

CSNS白光中子共振成像技术研究



报告人：易晗

中国科学院高能物理研究所

散裂中子源科学中心

第二十三届全国核电子学与核探测技术学术年会

2026年8月11日@河南·登封



报告内容

- WNRI介绍
- 成像装置
- 成像实验
- 数据分析
- 报告总结



报告内容

- WNRI介绍
- 成像装置
- 成像实验
- 数据分析
- 报告总结

中子成像

- 传统中子成像：热中子和冷中子成像(几十meV以下)、快中子成像（百keV以上）
- 高穿透、无损、轻元素敏感，与X射线成像互补

子弹

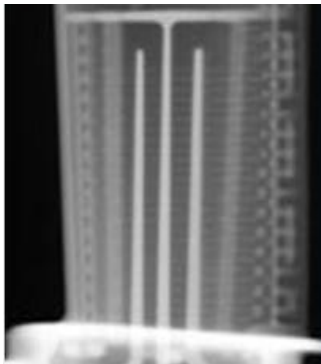


X射线成像

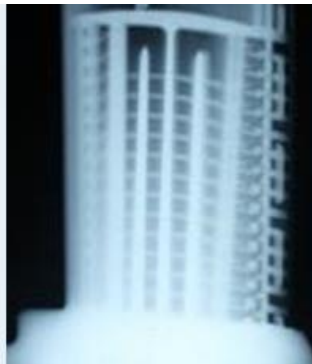


中子成像

涡轮叶片

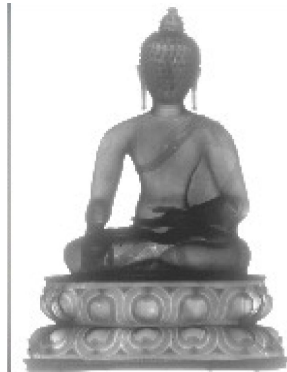


X射线成像



中子成像

古代文物



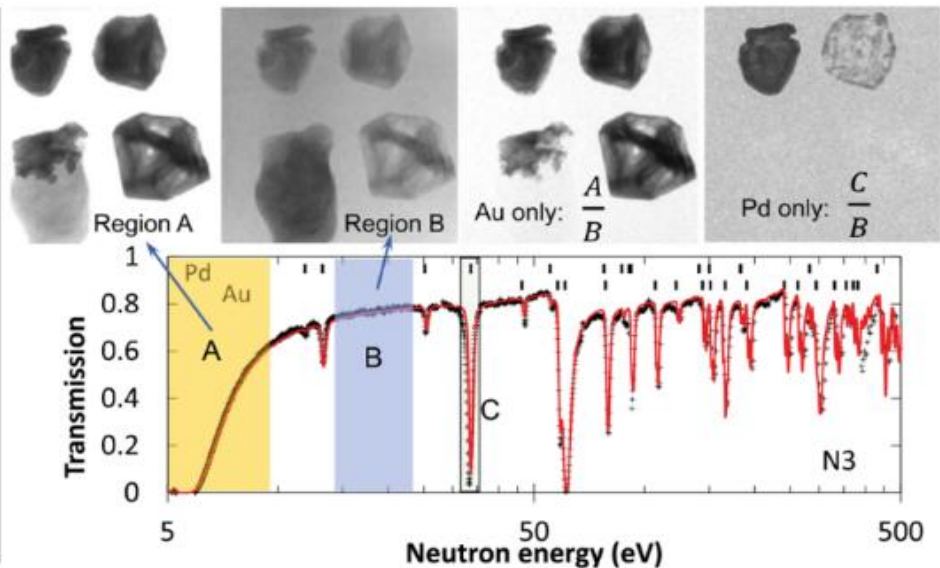
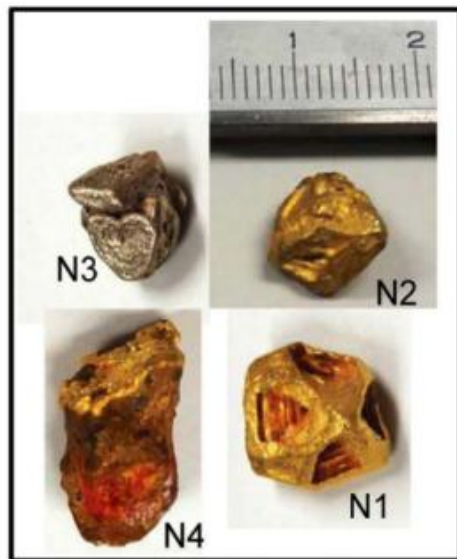
X射线成像



中子成像

白光中子共振成像

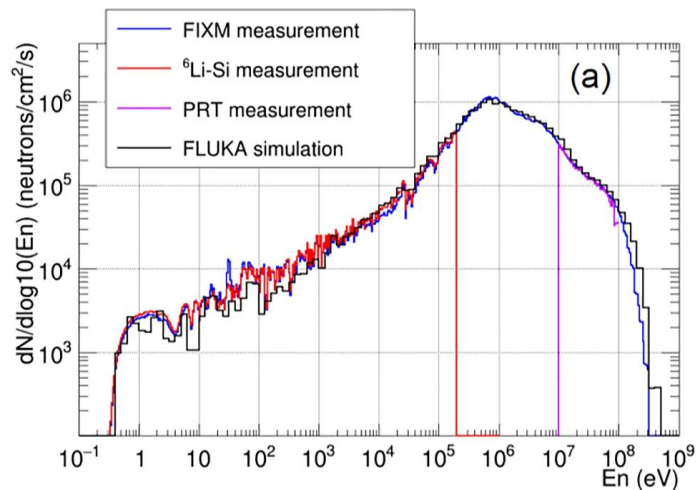
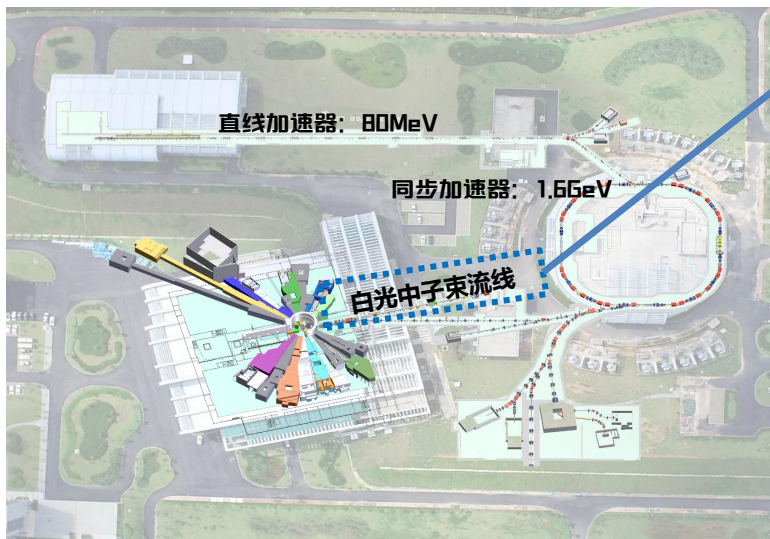
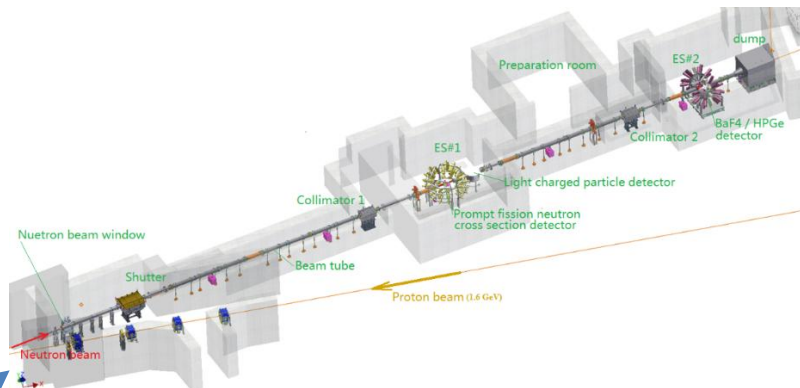
- White Neutron Resonance Imaging (WNRI)
- 利用核反应截面共振结构进行成像
- 增强图像对比度
- 核素成像与定量分析



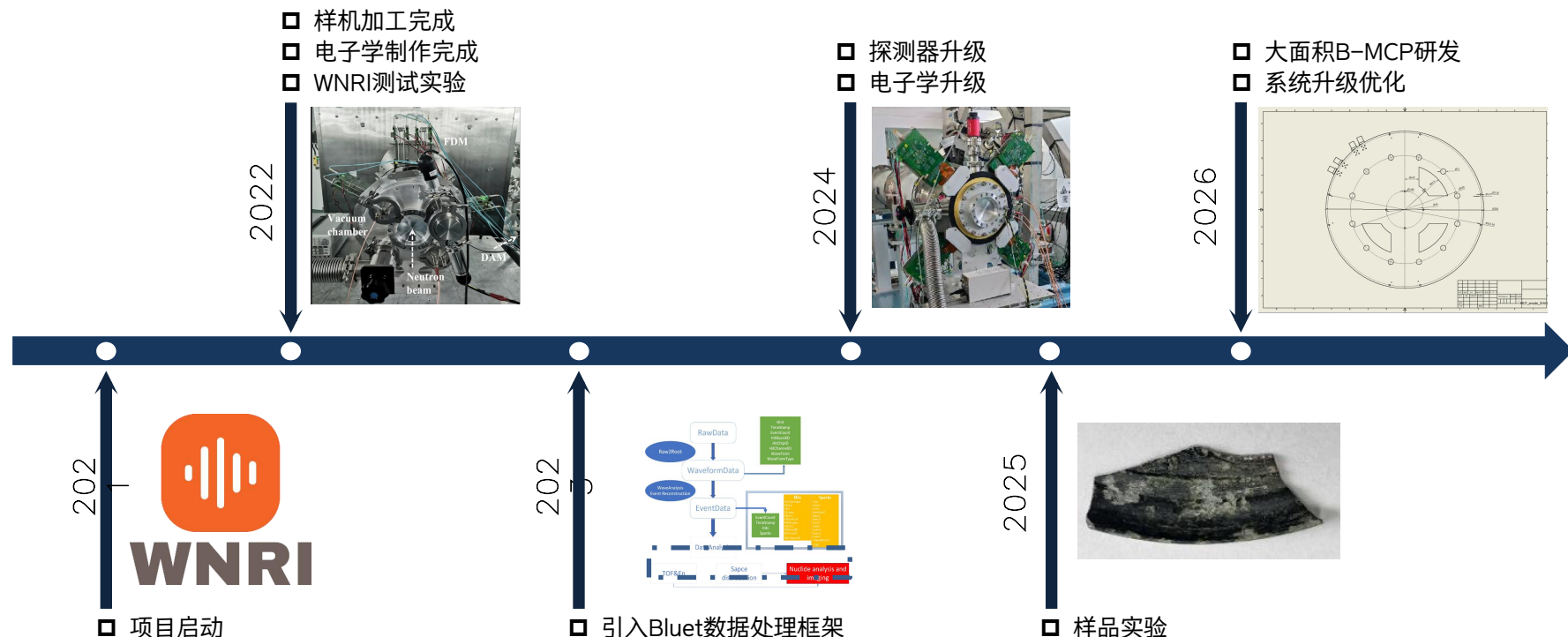
基于CSNS反角白光中子实验装置的成像研究

● CSNS反角白光中子实验装置Back-n:

- ▣ 脉冲型中子源: 25Hz
 - ▣ 宽能量范围: 0.5eV~300 MeV
 - ▣ 高中子通量: $\sim 1 \times 10^7 / \text{s} \cdot \text{cm}^2$
 - ▣ 高能分辨: 0.4%(@1 eV)~4.9%(@10 MeV)
- 能够开展eV~MeV能区白光中子共振成像
 - 可实现大部分核素的成像与鉴别



WNRI研究历程





中国科学技术大学
University of Science and Technology of China



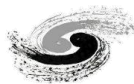
中国兵器工业集团 北方夜视科技研究院集团有限公司
北方夜视科技(南京)研究院有限公司
NORTH NIGHT VISION SCIENCE & TECHNOLOGY RESEARCH INSTITUTE GROUP CO., LTD.
NORTH NIGHT VISION SCIENCE & TECHNOLOGY (NANJING) RESEARCH INSTITUTE CO., LTD.



西安交通大学
XIAN JIAOTONG UNIVERSITY



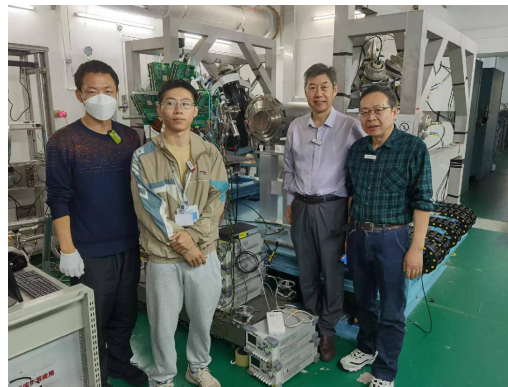
东华理工大学
EAST CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics
Chinese Academy of Sciences



中国散裂中子源
China Spallation Neutron Source

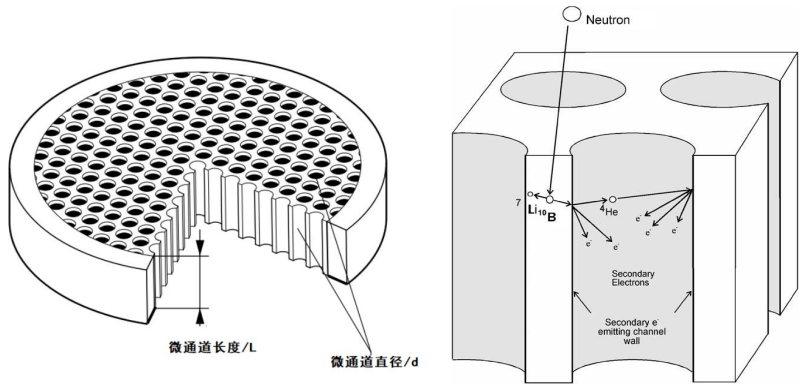




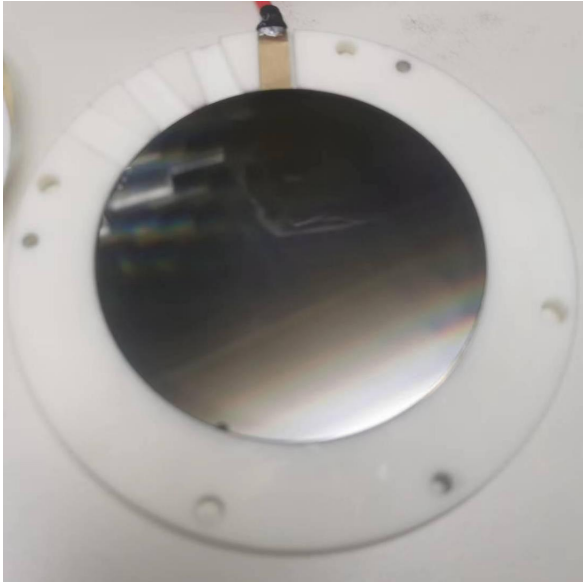
报告内容

- WNRI介绍
- **成像装置**
- 成像实验
- 数据分析
- 报告总结

掺硼微通道板



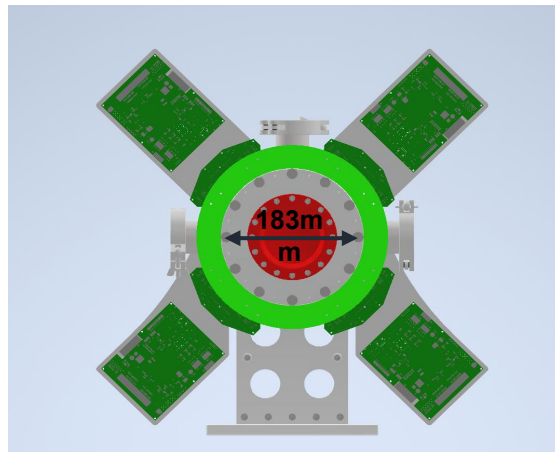
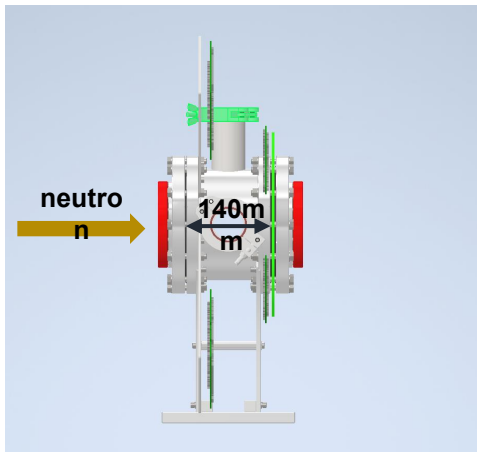
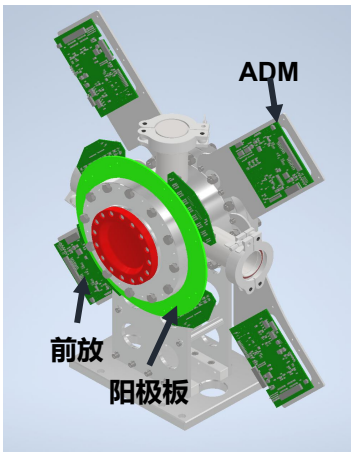
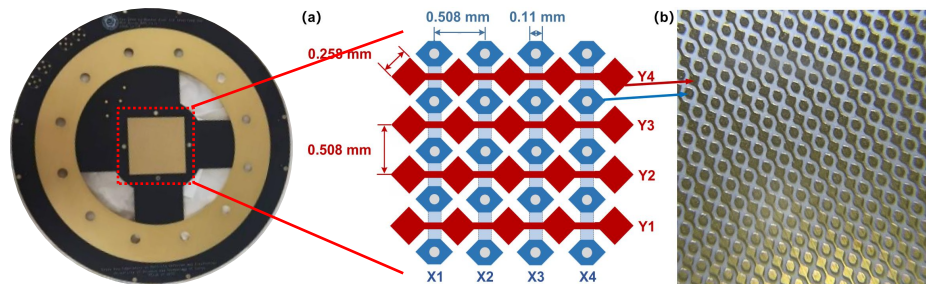
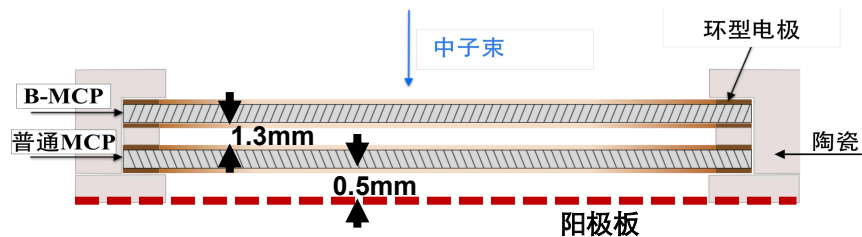
- 掺硼微通道板：¹⁰B-doped Microchannel Plate (B-MCP)
- 空间分辨：~60μm
- 时间分辨：~600ps
- 高中子探测效率：>17%@0.1eV



Parameters	B-MCP	Ordinary MCP
Diameter (mm)	56	56
Thickness (μm)	480	480
Pore diameter (μm)	8.8	8.8
Bias Angle (degree)	6	6
Pore area ratio (%)	~65	~65
Gain	69@800V	75830@1000V
¹⁰ B (mol%)	15	/

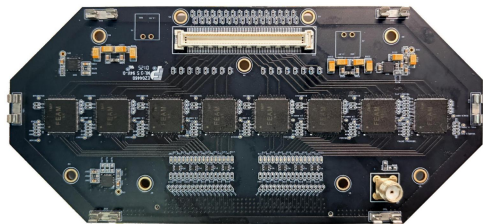
探测器结构

- B-MCP组件+阳极读出板、XY交叉读出阳极条：条宽~0.5mm，XY方向各128读出条
- 灵敏区面积：64*64mm²、真空腔气压：~10⁻⁴Pa



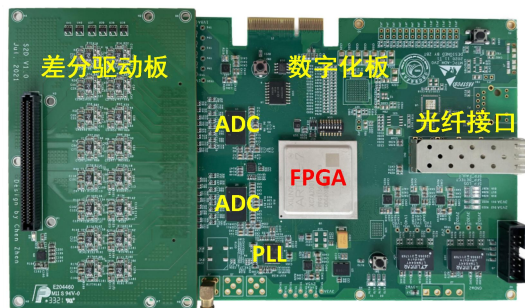
读出电子学

- 读出电子学：256通道
- 前端：FEAM芯片+波形采样ADC
- 后端：数据汇总模块



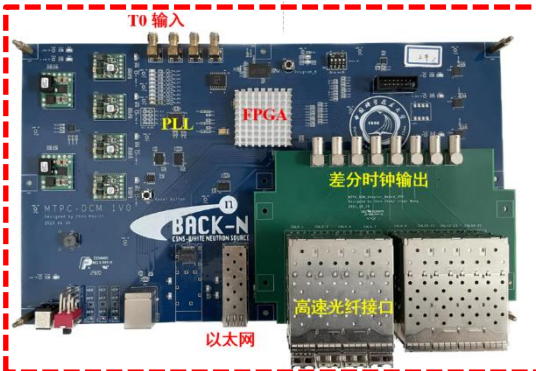
PAM*4

- ❑ 输出达峰时间：80 ns
- ❑ 动态范围：1000 fC



ADM*8

- ❑ 采样率：80 MSPS
- ❑ 采样分辨：12 bit



DCM*1

- ❑ 数据汇总 & 缓存
- ❑ 触发判选 & 时钟分发



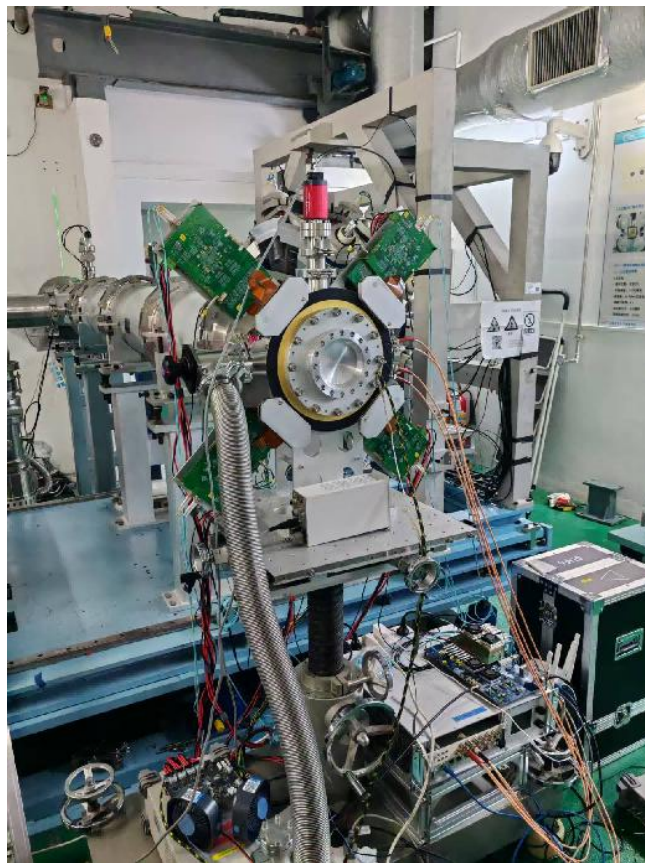
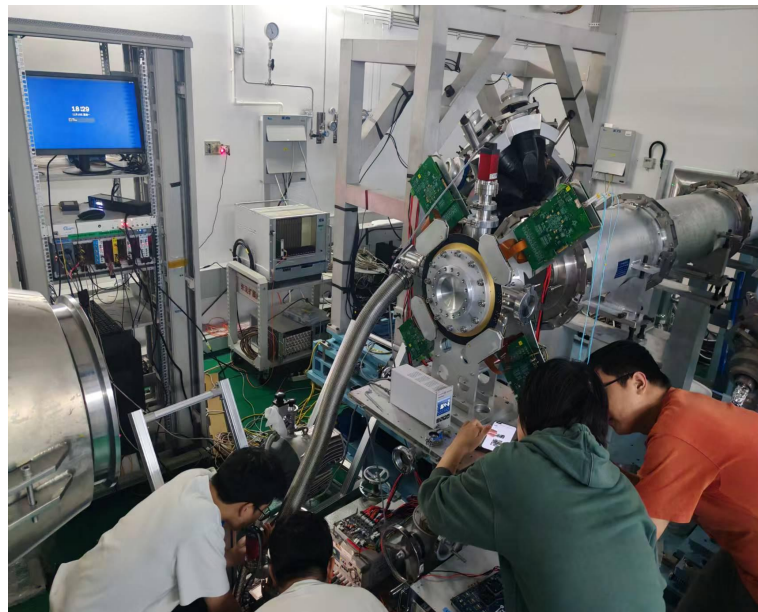
报告内容

- WNRI介绍
- 成像装置
- 成像实验
- 数据分析
- 报告总结

中子束流实验

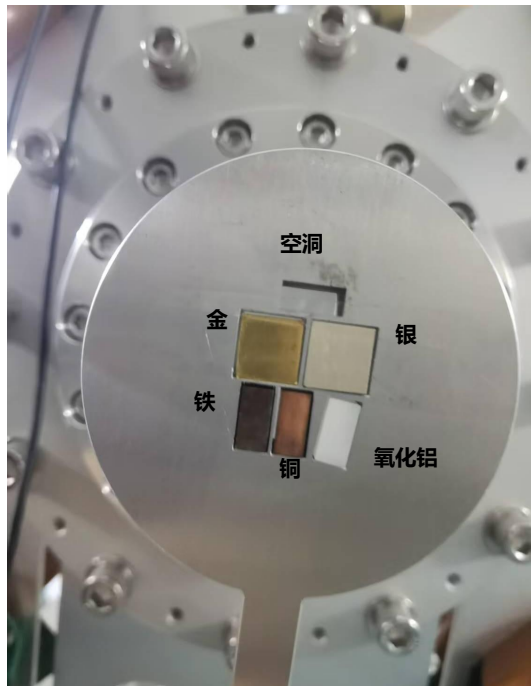
- 基于Back-n装置开展白光中子共振成像实验

- ▣ T0时间窗：0~12ms、阈值：X-30ADC、Y-40ADC
- ▣ 高压：1500V-1075V-975V-50V、真空：2.0E-4Pa
- ▣ 束斑：60-30-30、加速器功率：160kW



实验测量样品

- 标准样品：
- 金&银：10×10mm²、厚度1mm
- 铁/铜/氧化铝：5×10mm²、厚度10mm
- 铝支持结构：厚度10mm



- 铜镜文物样品：
- 安徽六安出土的战国时期铜镜碎片
- 主要成分：铜/锡/银/钴
- 样品尺寸：长约50mm，宽约20mm，厚度2mm~5mm



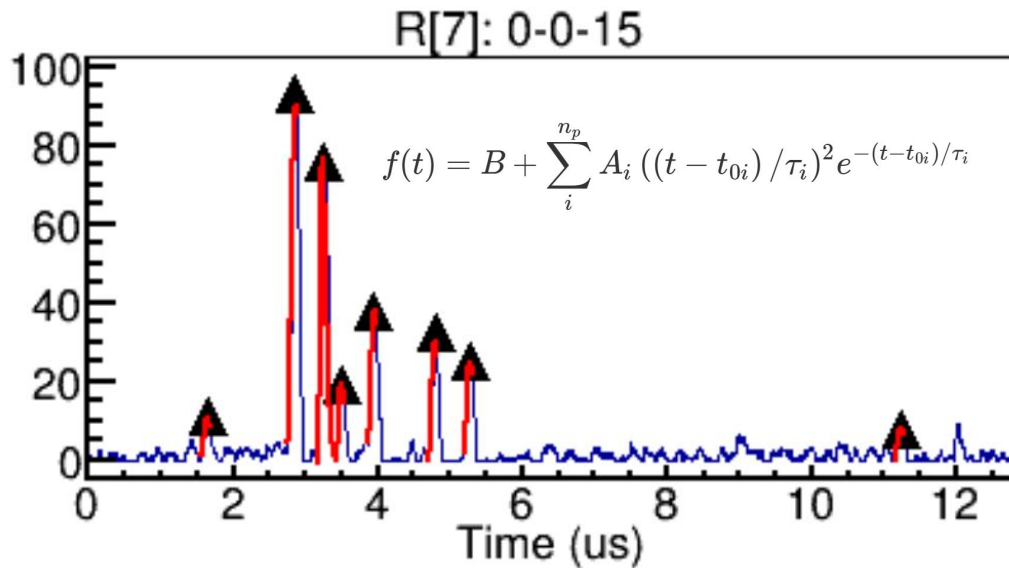


报告内容

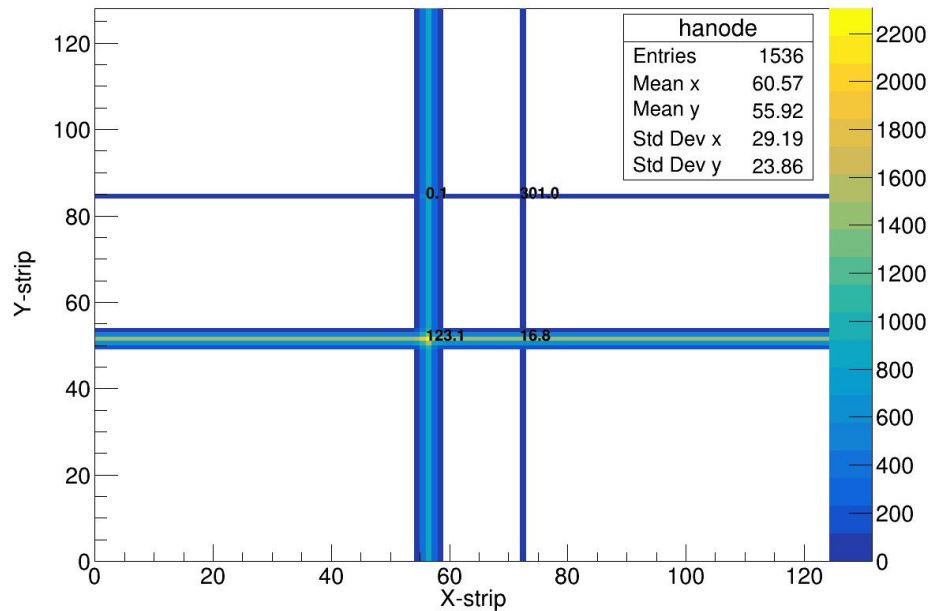
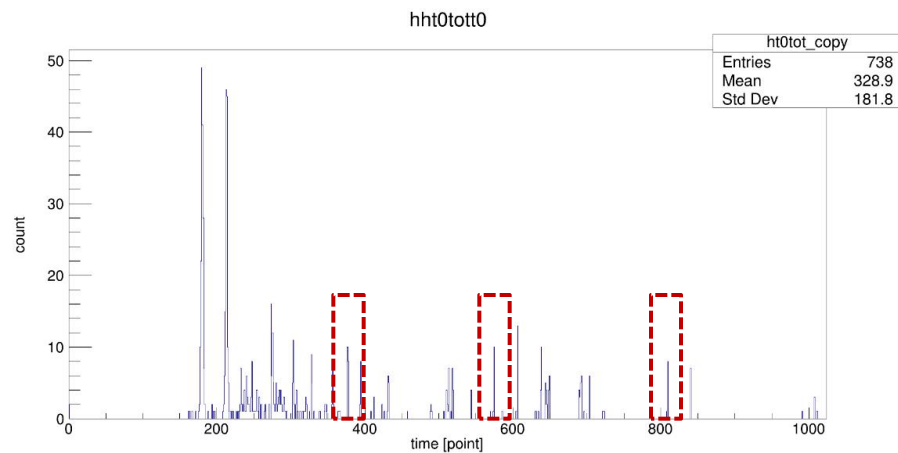
- WNRI介绍
- 成像装置
- 成像实验
- 数据分析
- 报告总结

波形分析

- 前放波形：上升沿80ns、脉宽200ns
- 高能区计数率高，存在多事例波形叠加
- 采用基线扣除和寻峰算法找到峰值位置
- 采用多函数拟合得到叠加波形的时间和幅度

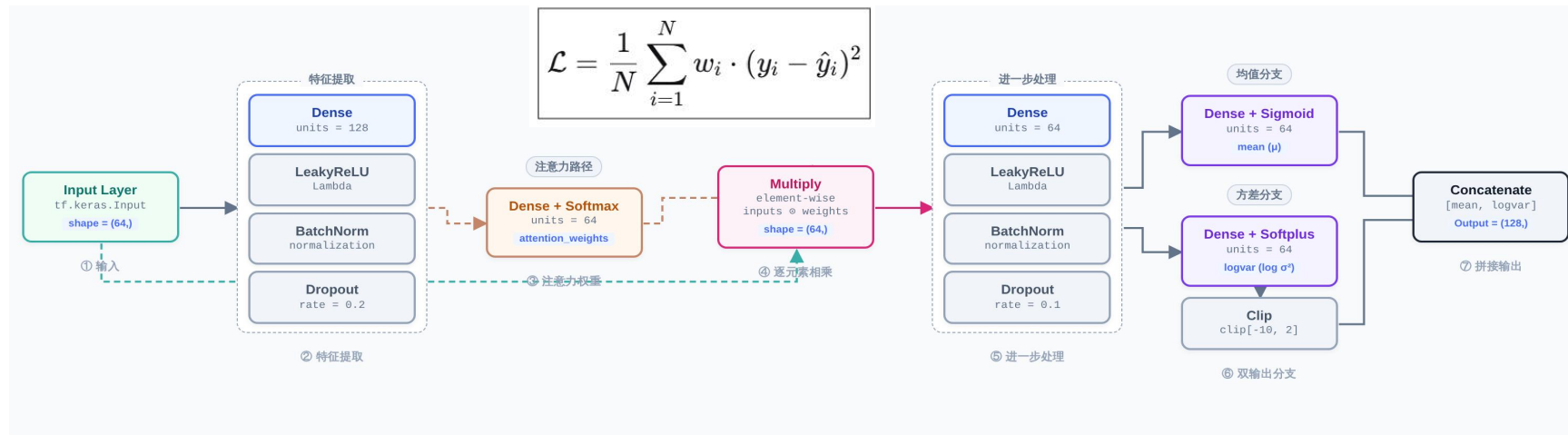


事例重建

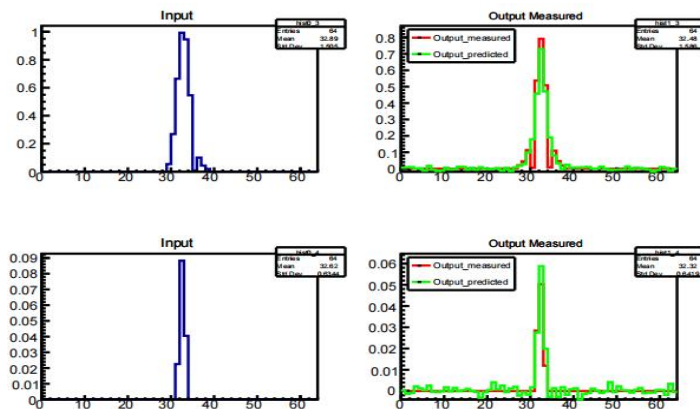


- 高能区中子技术率高
- 符合时间窗内存在多个中子事例
- 需通过匹配算法鉴别出真实的中子位置

事例重建

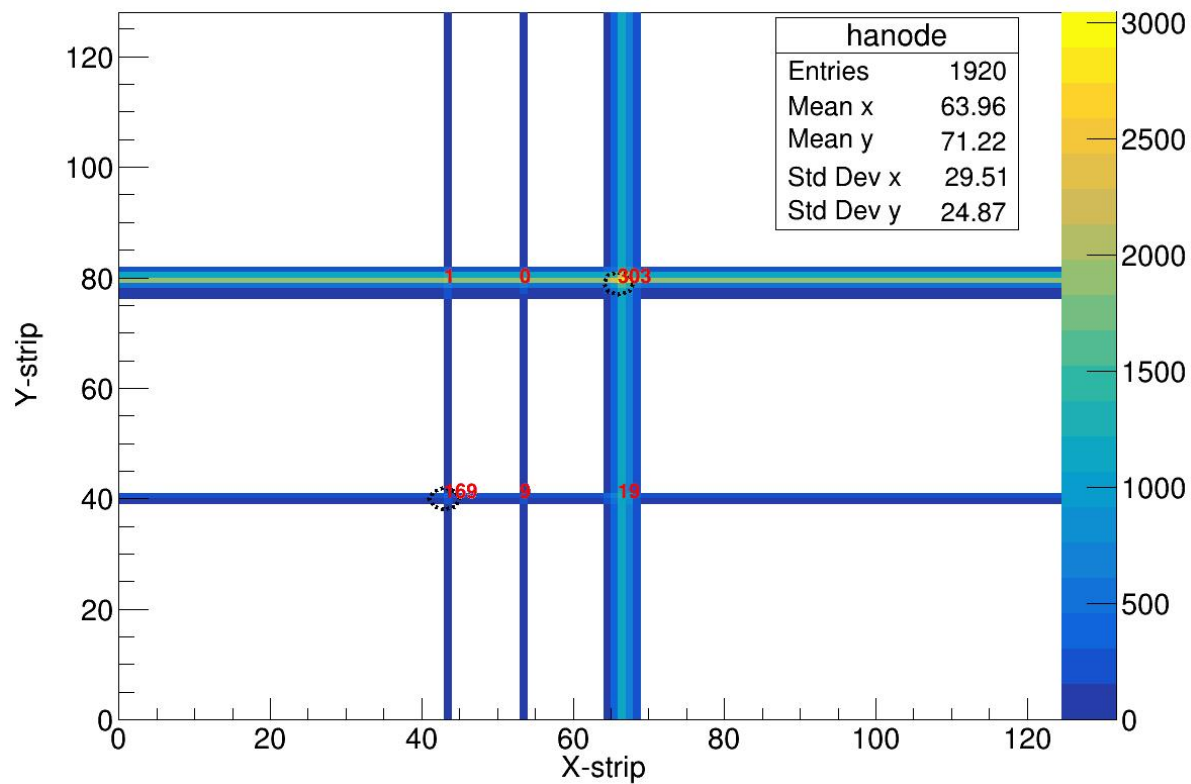


- 带自注意力机制的变分编码器，用于处理稀疏分布
- 定义加权MSE损失函数，用于训练神经网络预测Hit分布
- 神经网络通过Y分布(input)预测X分布(output)



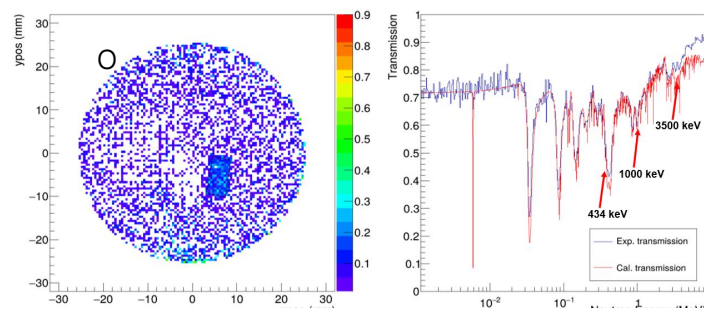
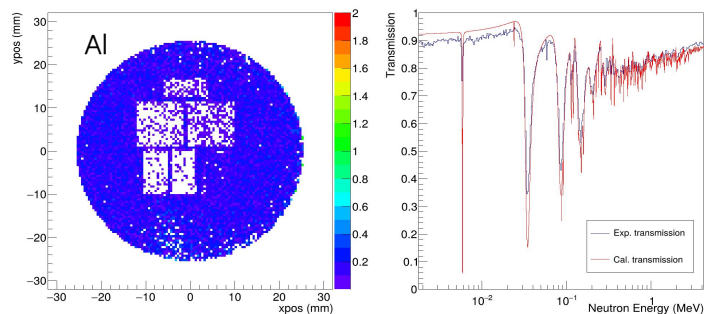
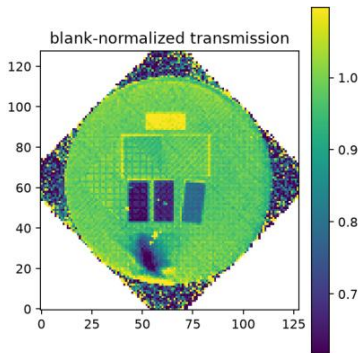
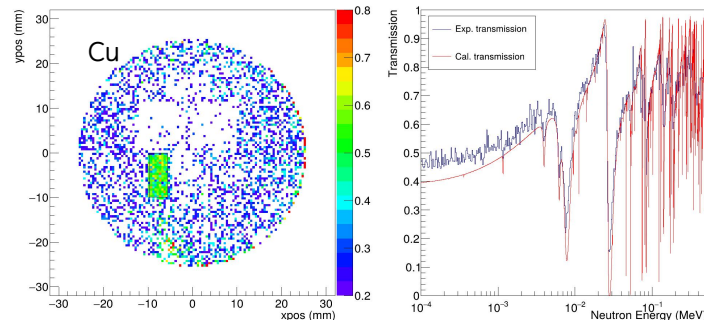
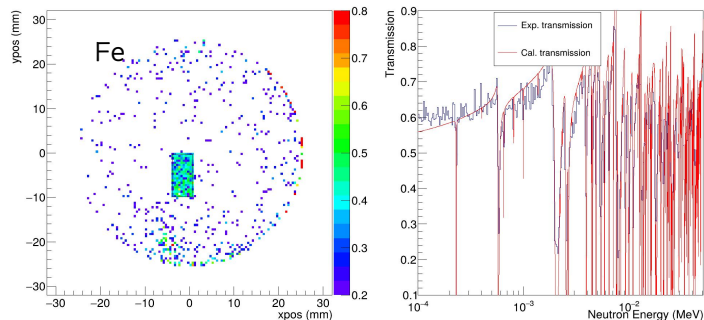
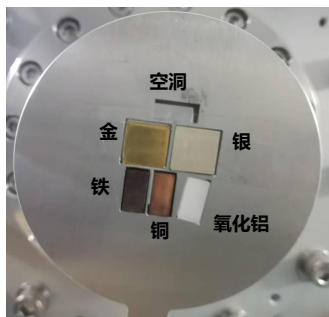
事例重建

- 采用 $1/(\chi^2/ndf)$ 表征匹配概率，根据匹配度顺序筛选中子事例



标准样品：共振成像

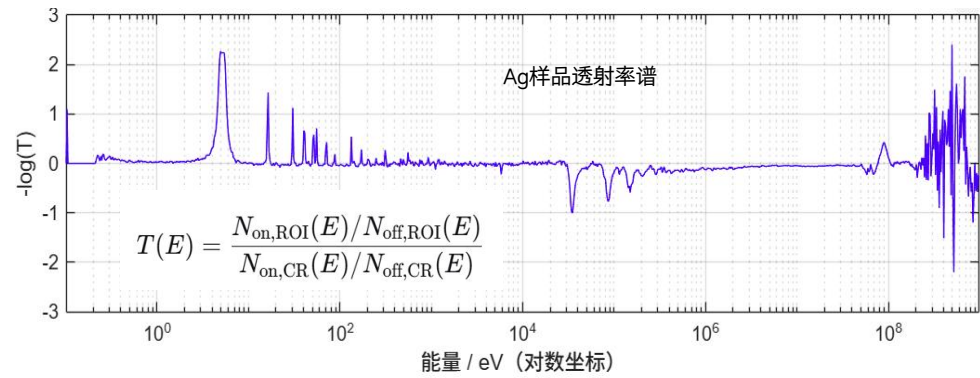
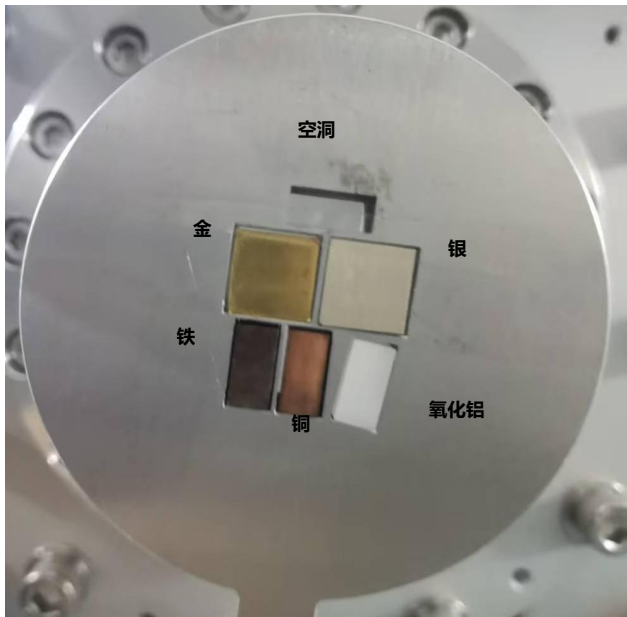
- 采用共振区增强对比方法，对特定元素进行成像
- 最高共振成像区间至MeV能区（氧元素）



标准样品：成分分析

- 使用泊松分布最大似然估计进行拟合

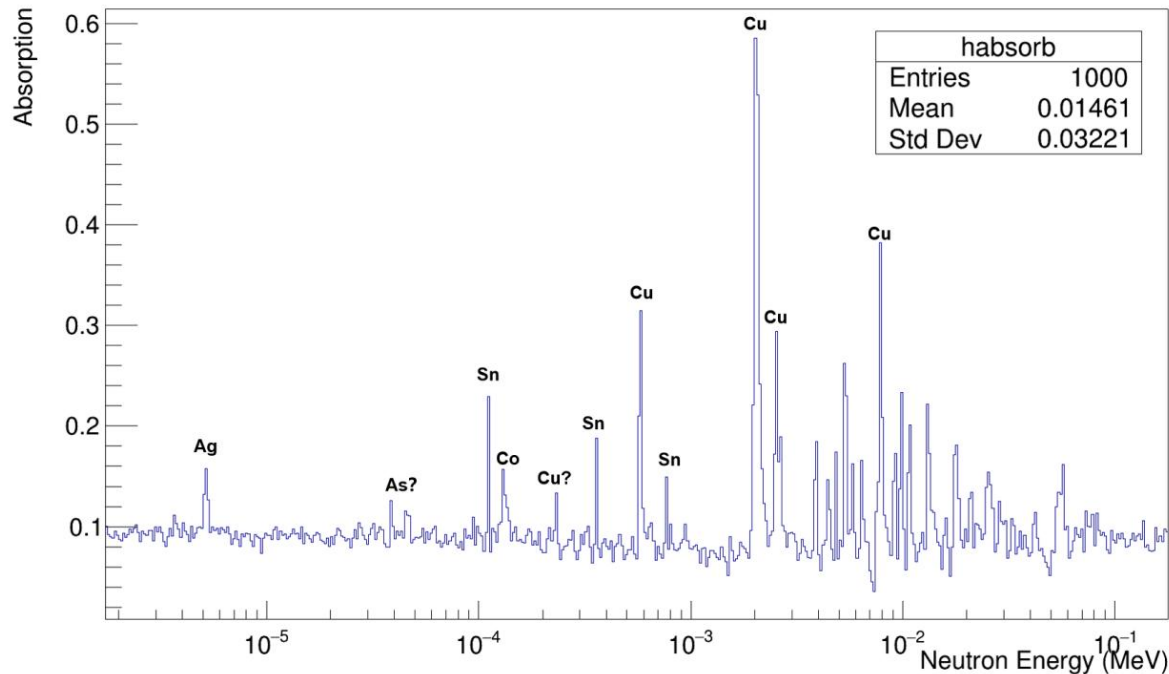
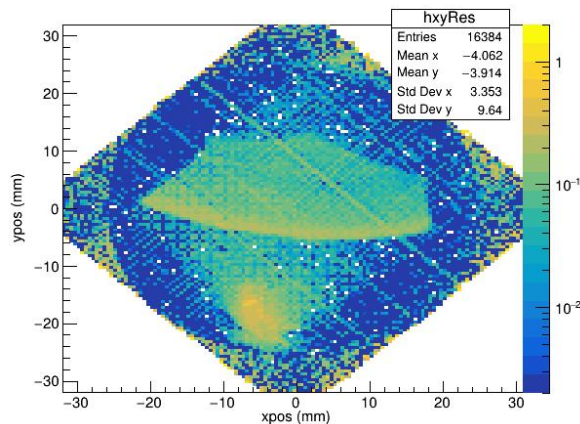
$$\ln L = \sum_j \{ \ln [L_j (\lambda_s + \lambda_{b,\text{off}} \mid N_{\text{off}}(E_j))] + \ln [L_j (\lambda_s T(E_j) + \lambda_{b,\text{on}} \mid N_{\text{on}}(E_j))] \}$$



元素	设计厚度/mm	分析厚度/mm	相对误差
Au	1.000	1.081	8.1%
Ag	1.000	1.077	7.7%
Fe	10.000	8.961	10.4%
Cu	10.000	9.300	7.0%

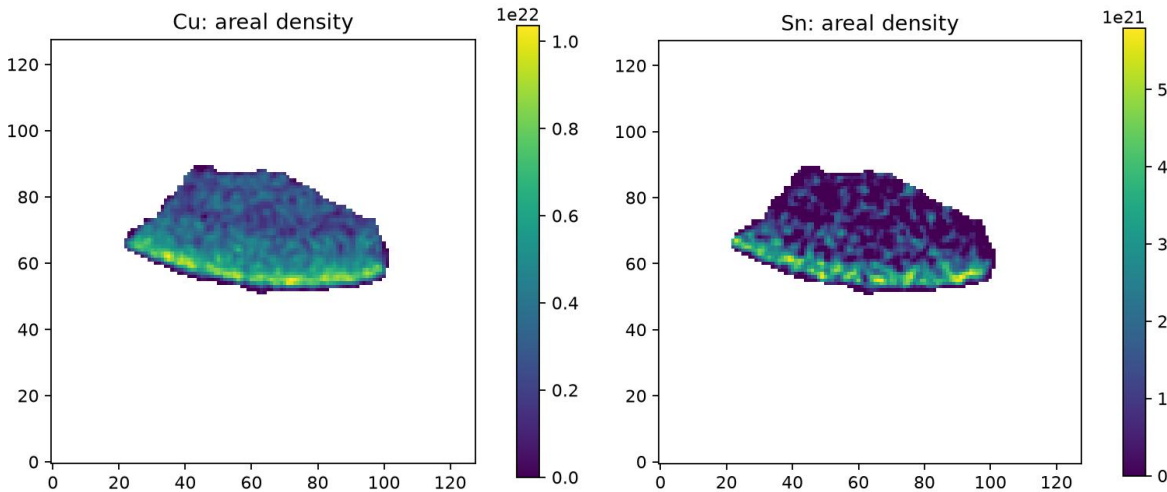
铜镜样品

- 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

- 元素空间分布 & 元素定量分析



元素	面密度 (atoms/cm ²)	质量面密 (mg/cm ²)	占比
Cu	5.03×10 ²¹	530.58	62.24%
Sn	1.62×10 ²¹	319.79	37.51%
Ag	7.55×10 ¹⁸	1.35	0.16%
Co	7.71×10 ¹⁸	0.75	0.09%



报告内容

- WNRI介绍
- 成像装置
- 成像实验
- 数据分析
- 报告总结

报告总结

- CSNS已完成中子共振成像探测器系统的研制
- 已开展样品成像测量并验证了中子共振成像方法的可行性
- 开展大面积成像探测器的研制
- 开展高能区 ($>100\text{keV}$) 高精度共振成像分析
- 开展同位素含量分析方法研究



WNRI

谢谢

yih@ihep.ac.cn