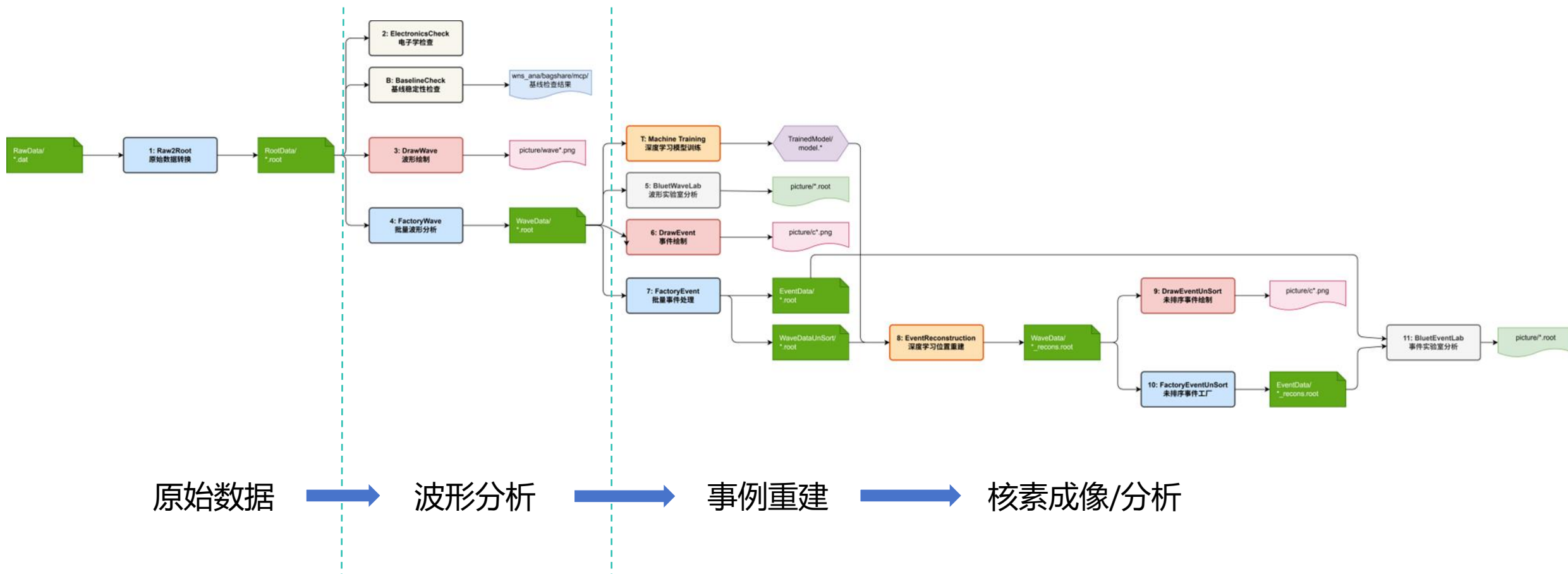
铁钱样品



空速管样品



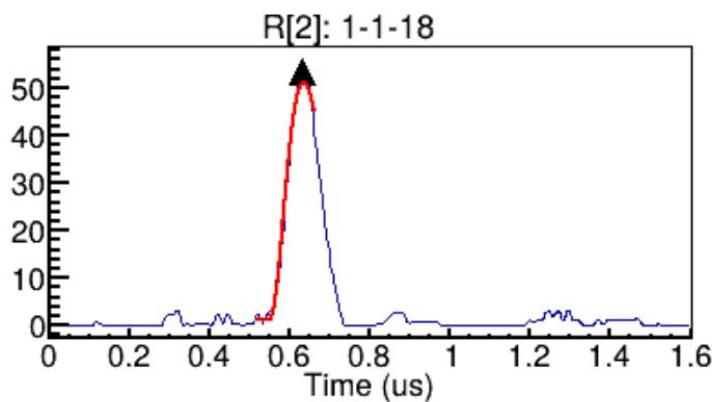
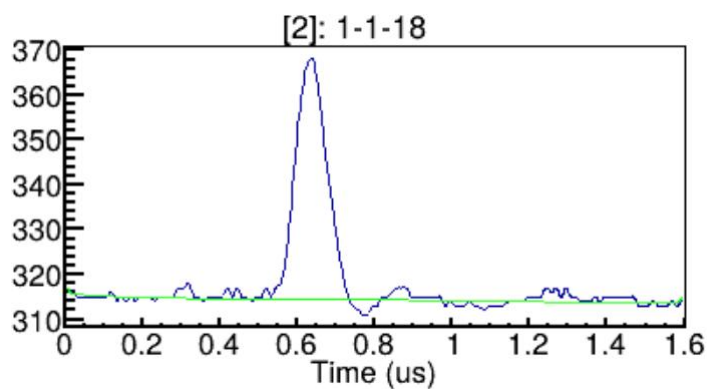
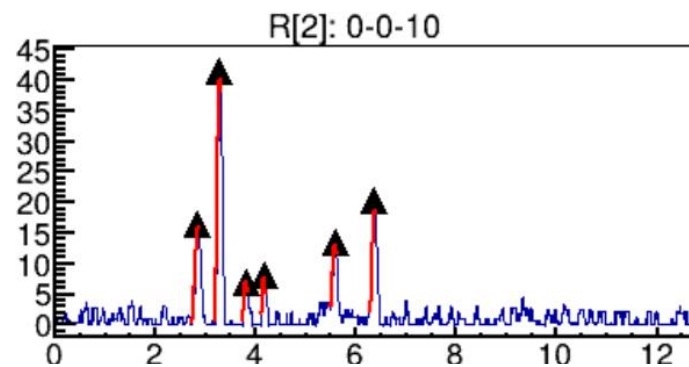
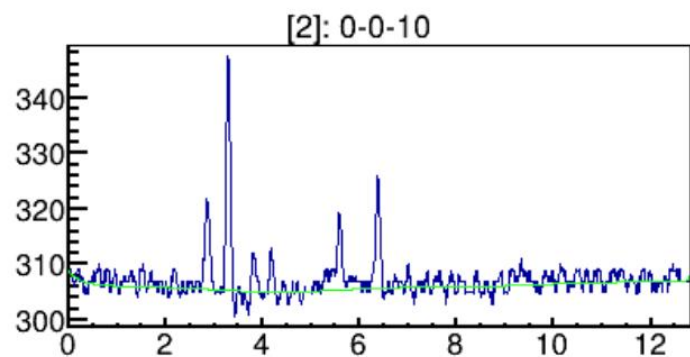
WNRI-BLUET程序框架



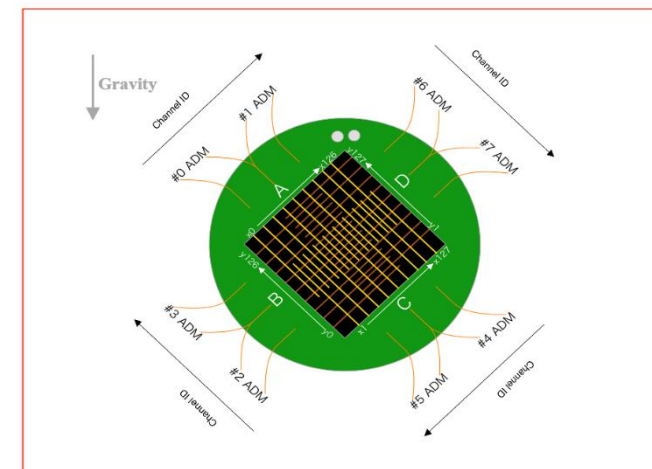
波形分析

信号拟合公式:

$$V(t) = \sum_{i=1}^N V_i(t) = \sum_{i=1}^N A_i \left(\frac{t - t_{0i}}{\tau_i} \right)^2 e^{-(t - t_{0i})/\tau_i} \cdot u(t - t_{0i}),$$



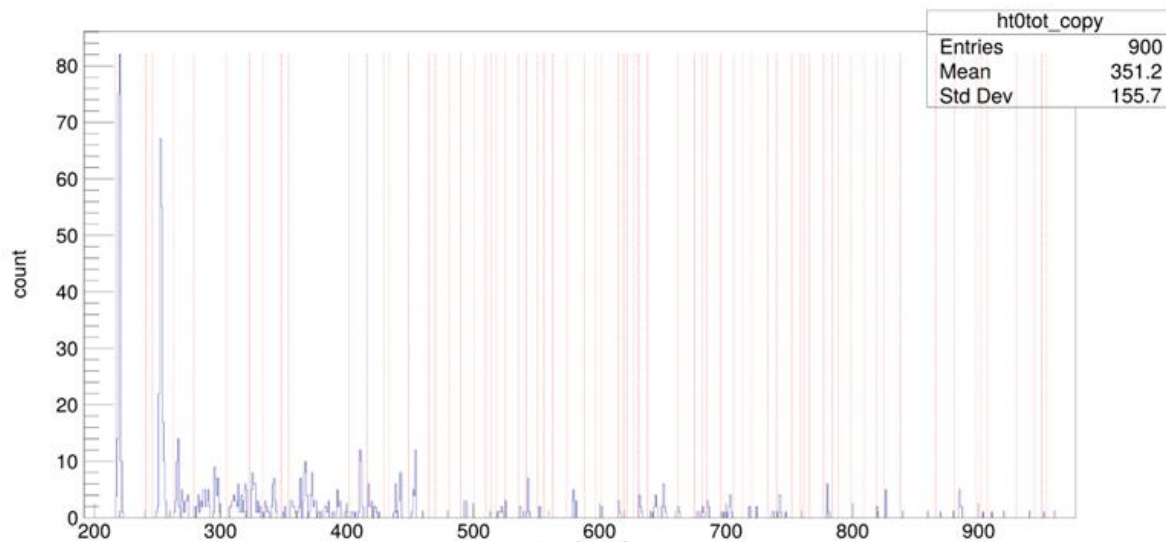
拟合脉冲的**时间**和**幅度**



Channel编号顺序

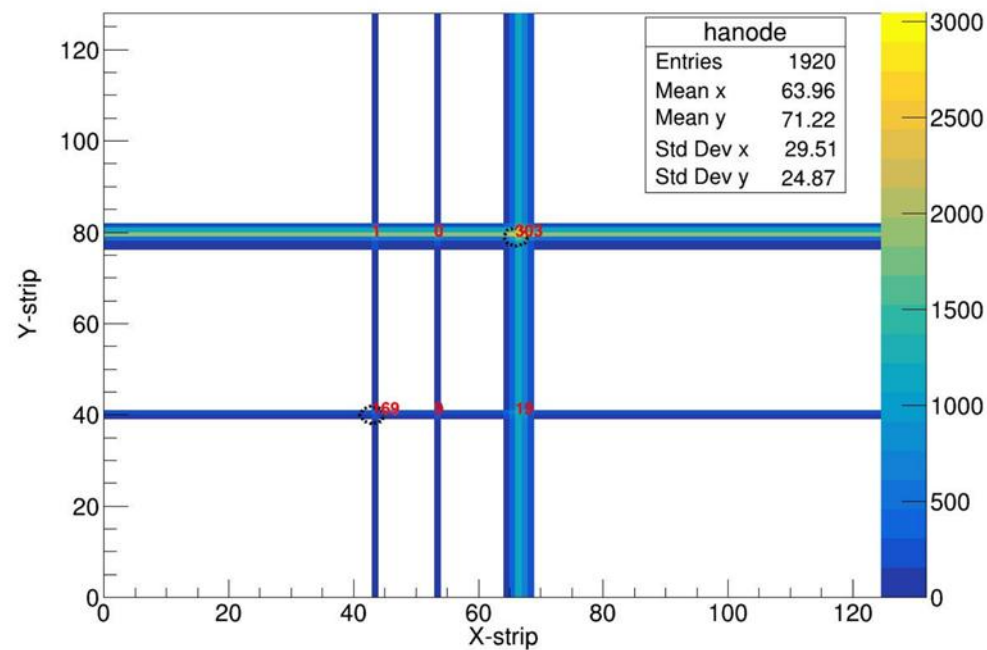
事例重建

时间分布



- 设置可变时间窗对中子事例进行划分

空间分布



- 用机器学习对x,y方向上的点火条进行匹配
- 匹配后通过重心法确定中子事例的位置



研究背景



实验过程

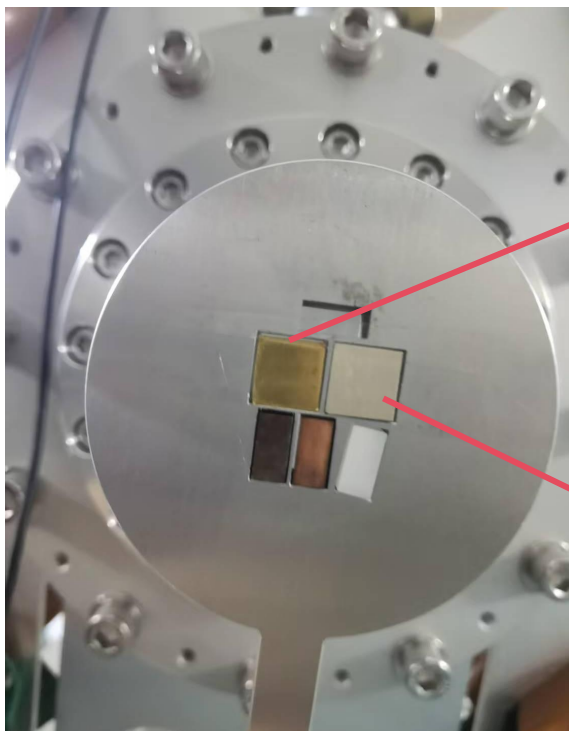


实验结果

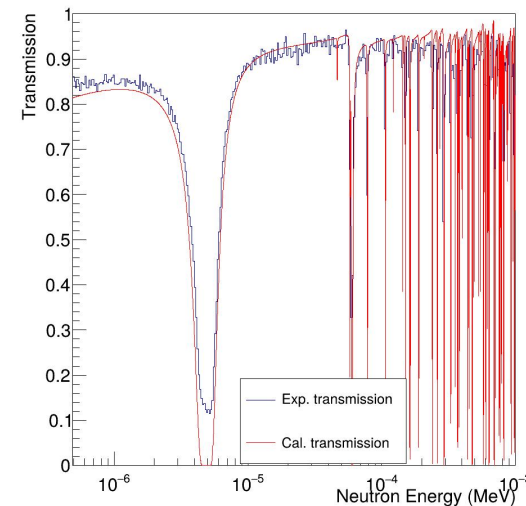
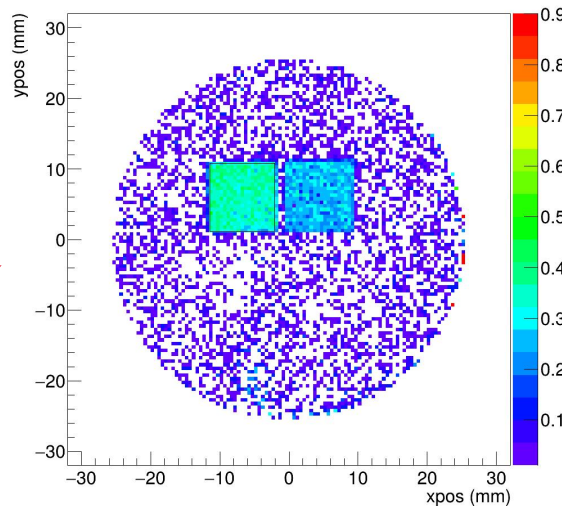


总结与展望

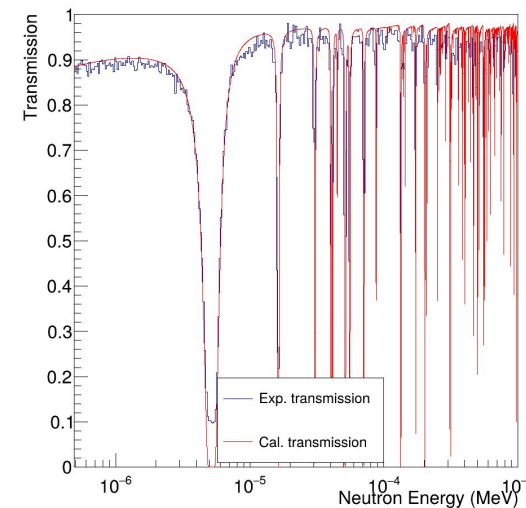
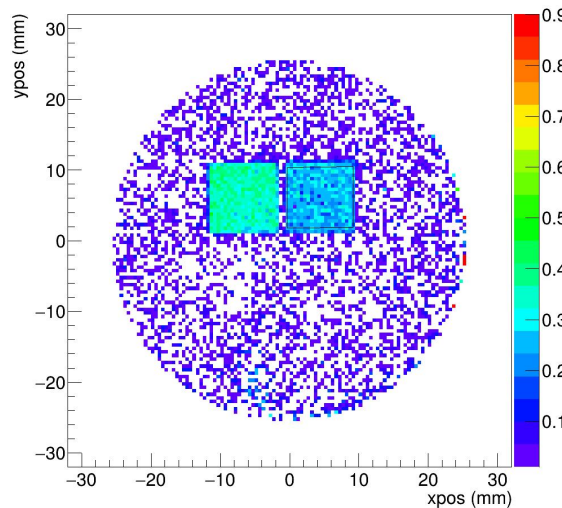
标样成像



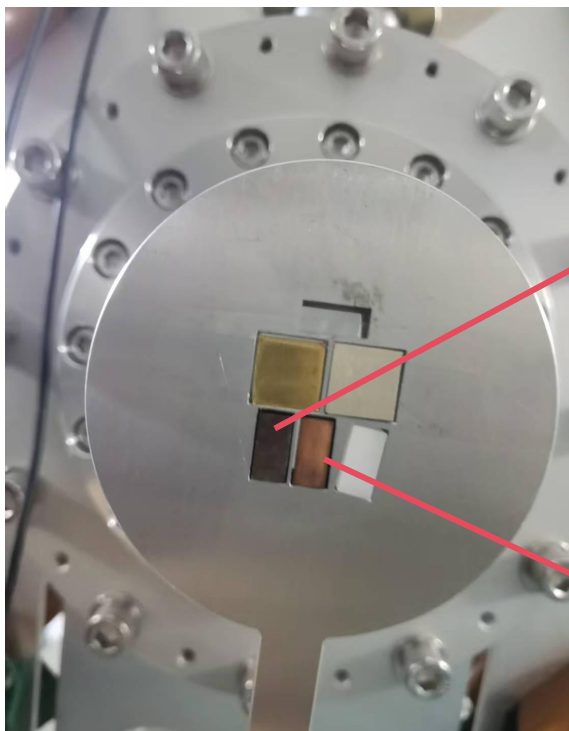
Au



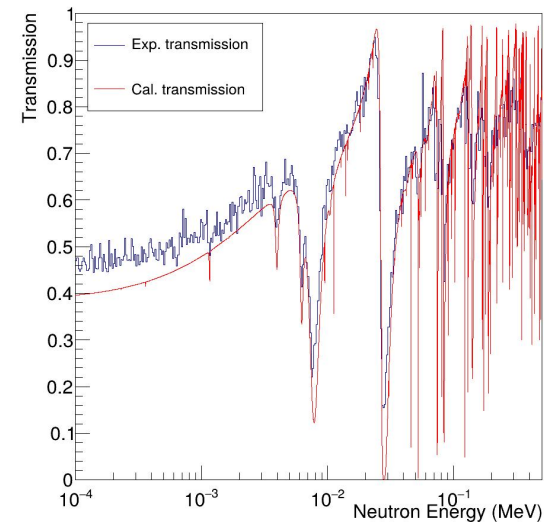
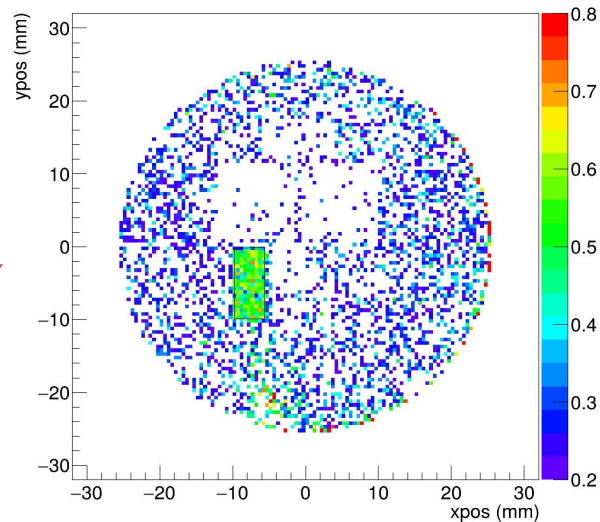
Ag



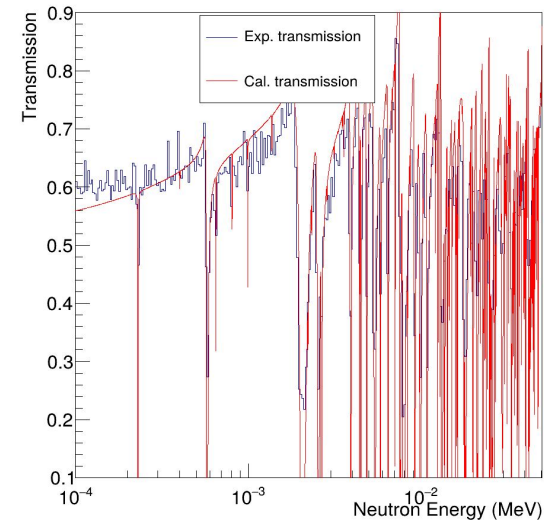
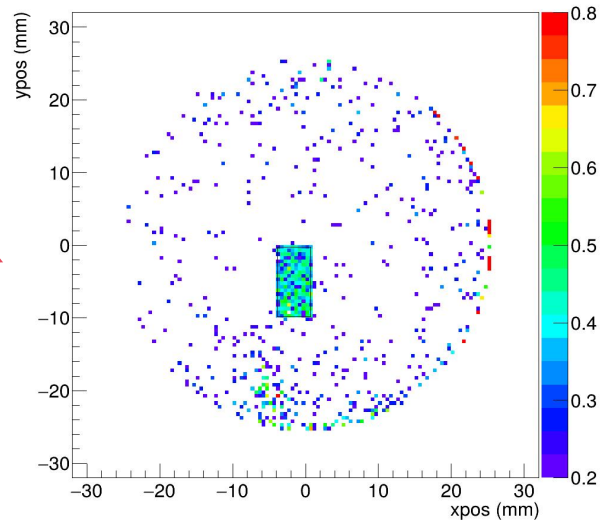
标样成像



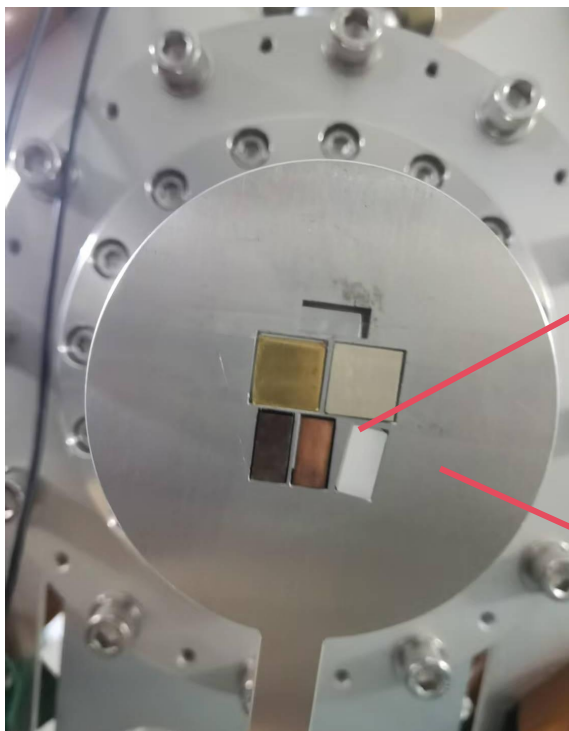
Fe



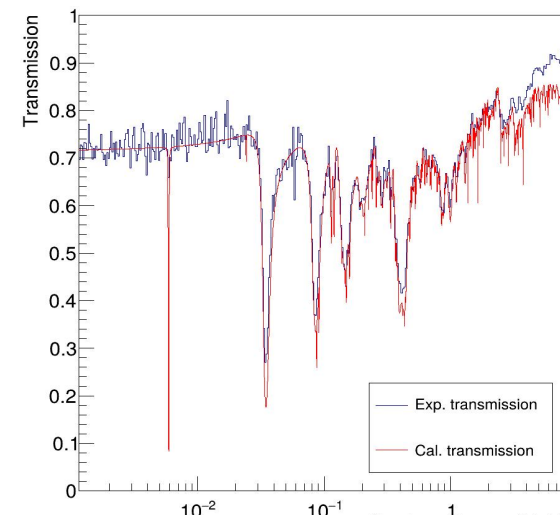
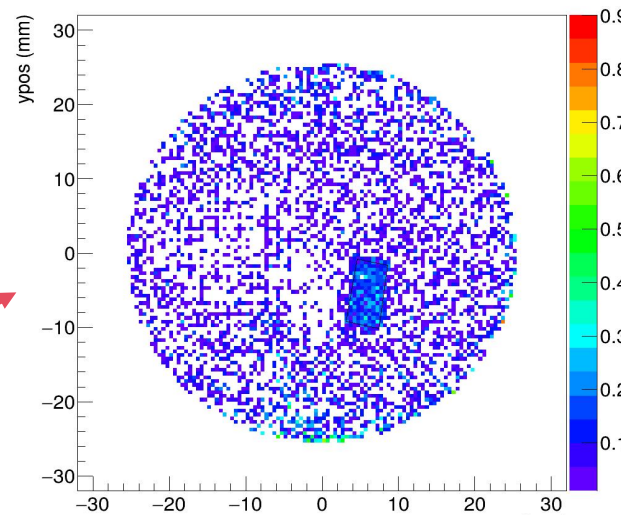
Cu



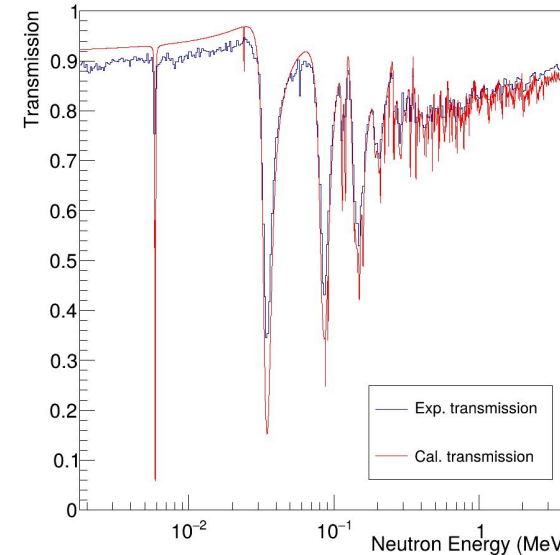
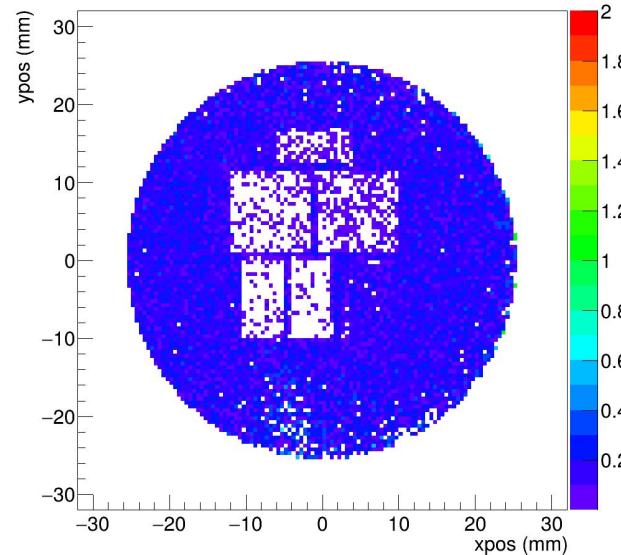
标样成像



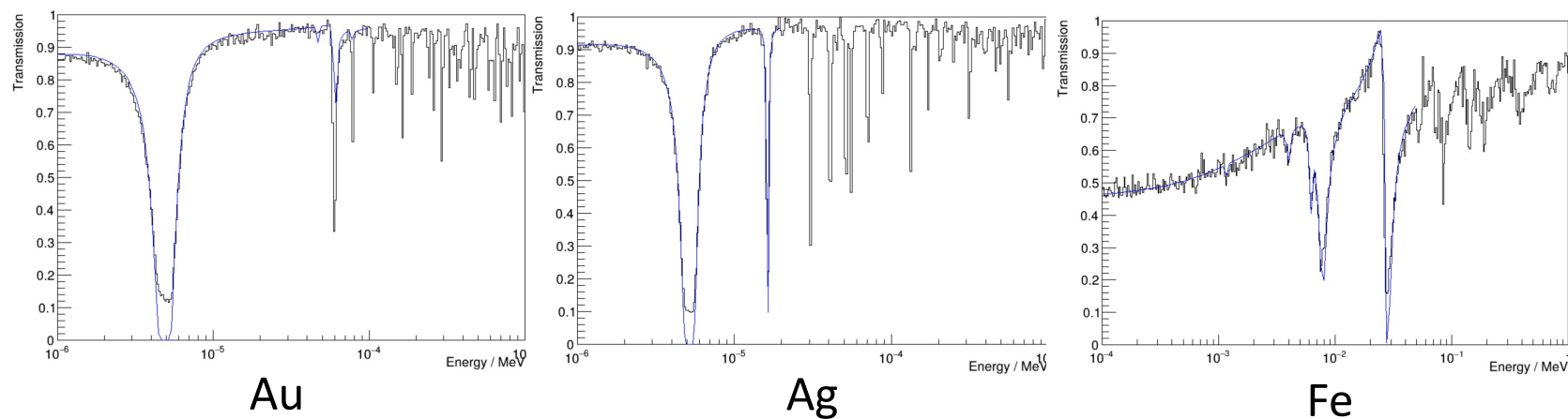
O



Al

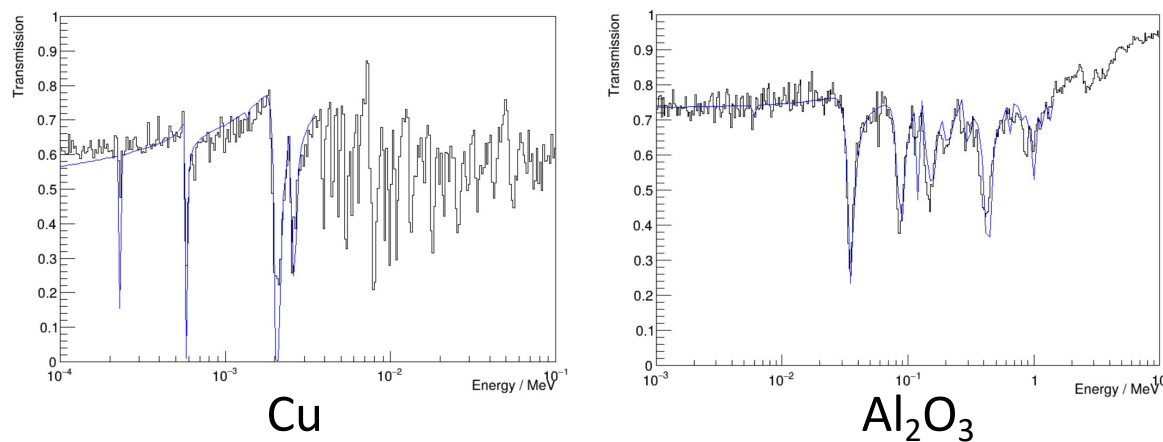


标样定量分析



根据Lambert-Beer定律对透射率谱进行拟合，得到标样的厚度

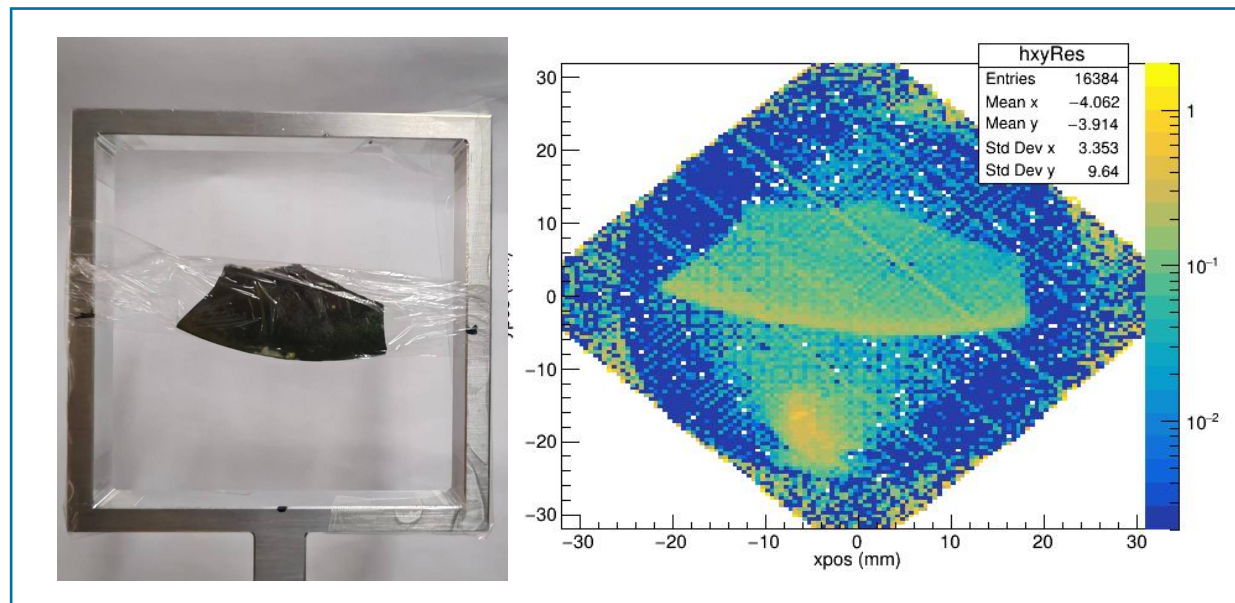
$$T_{cal}(E_n) = e^{-\sum_i N_S f_i \sigma_i(E_n)}$$



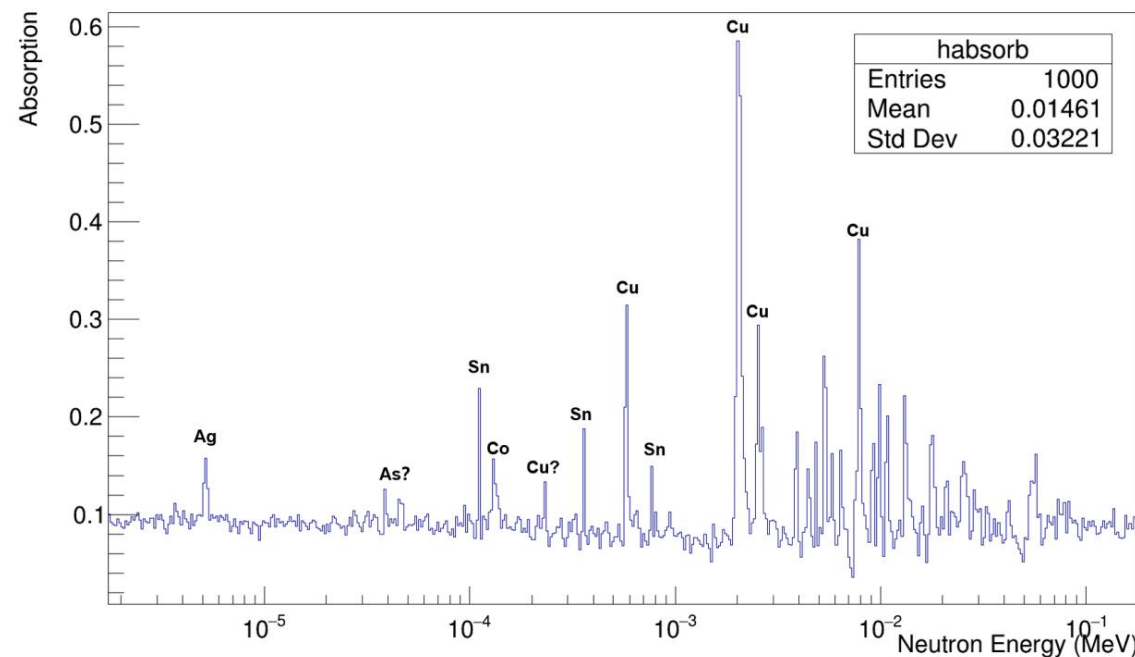
样品	实际厚度 (cm)	拟合厚度 (cm)	误差
Au	0.1	0.07091	29.01%
Ag	0.1	0.08769	12.31%
Fe	1.0	0.8259	17.05%
Cu	1.0	0.9519	4.81%
Al_2O_3	1.0	0.8990	10.10%

铜镜成像

- 样品轮廓及样品厚度特征分布情况可以有效分辨
- 可以清晰辨析出**铜**元素和**锡**元素的共振吸收特征峰
- 微量元素如**银**、**砷**和**钴**元素的特征峰也可有效分辨

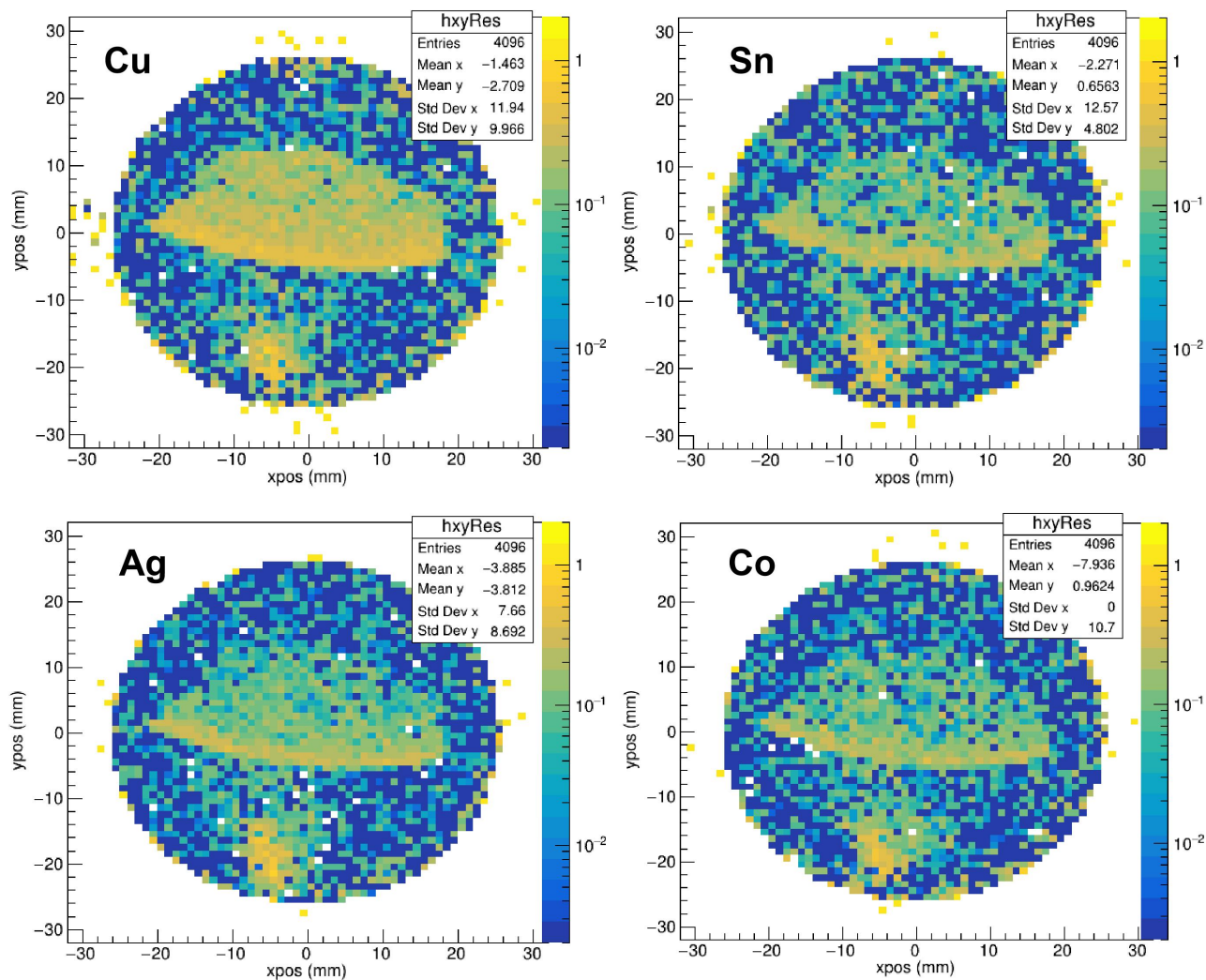


铜镜样品全能区透射率成像结果



铜镜样品中子吸收率谱

- 选择不同元素对应的共振能区，可以对特定元素进行成像
- 选取铜镜中含量较多的几个元素进行分析，元素分布整体较为均匀



铜镜中不同元素成像结果

铜镜定量分析

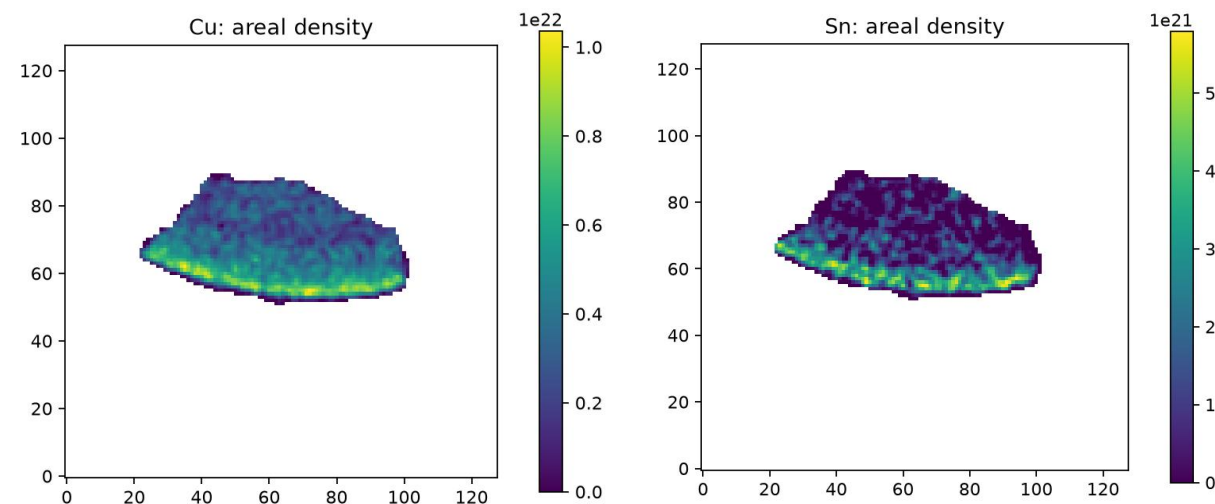
使用泊松分布最大似然估计进行拟合

$$C_{\text{out},k} \sim \text{Poisson}(q_k)$$

$$C_{\text{in},k} \sim \text{Poisson}(a_k T_k q_k)$$

$$T_k = \exp\left(-\sum_i n_i \sigma_i(E_k)\right)$$

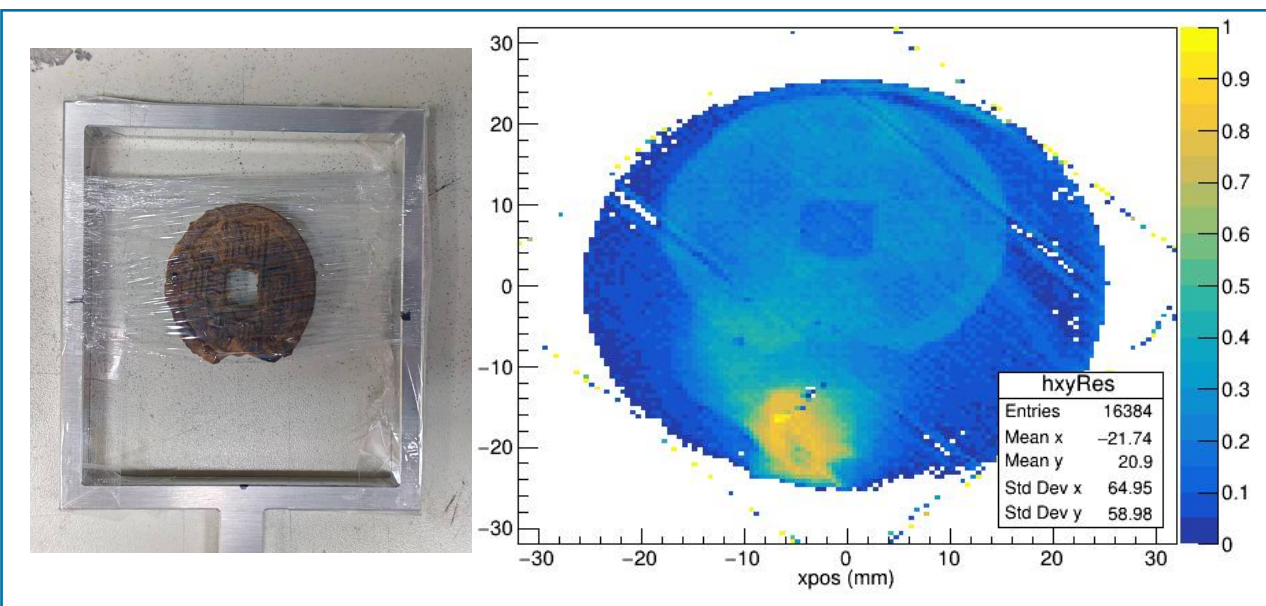
q_k : 第 k 个网格处的无样计数
 α_k : 有样与无样测量的归一化系数
 T_k : 第 k 个网格处的理论透射率



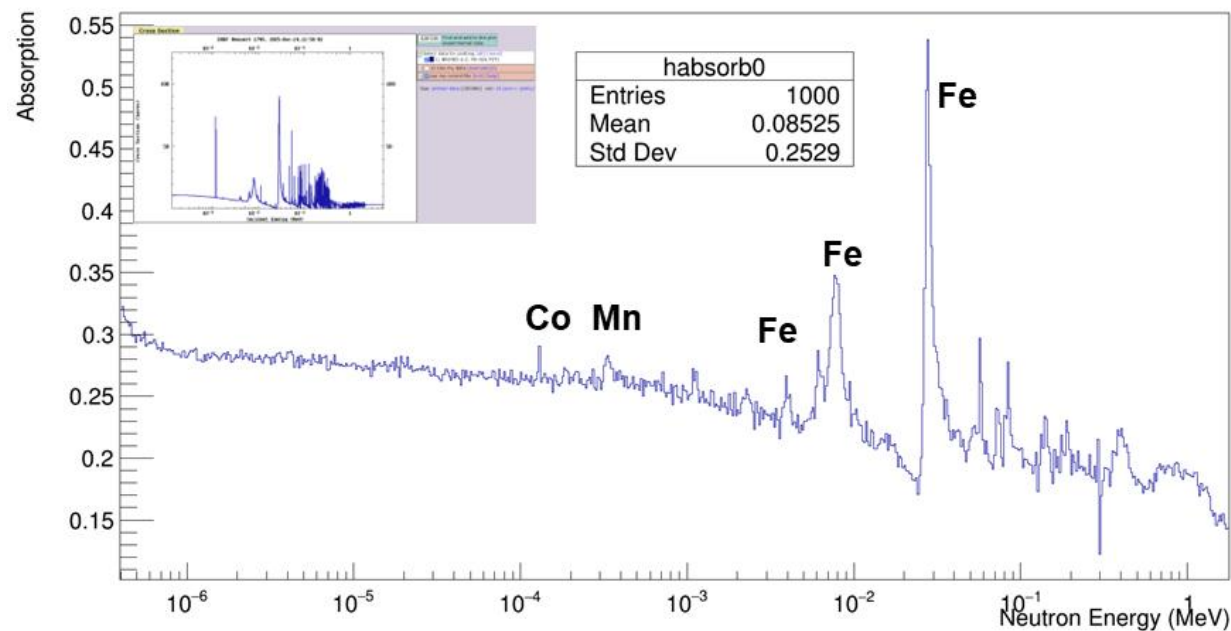
元素	面密度 (atoms/cm ²)	质量面密度 (mg/cm ²)	占比
Cu	5.03e21	530.58	62.24%
Sn	1.62e21	319.79	37.51%
Ag	7.55e18	1.35	0.16%
Co	7.71e18	0.75	0.09%

铁钱成像

- 铁钱轮廓及孔洞可以有效分辨，刻字无法分辨
- 可以清晰辨析出**铁**、**钴**、**锰**等元素的共振吸收特征峰

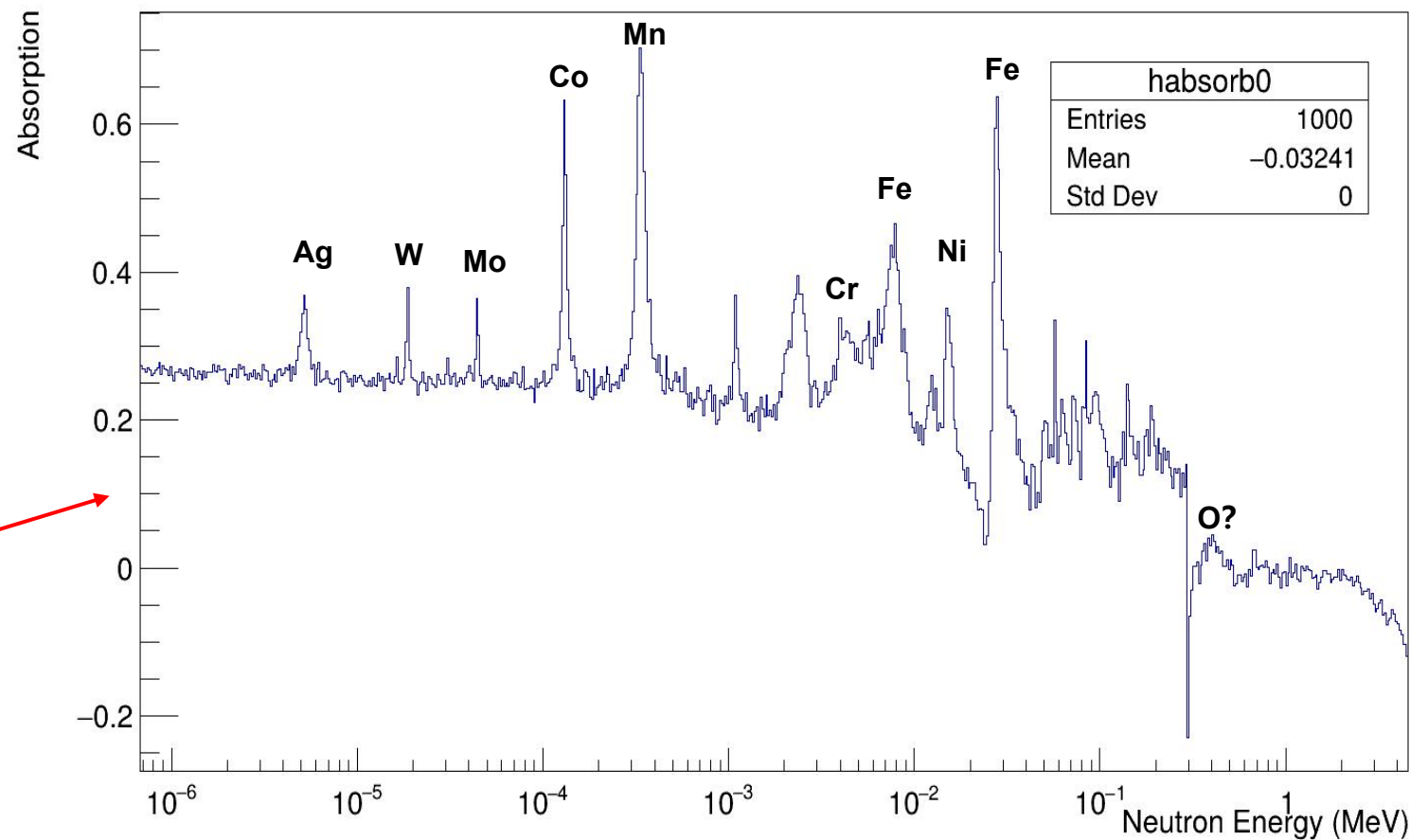
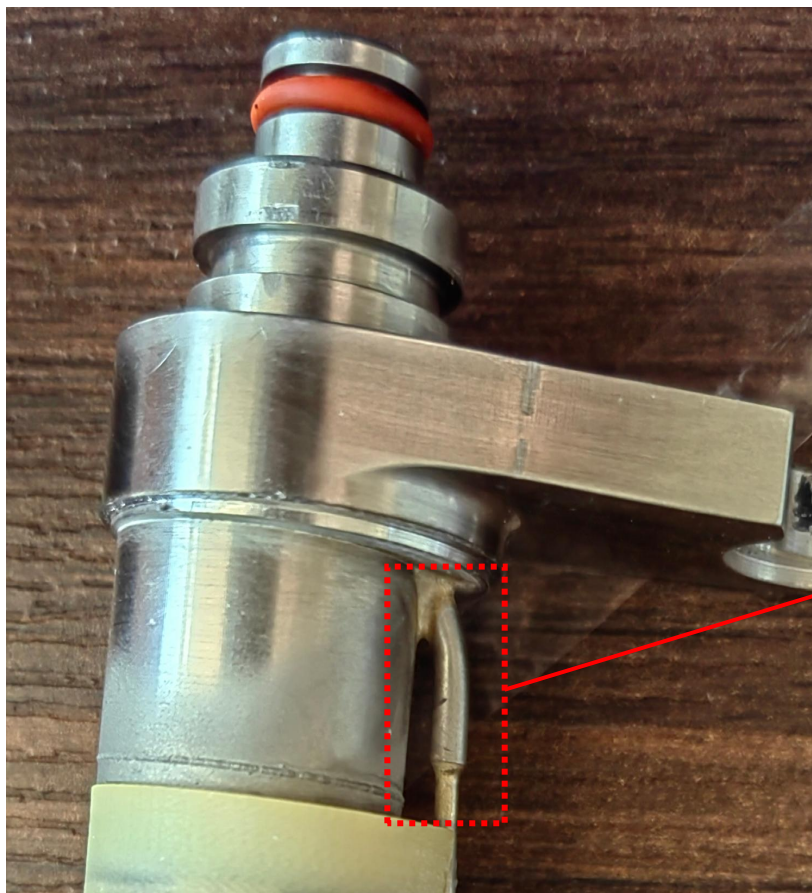


铁钱样品全能区透射率成像结果

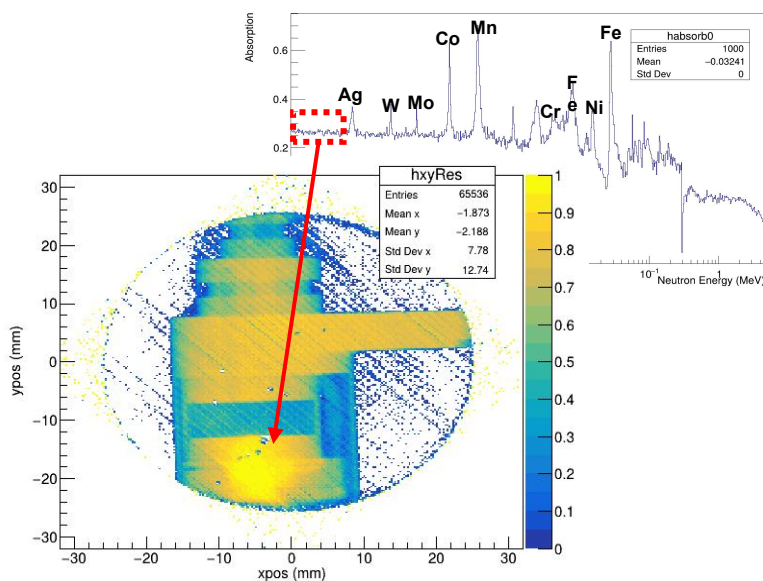


铁钱样品中子吸收率谱

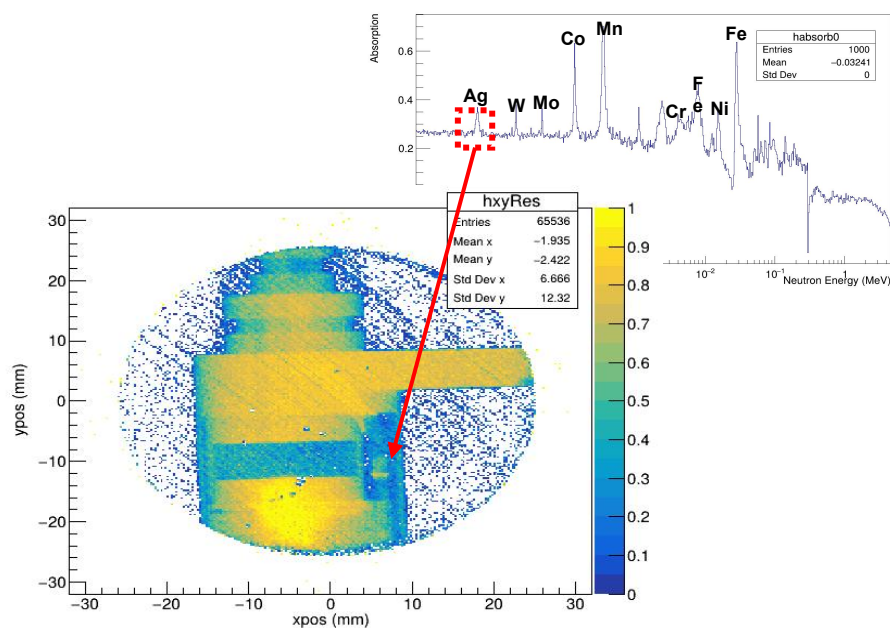
空速管成像



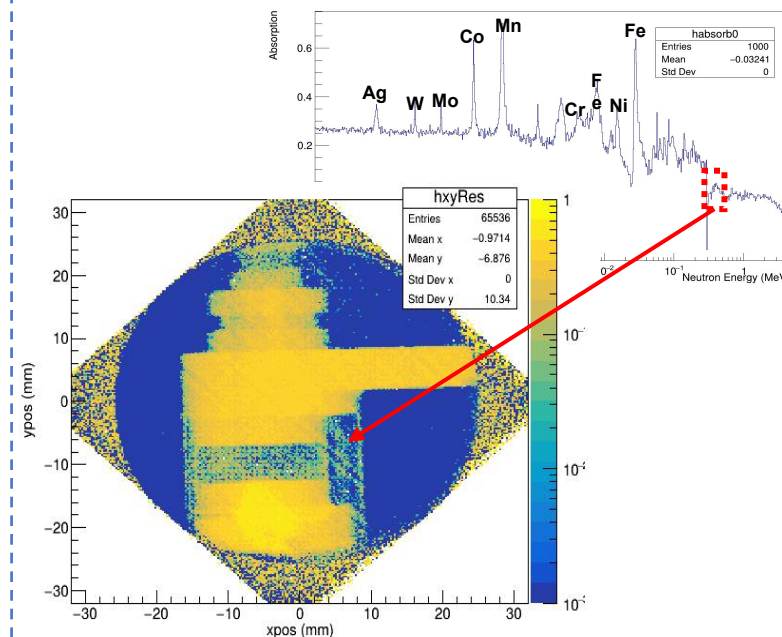
- 选取**3eV**以下能区
- 可分辨导管轮廓



- 选取**Ag元素**共振峰能区
- 可分辨导管连接焊接结构



- 选取**0元素**共振峰能区
- 粗导管部分图像模糊
- 无法有效分辨内部是否有水





研究背景



实验过程



实验结果



总结与展望

总结

- 完成了B-MCP探测器系统v3版的搭建和测试
- 建立了白光中子共振成像实验系统及数据处理流程
- 实现了多种元素的共振成像与标准样品初步的厚度定量分析
- 完成了战国楚镜等文物样品的无损共振成像实验以及楚镜的初步定量分析
- 验证了 B-MCP 探测系统开展白光中子共振成像的可行性

展望

- 优化高计数率条件下的数据处理与定量分析算法
- 提高成像质量及定量分析精度，实现复杂样品多元素定量成像
- 拓展文物、先进材料等样品的应用研究
- 持续优化探测器系统性能，推动白光中子共振成像技术发展

感谢各位专家，
敬请批评指正！

探测效率

- 将空间区域分为4个部分，发现Q3区域异常
- 采用其他三部分数据归一后作为本次实验探测效率，如下图绿线
- 橘色cut计数率谱形状明显有异于其他位置
- 似乎随时间均匀分布，推测局部打火造成
- 死区数据呈现出能量依赖。

