

中子共振成像前期进展—— 基于CMOS和B-MCP

中国科学院高能物理研究所，散裂中子源

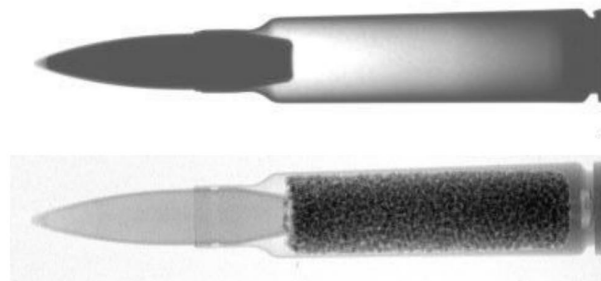
李强
2025.07.07

中子成像

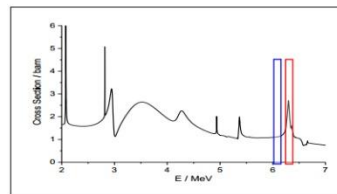
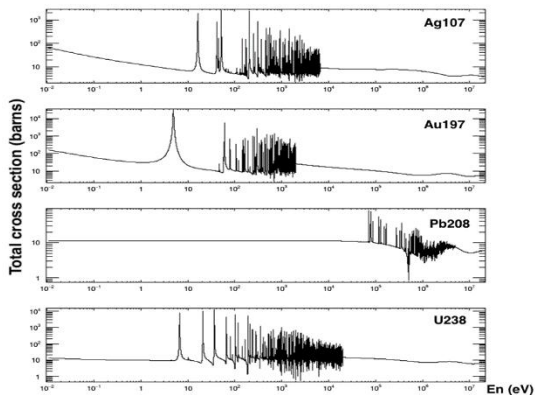
原理：透射衰减的强度变化

特点：轻元素敏感，重元素穿透（与X射线互补）

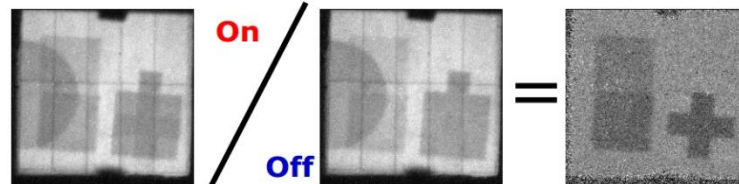
应用：含氢材料、同位素、金属包裹物等



中子共振成像



■ C
□ Al
■ Cu



每个核素都有独特的中子吸收峰结构
(特征共振峰，氢除外)

有/无共振峰两图像比较：对共振核素单独成像

获得样品透射信息、元素组成、每种共振元素分布情况
可以给出比透射成像更多的被检测物信息

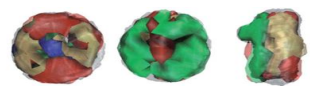
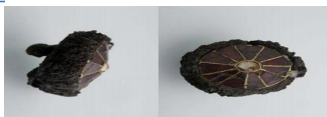
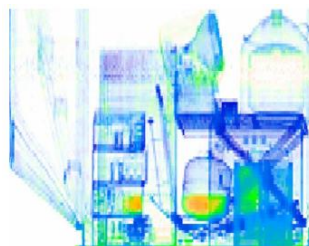


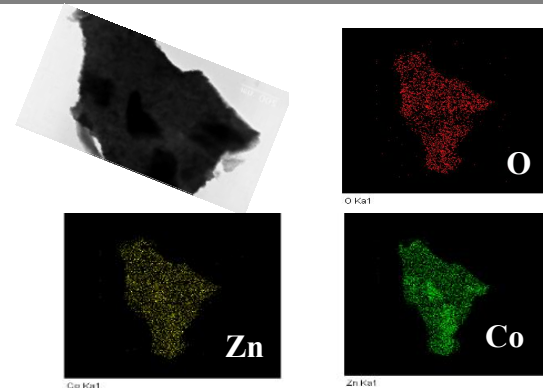
Fig. 6 Top part: Neutron tomography (previous result¹⁾). Bottom part: 3D visualization of the elements in the fibula (isosurface color map: Cu = green, Fe = red, Au = yellow, Ag = blue).



2015 日本古代胸针



2005 违禁品模拟物



元素Mapping

考古

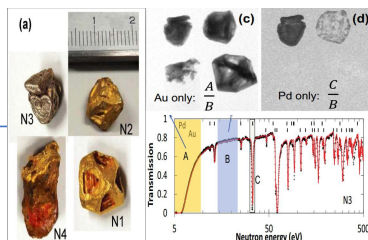
冶金

安检

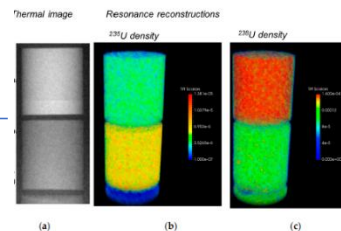
核燃料

新材料

新能源



2017 J-PARC 铅金块



2017 ALAMOS 铀棒

一、对探测器的要求

- 1、高空间分辨率
- 2、高时间分辨率
- 3、宽中子能谱响应
- 4、高中子探测效率

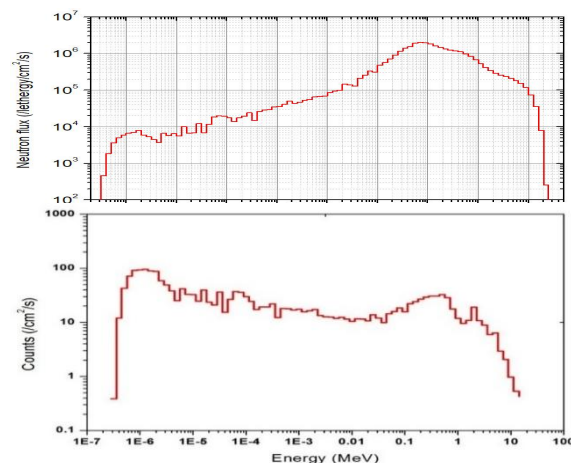
四点同时满足！

二、对中子源的要求

- 1、合适的束斑尺寸
- 2、高时间分辨（脉冲时间短、飞行距离长）
- 3、宽能谱（覆盖共振区0.5eV~10MeV）
- 4、**高注量率（尤其高能区中子）**

为什么是白光中子源？

- 1、束斑模式可调：从 $\Phi 20$ mm到 90×90 mm大束斑模式
- 2、短束团模式：时间分辨 < 3.5 ns； γ -flash定时精度 < 1 ns
- 3、25Hz脉冲频率：束团之间互不干扰
- 4、能谱结构：宽能谱且高能区注量率高

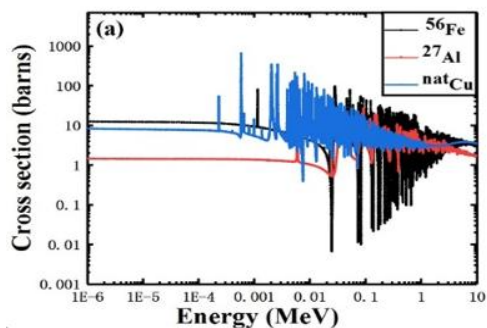
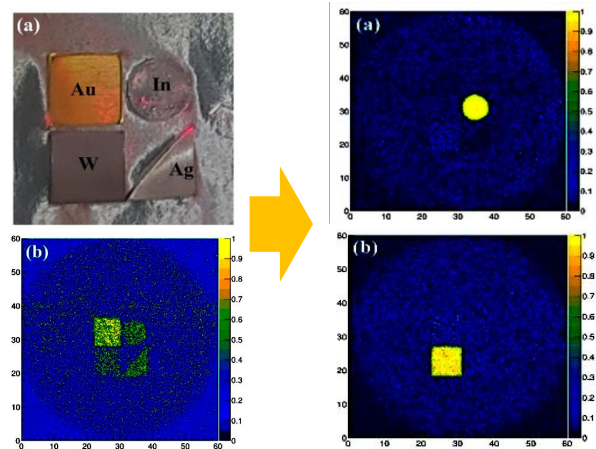
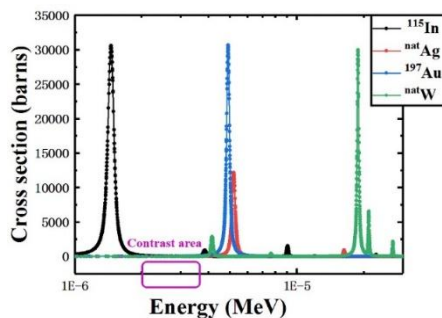
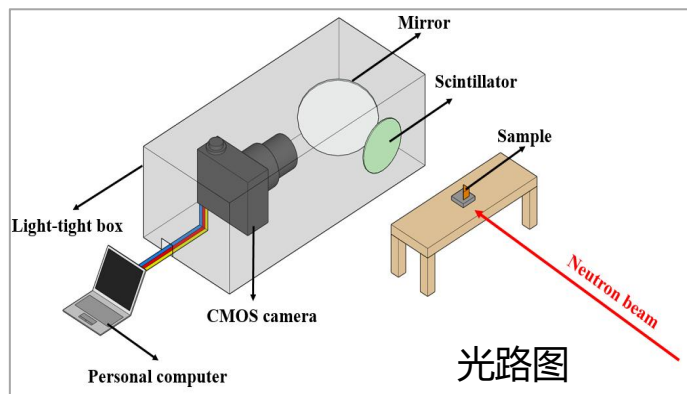


三、该技术本身难点

核素越轻，共振峰能量位置越高（效率越低），峰强也越小，峰宽（勒谱）也越窄

检测难度随核素核子数减少是陡然上升的！

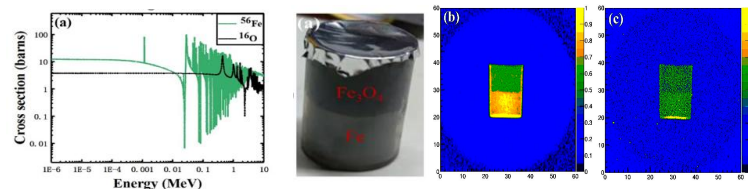
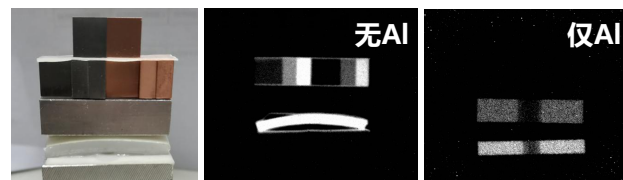
SNS 白光中子共振成像 —— CMOS相机成像实验



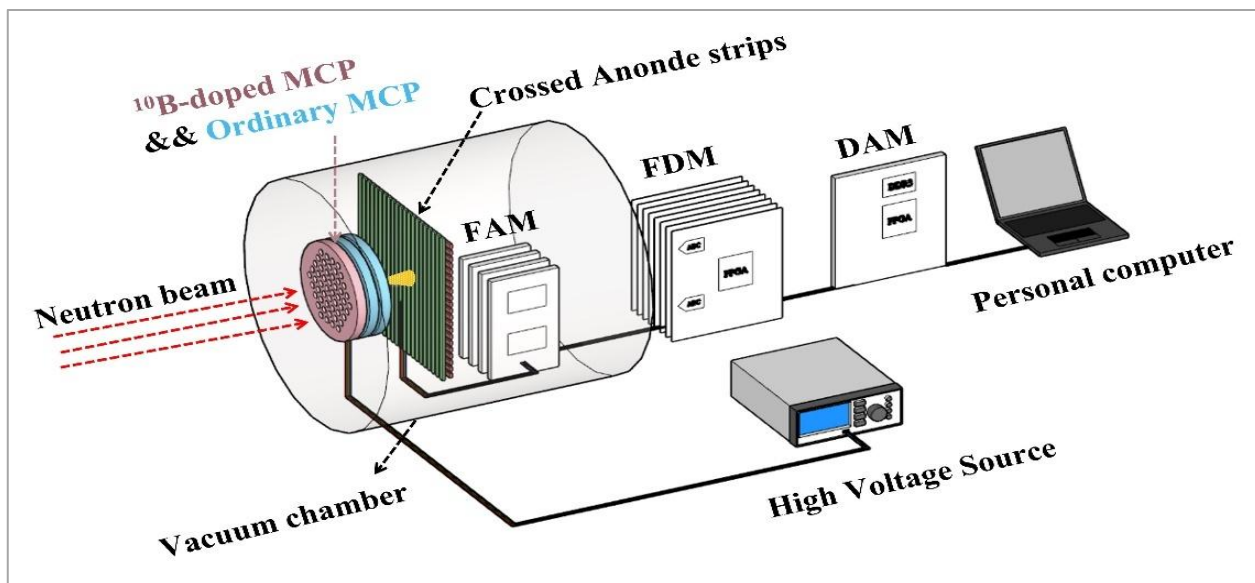
$$-\ln\left(\frac{I_x}{I_{air}}\right) = N_a \cdot \sigma_a(E) \cdot x_a,$$

$$\begin{pmatrix} \sigma_a^1 & \sigma_b^1 & \sigma_c^1 & \sigma_d^1 \\ \sigma_a^2 & \sigma_b^2 & \sigma_c^2 & \sigma_d^2 \\ \sigma_a^3 & \sigma_b^3 & \sigma_c^3 & \sigma_d^3 \\ \sigma_a^4 & \sigma_b^4 & \sigma_c^4 & \sigma_d^4 \\ \sigma_a^5 & \sigma_b^5 & \sigma_c^5 & \sigma_d^5 \\ \sigma_a^6 & \sigma_b^6 & \sigma_c^6 & \sigma_d^6 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \chi_a \\ \chi_b \\ \chi_c \\ \chi_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b^1 \\ b^2 \\ b^3 \\ b^4 \\ b^5 \\ b^6 \end{pmatrix}.$$

方法：截面对比成像
中子能量分区成像



CMOS短板：探测效率不足

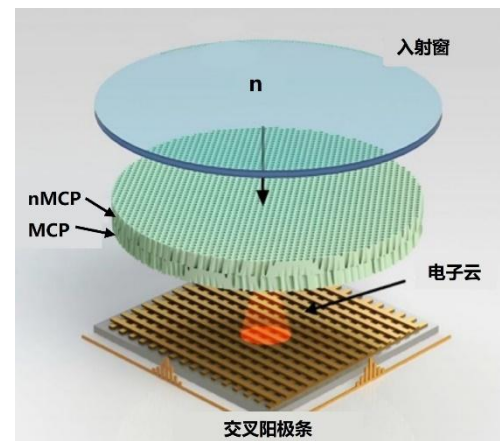


为什么是交叉阳极条：

- 1、成本低（路数少）
- 2、耐辐照

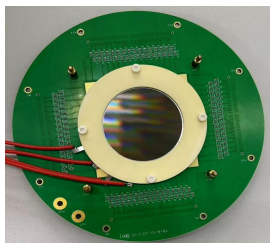
为什么是 ^{10}B -MCP：

- 1、空间分辨好（ $30\mu\text{m}$ 以下，受限于电子学、束流）
- 2、时间分辨好（ 1ns 以下，取决于电子学、束流）
- 3、中子能谱响应 覆盖 $0.5\text{eV} \sim 10\text{ MeV}$
- 4、中子探测效率高
- 5、中子事例型读出





白光中子共振成像 —— nMCP中子能量分辨成像技术



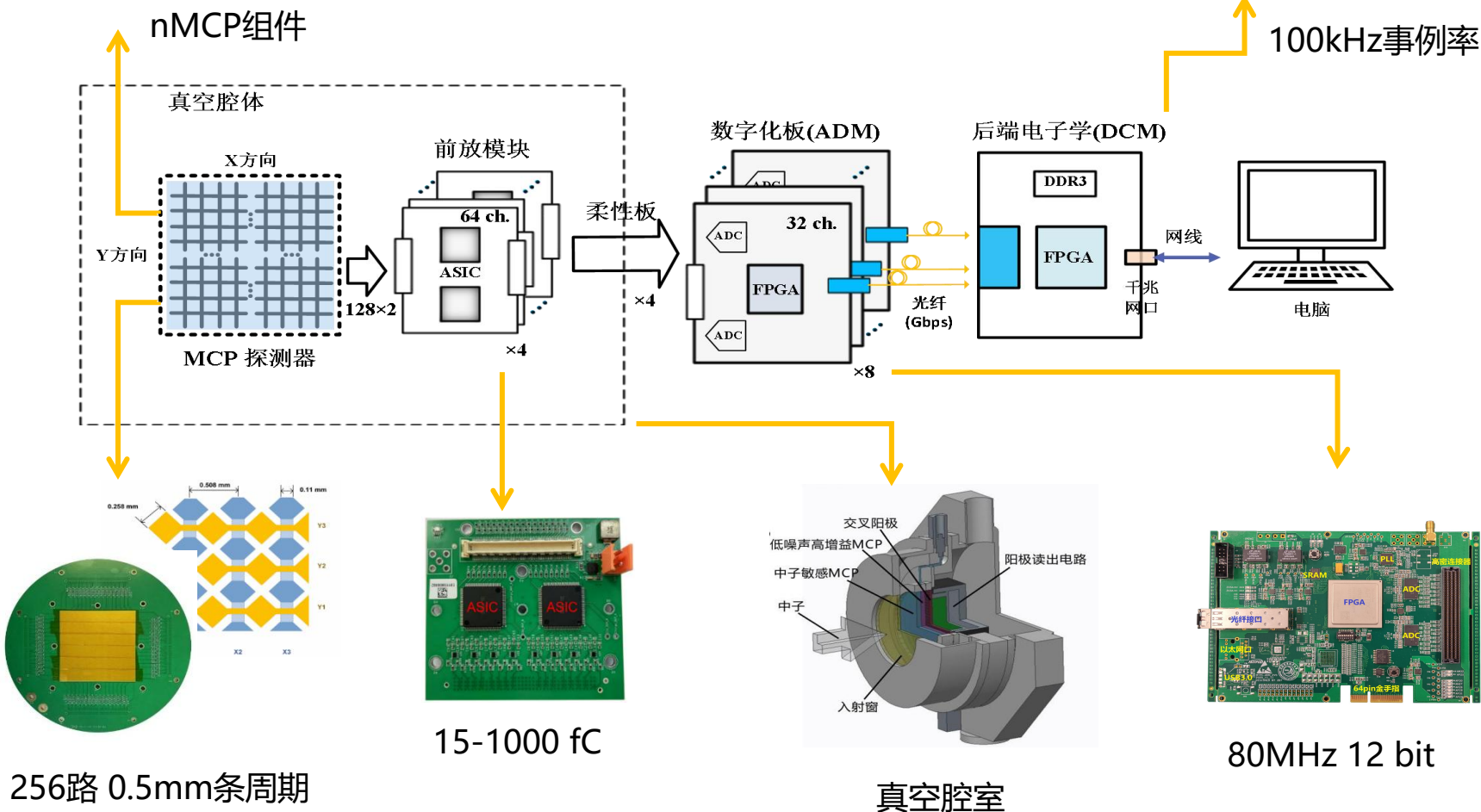
2021年 第一版 10mol%¹⁰B ϕ 33mm

2022年 第二版 15mol%¹⁰B ϕ 56mm

2024年 第三版 MCP优化、电子学升级

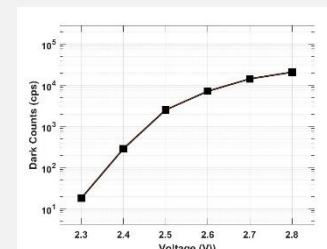
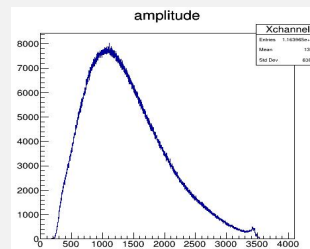


100kHz事例率



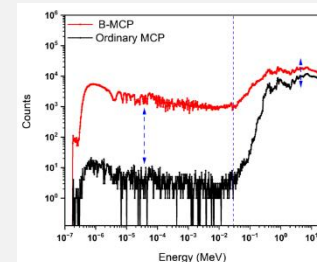
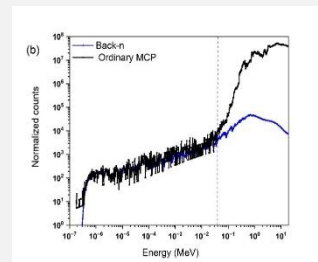
暗计数过多问题

暗计数与中子事例交叠
偏压越高，暗计数越多



nMCP复杂响应问题

30keV以上，能谱异常
MCP成分对高能中子响应

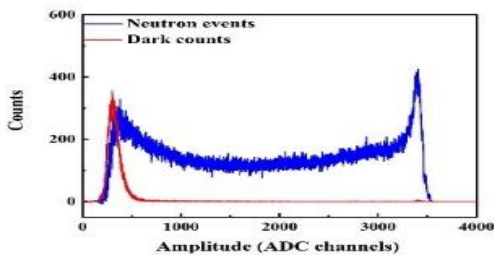


探测效率不符合预期问题

探测效率仅为¹⁰B含量预期的43%!

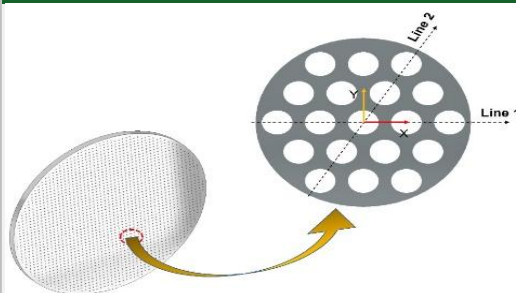
初次实验
三个问题

暗计数研究



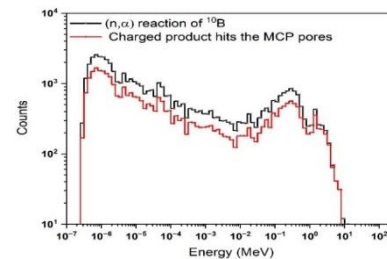
MCP结构和分压研究，暗计数分离
nMCP电子清刷，进一步降低

探测效率研究

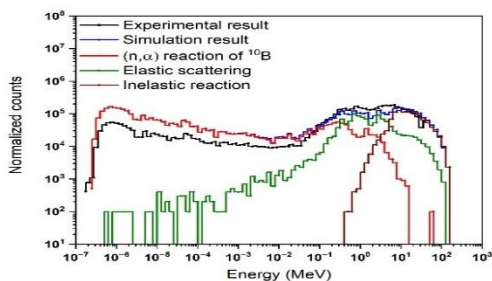


SiO ₂	¹⁰ B ₂ O ₃	PbO	Bi ₂ O ₃	K ₂ O
43%	8%	24%	13%	8%

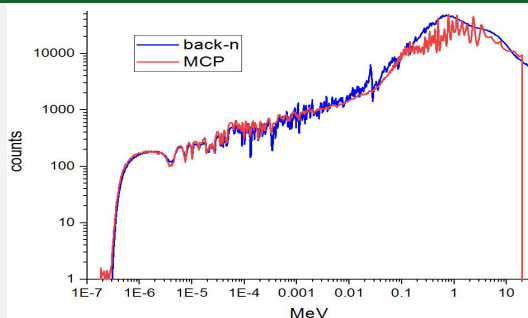
40%损失于MCP基底!



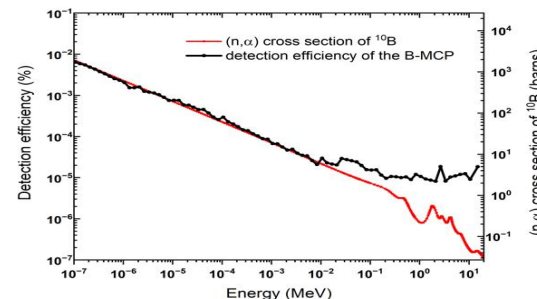
nMCP复杂响应研究



O弹散反应75% (Si、B、Bi、Pb)
Si、O (n, α)、(n, p) 82%等



等效复杂截面
能谱恢复吻合

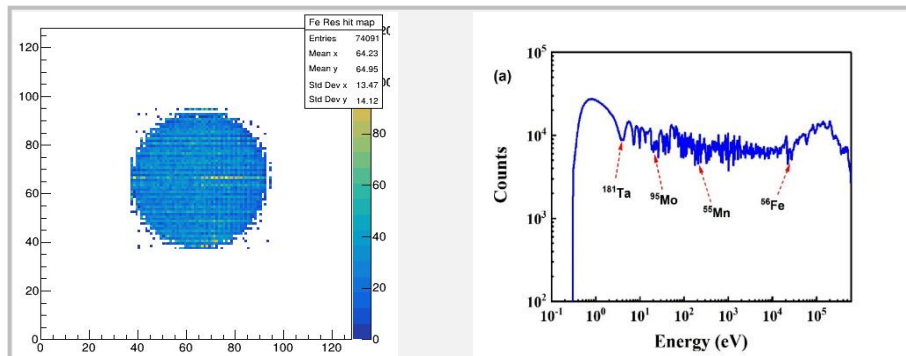
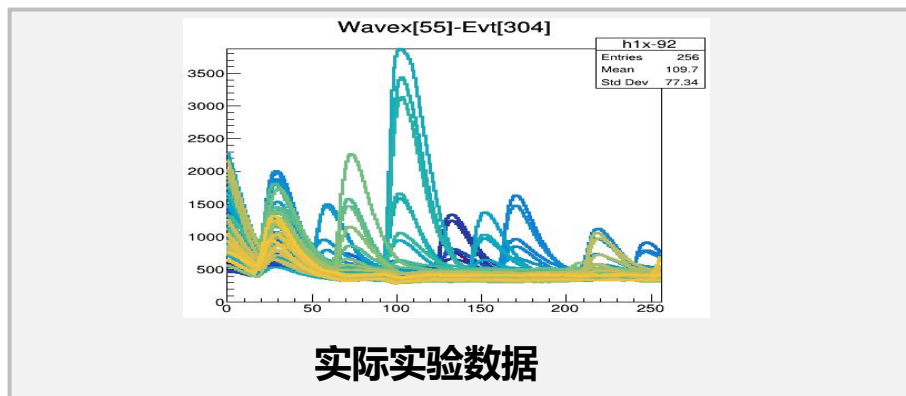
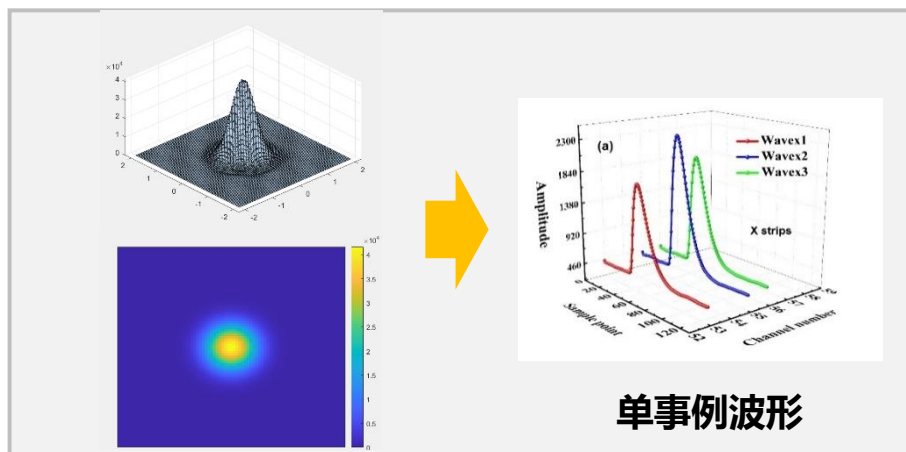


高能区的效率补偿效应!

二次实验：重建束斑和飞行时间谱

• 数据处理：

- **raw数据转换**：基线和波形特征分析
- **事例重建**：一个事例感应相邻多个通道，判断单事例并定位（中心法和重心法）
- **多重事例分析**：一个信号窗包含多个中子事例的情况（主要集中在高能区），将多个中子事例区分出来并统计
- **波形分析与本底扣除**：根据信号波形特点分类，剔除无效的干扰事例
- **飞行时间谱**：根据有效事例绘制飞行时间谱；绘制特定图像区域飞行时间谱
- **束斑图像**：根据有效事例绘制束斑图像；绘制能量选择的束斑图像



独立自主开发基于B-MCP的中子能量分辨成像技术，
实现中子位置分辨、能量分辨和高效率测量，提高核素
识别成像对比度

位置分辨：0.5mm或~0.1mm（电荷重心算法）

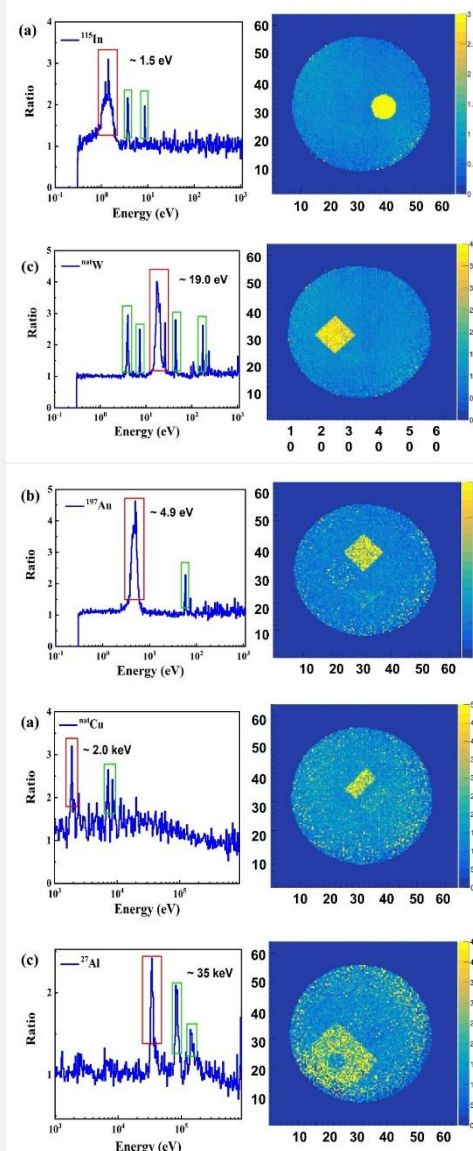
能量分辨：时间分辨10ns（~ [0.25%@1MeV](#)）

探测效率：15mol% ^{10}B （~ 8%@1eV）

仍存在的
难点

1. 高能区共振核素（C、N等0.5~10 MeV）

2. 定量分析要求更高计数率或牺牲空间分辨



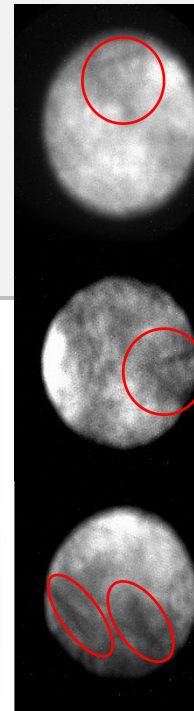
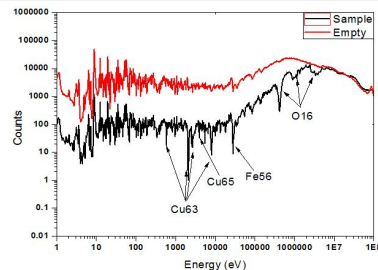
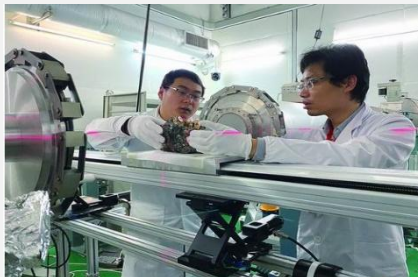
从0.5eV~到100 keV!

南海沉船文物检测实验

识别核素共振峰包括：

Cu63、Cu65、Fe56、O16等

识别部分铜币轮廓和位置分布情况

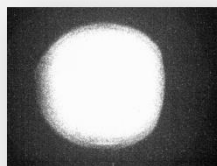


极化中子实验

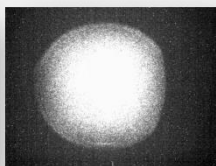
极化 ^3He 系统在极化/退极化状态下不同能量中子透过效率
验证了 ^3He 对短波中子的极化效率差于长波中子

极化 ^3He

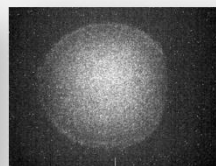
退极化 ^3He



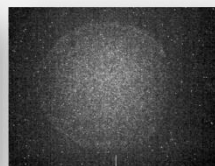
2.5~2.7 Å



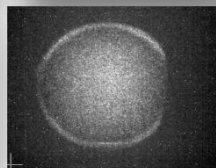
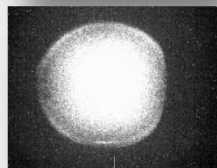
3.5~3.7 Å



4.5~4.7 Å



5.5~5.7 Å



- 1 考古套箱中子透射成像
- 2 方铅矿、自然铜和朱砂矿古矿石结构成像
- 3 铜、铁等中重核素古钱币共振成像实验
- 4 钟乳石孔隙结构成像实验
- 5 金、银等样品的共振成像实验

