

基于掺硼MCP的中子共振成像 实验研究进展

报告人：邱奕嘉

中国科学院高能物理研究所

散裂中子源科学中心

目 录

- 研究背景
- NRTI@Back-n
- 总结

目 录

- 研究背景
- NRTI@Back-n
- 总结

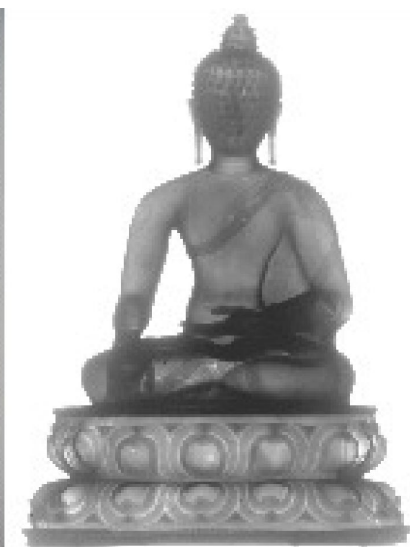
● 中子成像特点

- 中子穿透能力强
- 有磁矩
- 与原子核相互作用
- 可研究尺度范围大

光学成像



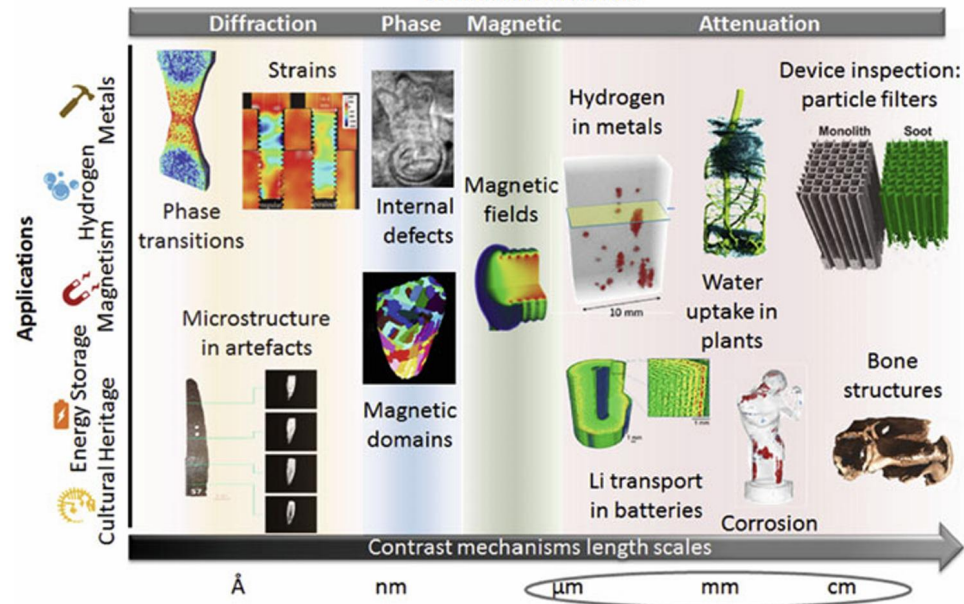
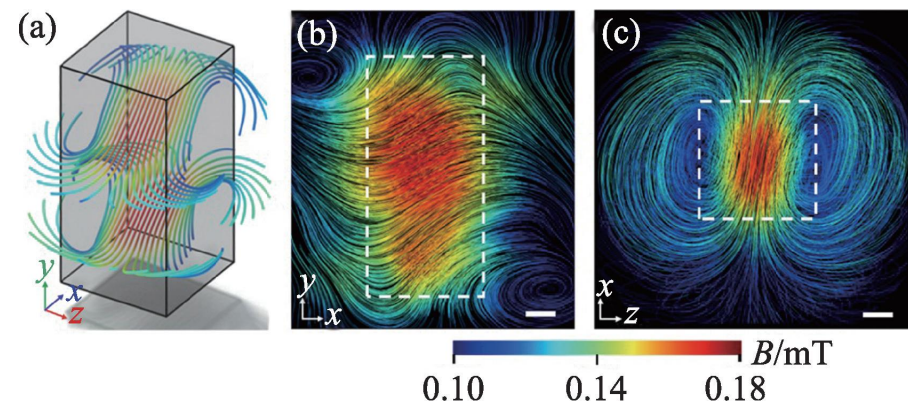
X射线成像



中子成像

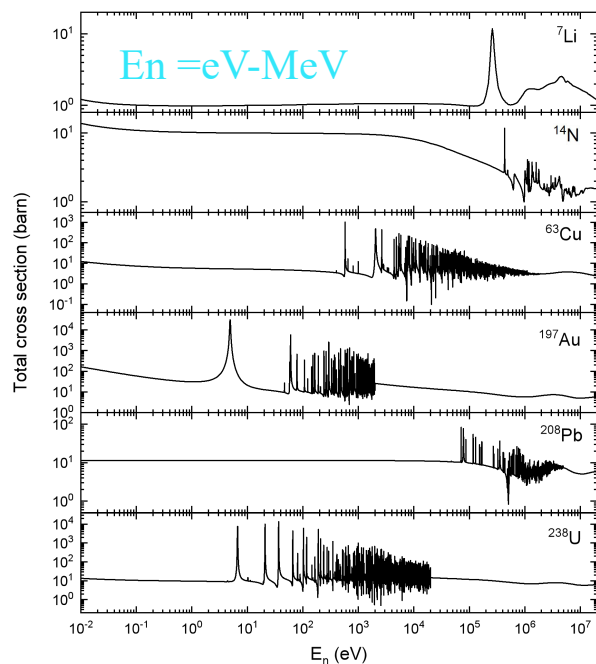


极化中子成像观测超导体磁感线分布

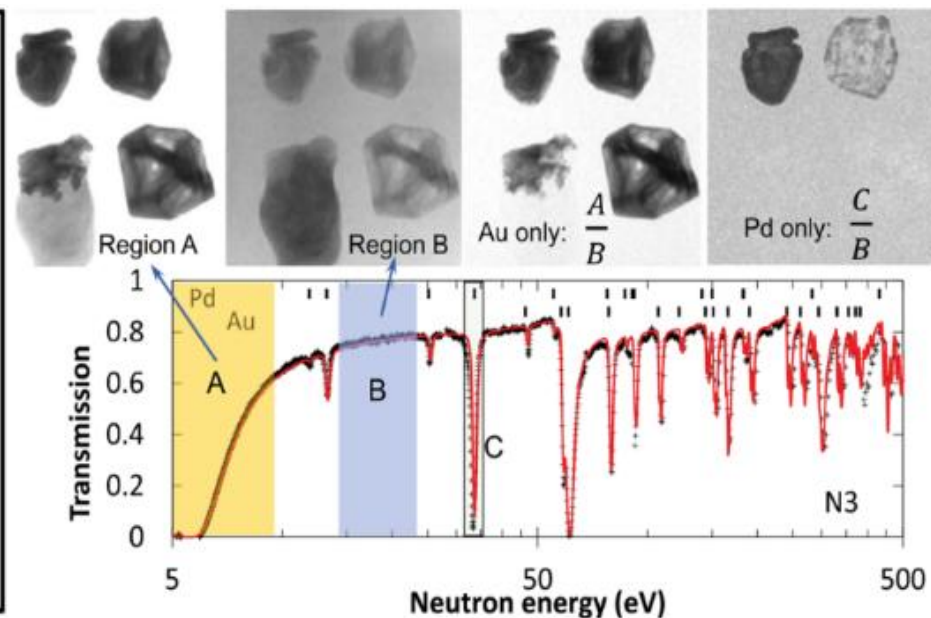
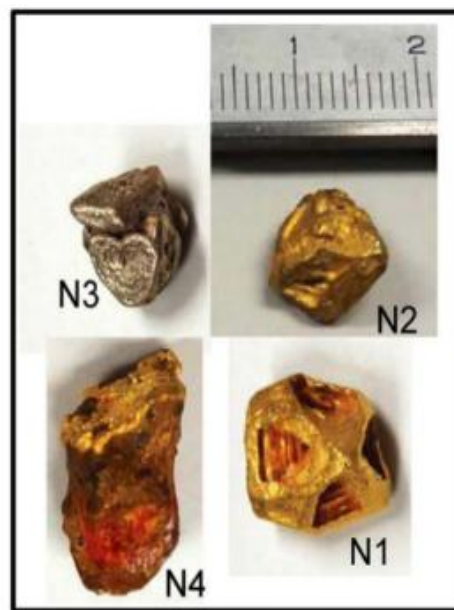


● 中子共振透射成像

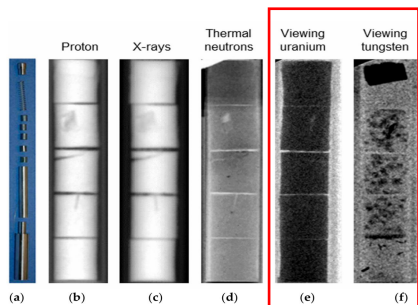
- 利用核反应截面共振结构进行成像
- 核素成像与定量分析



几种常见元素主同位素的中子核反应截面



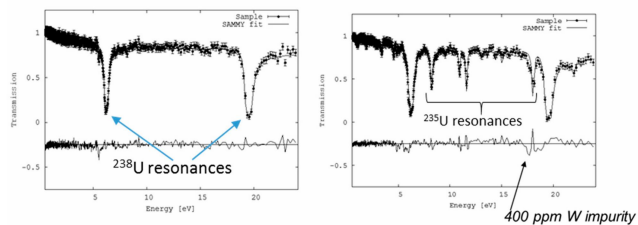
核燃料



不同成像技术效果对比

利用透射率谱进行核素定量分析

$$T_{\text{ideal}}(E) = \exp[-\ln \sum_i \omega_i \sum_j \sigma_{ij}(E) A_{ij}]$$

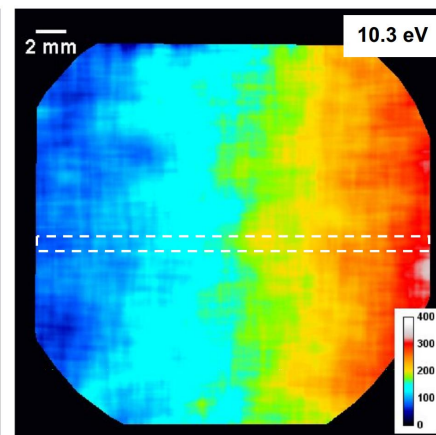
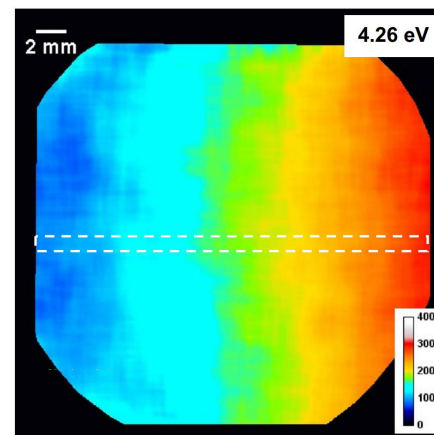
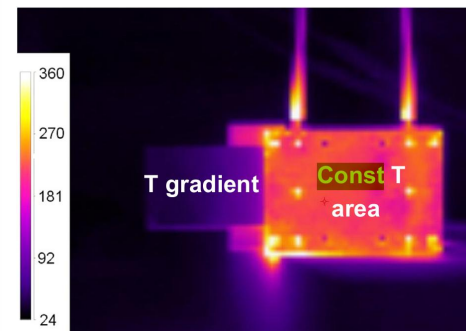
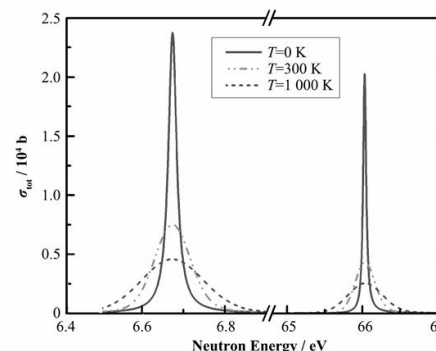


0.2% ²³⁵U U₃Si₅

8.8% ²³⁵U U₃Si₅

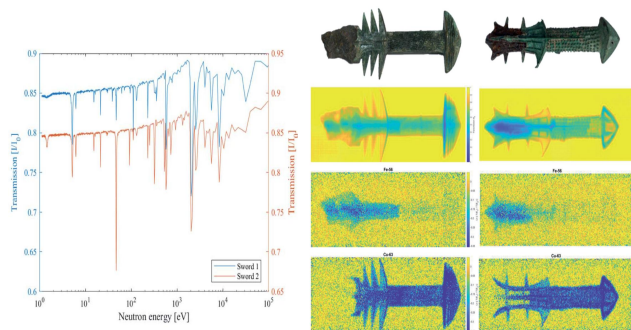
两种不同燃料样品的中子透射率

温度



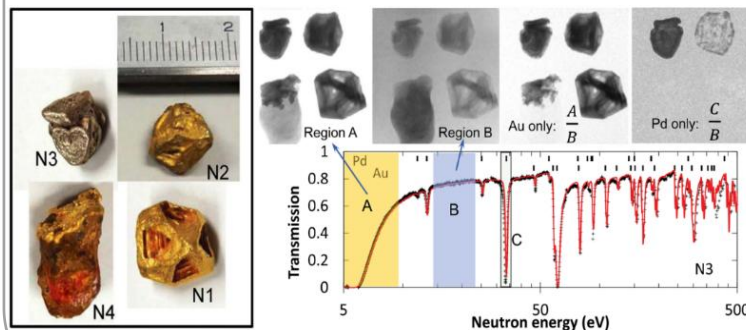
温度成像结果

文物



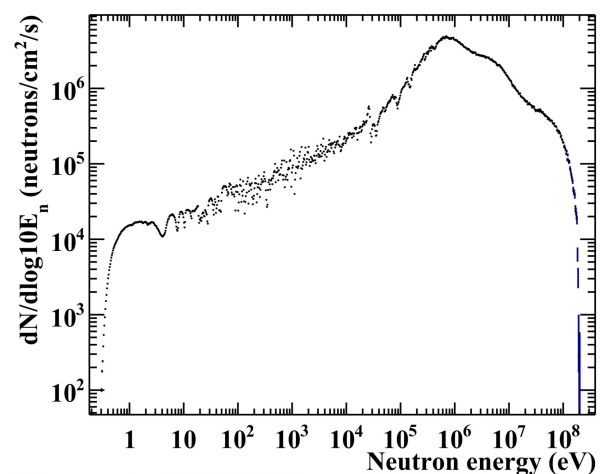
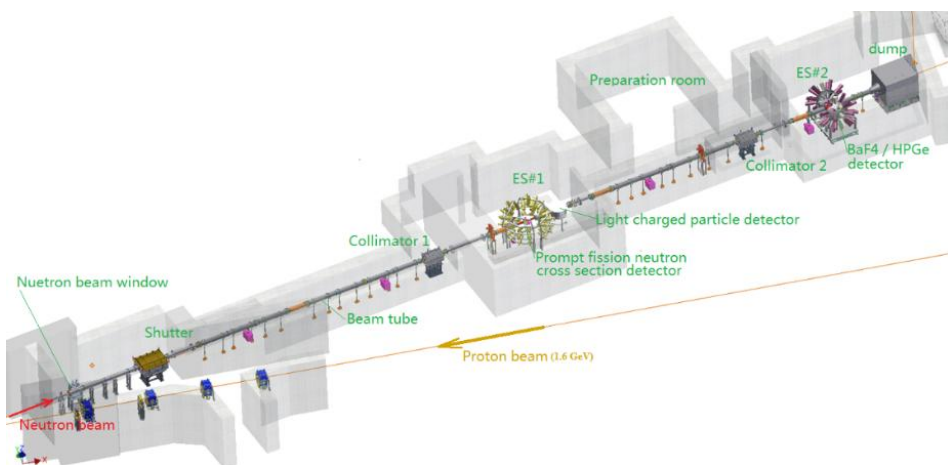
两种古剑不同核素的成像

矿物

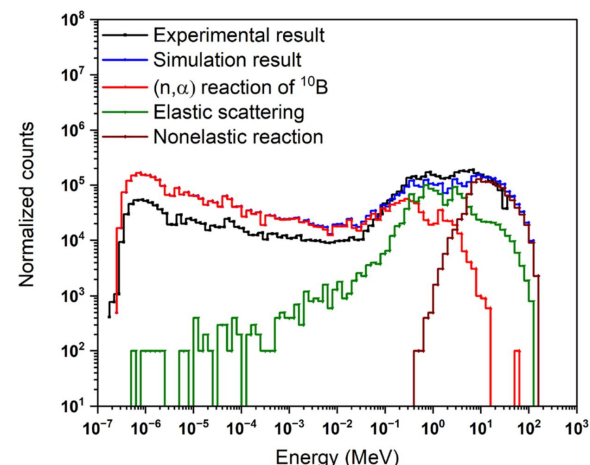


金属矿物的成像

- CSNS Back-n 具有**宽能量范围**(thermal to 300 MeV), **高中子通量**($\sim 1 \times 10^7 \text{ s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ @ES1)以及**好能量分辨**(0.4%(@1 eV)- 4.9%(@10 MeV))
- 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

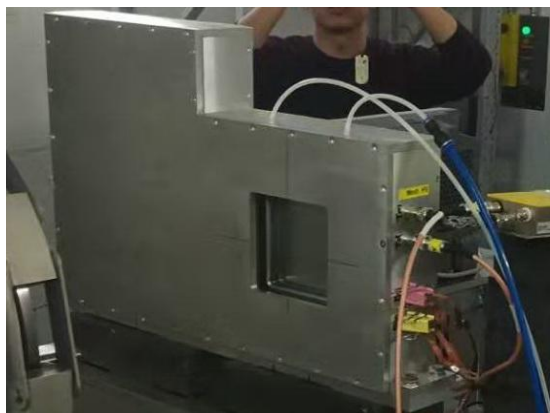


CSNS Back-n中子能谱



MCP计数随能量变化曲线

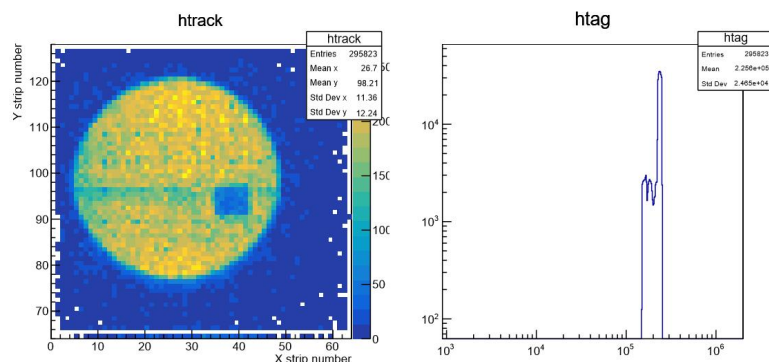
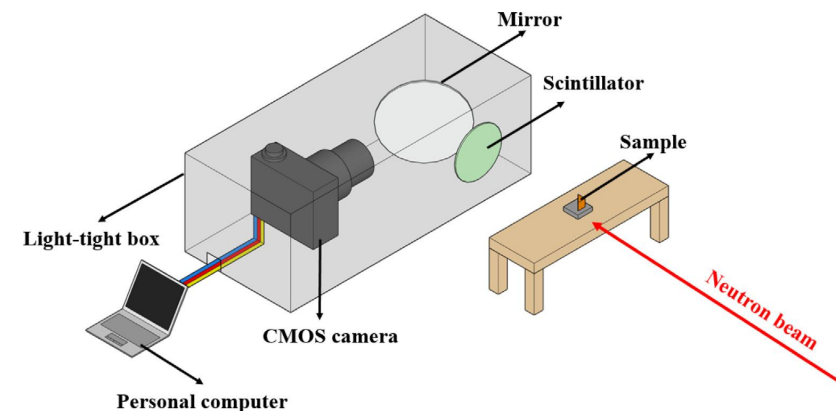
Micromegas



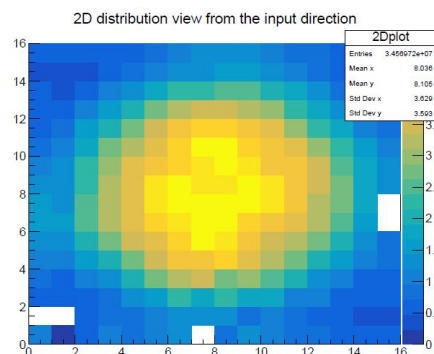
Li玻璃+多阳极光电倍增管



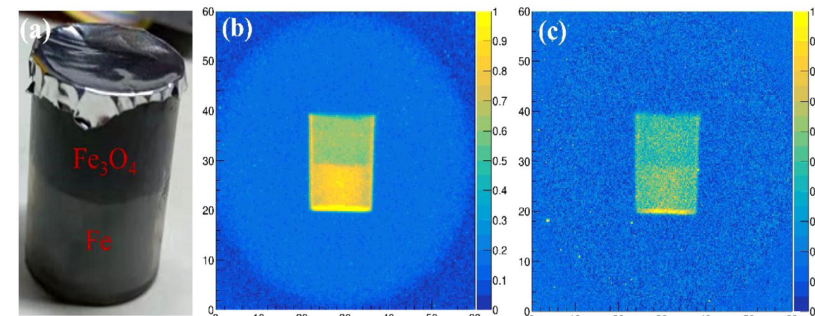
CMOS门控相机



探测效率较低



位置分辨较差

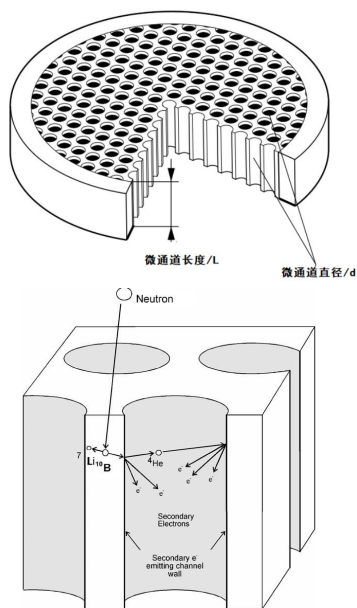


中子利用率低

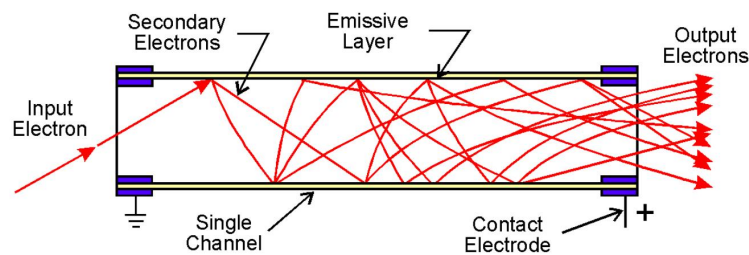
NIMA, 2020, 957: 163407.
NIMA, 2018, 889: 122-128.
NIMA, 2023, 1048: 167892.

● 掺硼MCP特点

- **空间分辨:** $\sim 10\mu\text{m}$
- **时间分辨:** $\sim \text{ns}$
- **中子探测效率:** $\sim 17\% @ 0.1\text{eV}$



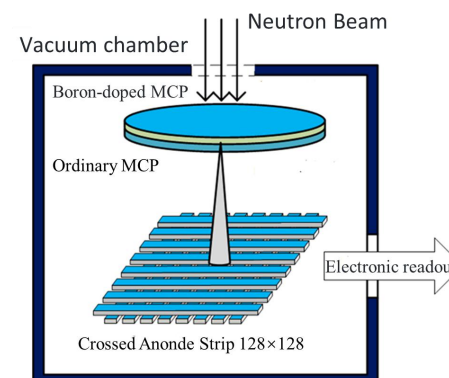
次级电子产生示意图



电子雪崩示意图

● 基本原理

- 吸收中子($n + {}^{10}\text{B} \rightarrow {}^7\text{Li} + {}^4\text{He}$)
- 产生次级电子, 倍增
- 被有位置分辨的阳极接收

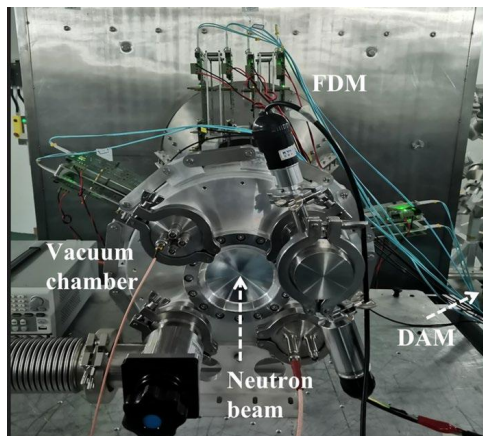


成像原理示意图

目 录

- 研究背景
- **NRTI@Back-n**
- 总结

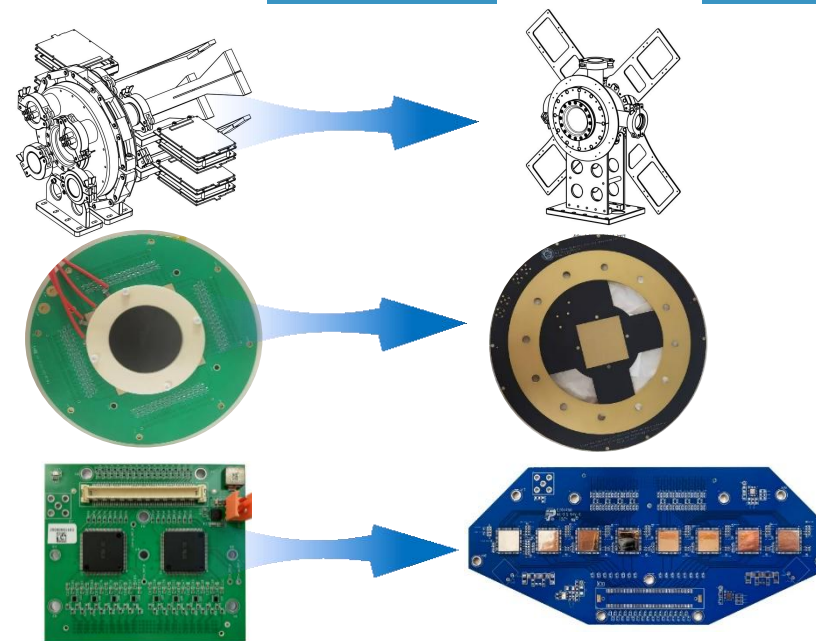
2022



- 腔体加工完成
- 电子学制作完成
- 首次NRTI实验

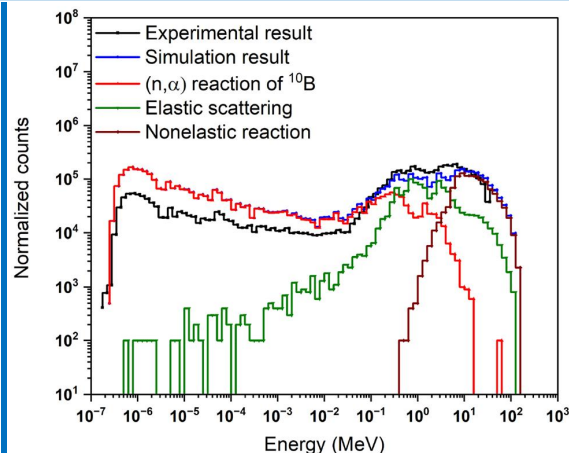
2024-2025

- 探测腔体升级
- 电路板升级
- 前放升级



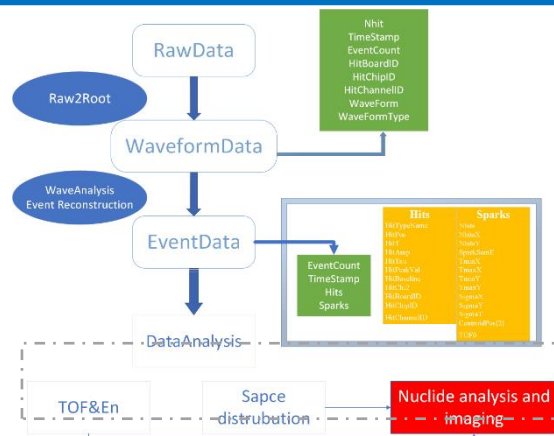
WNRI

2021



- 单阳极BMCP测试

2023

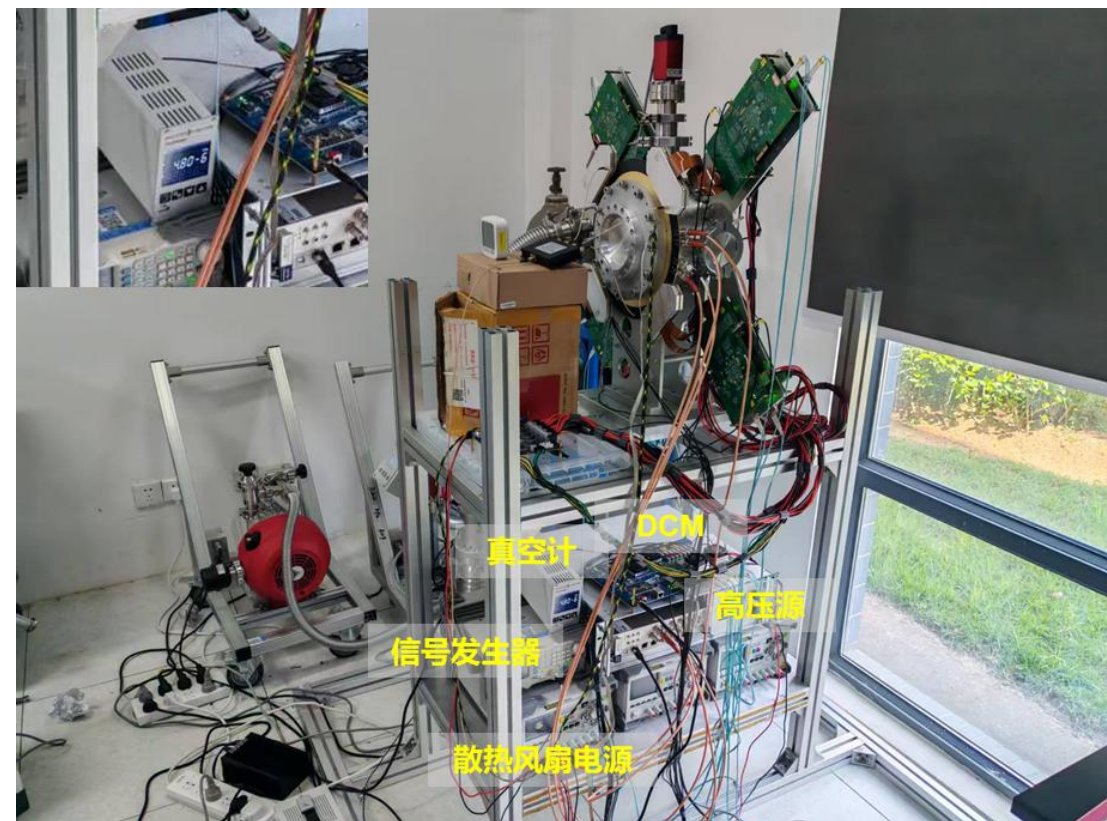
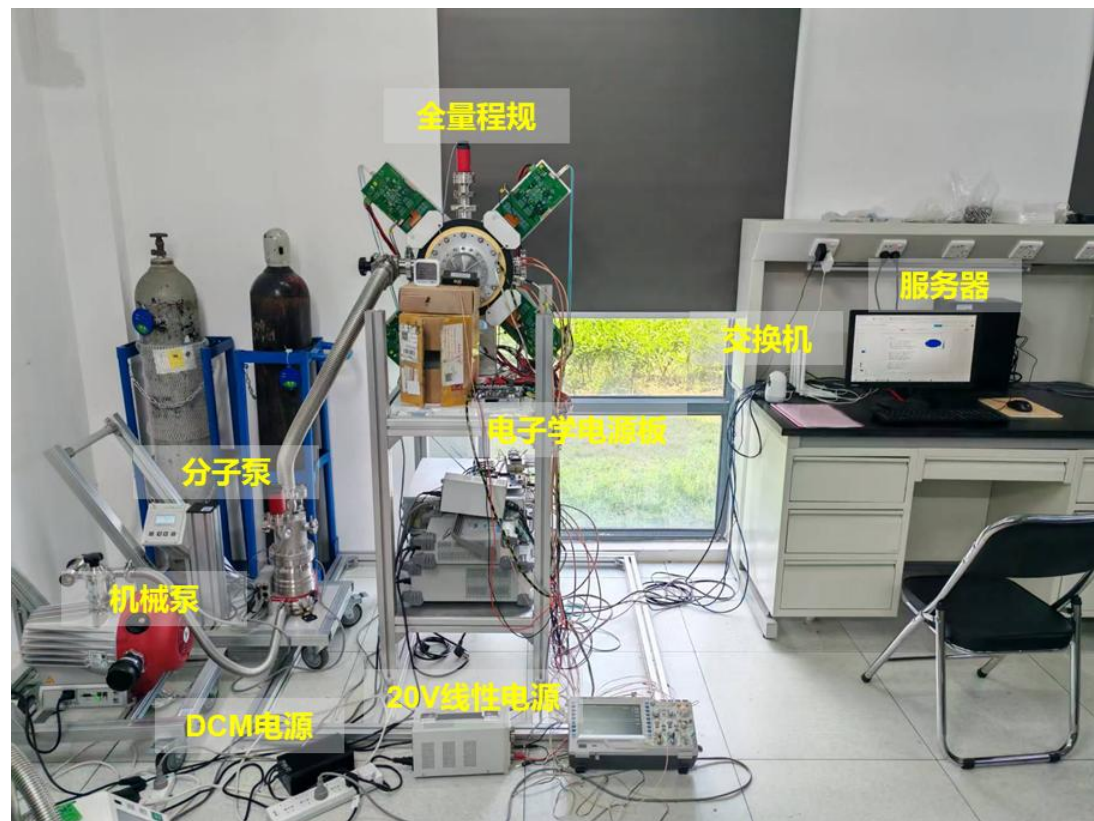


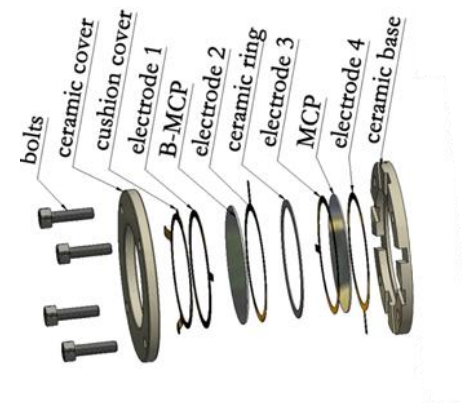
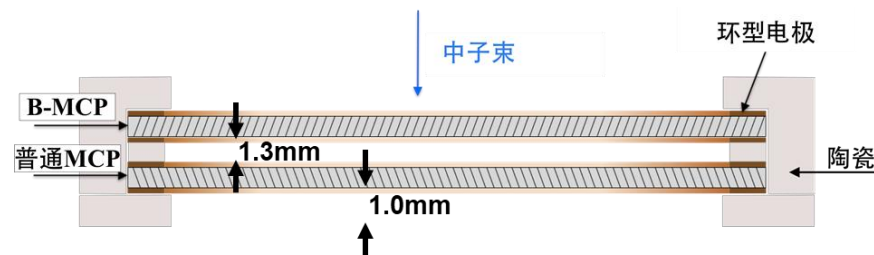
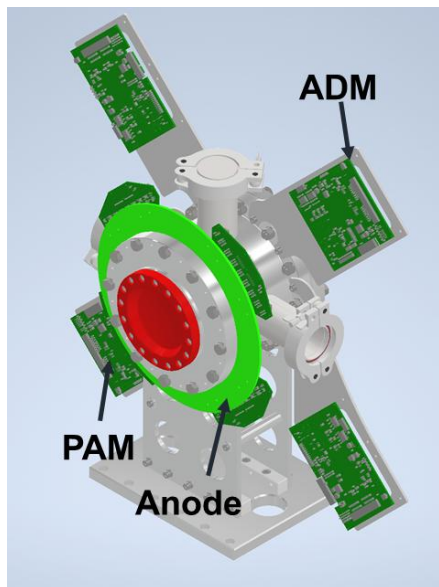
- 引入Bluet数据处理框架

2025.10



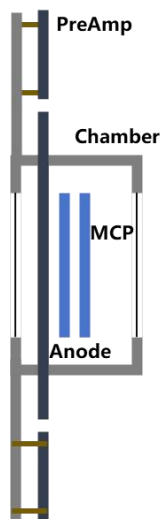
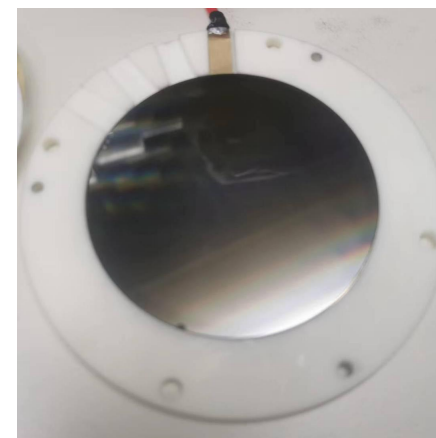
- 铜镜碎片

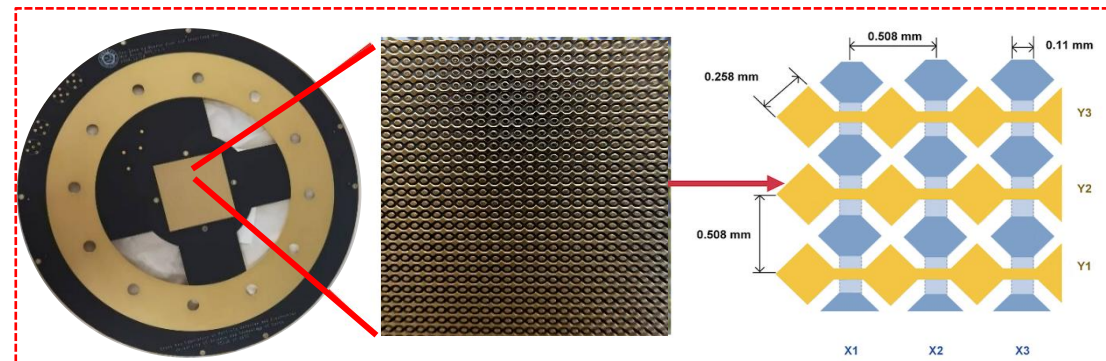
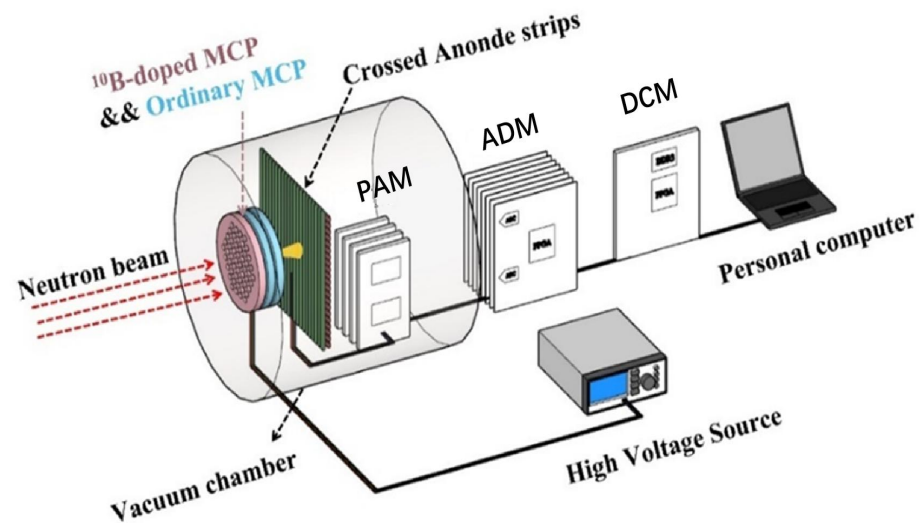




北方夜视生产掺硼MCP参数

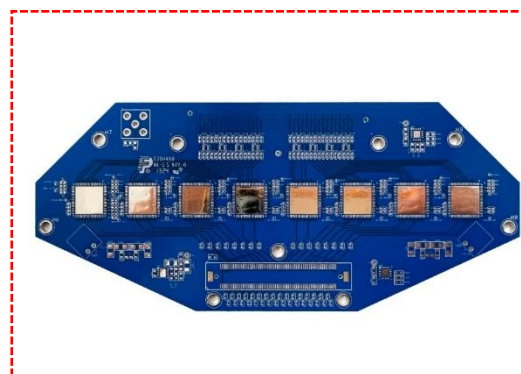
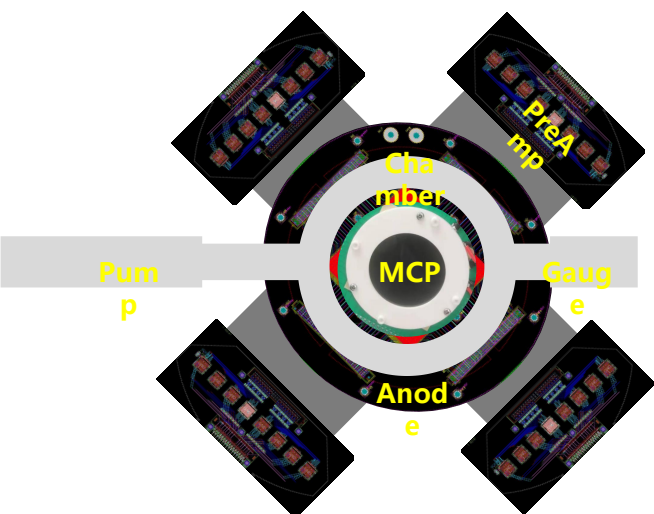
Parameters	B-MCP	Ordinary MCP
Diameter (mm)	56	56
Thickness (μm)	480	480
Pore diameter (μm)	8.8	8.8
Pore area ratio (%)	~65	~65
Gain	69(@800V)	75830(@1000V)
^{10}B (mol%)	15	-





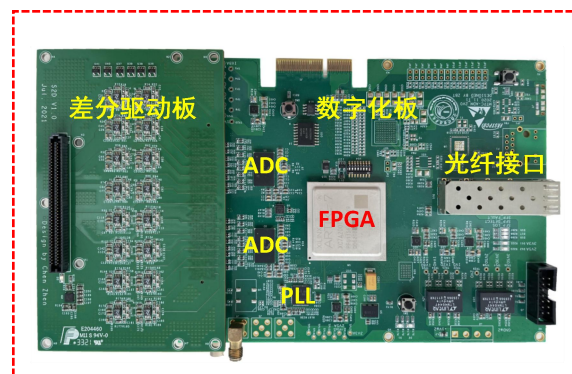
交叉条阳极

□ 128x128 (~0.5mm per strip)



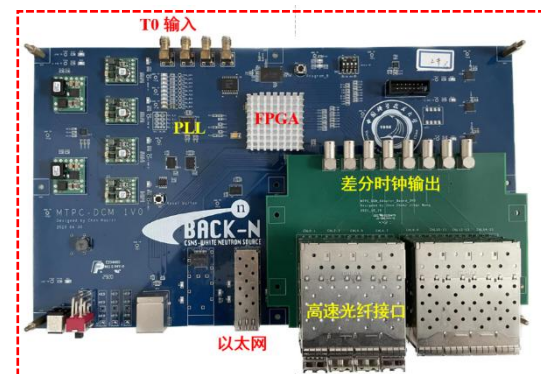
PAM*4

- 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



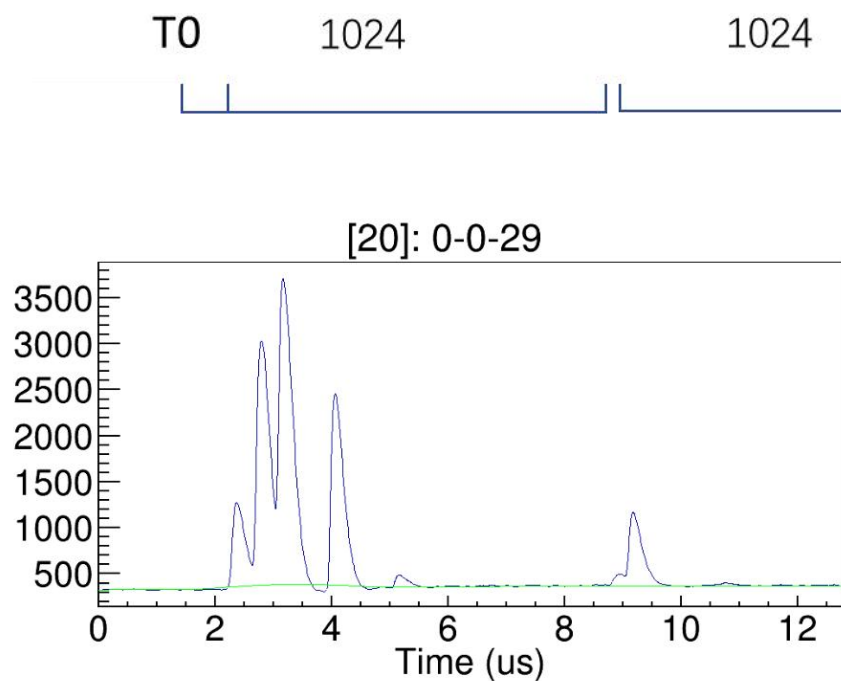
DCM*1

- 数据汇总、缓存
- 触发判选
- 时钟分发

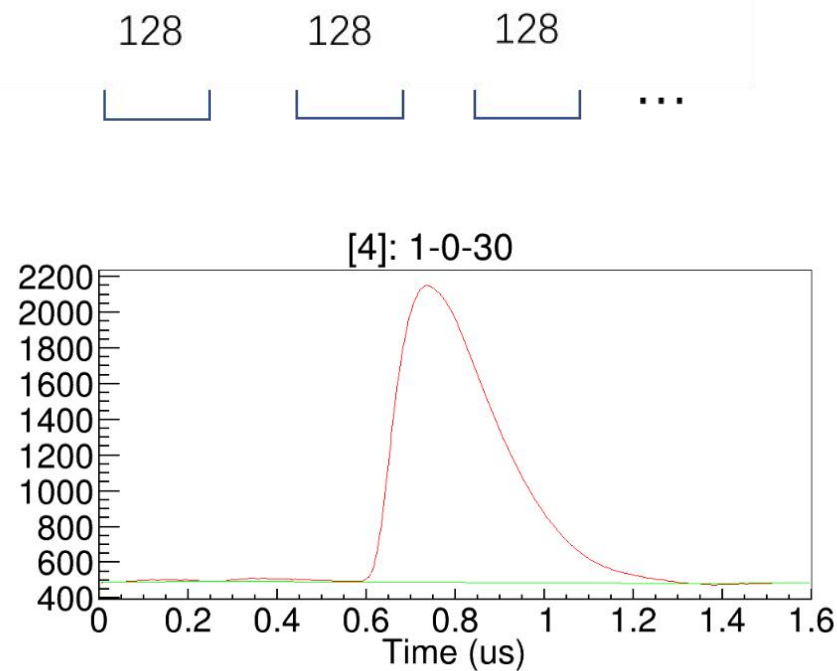
● 双触发模式

- 高能中子：强制触发；低能中子，自触发
- 电子学触发死时间：1.7 μs

Forced Trigger Mode

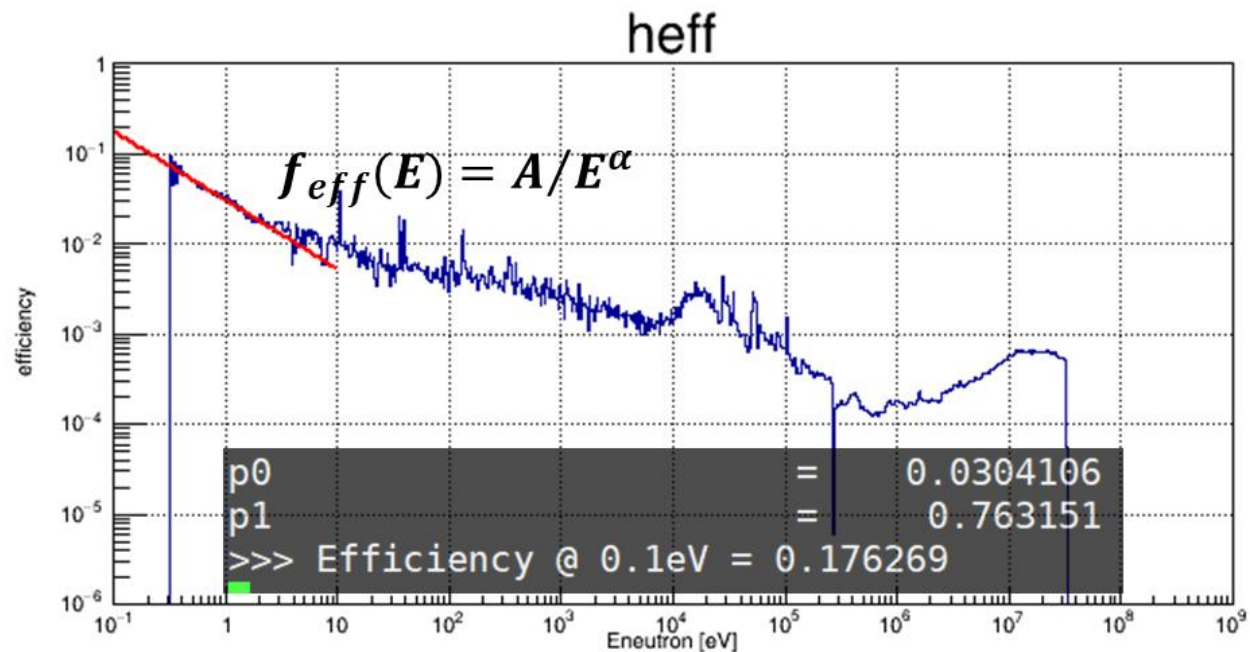


Self-Trigger Mode



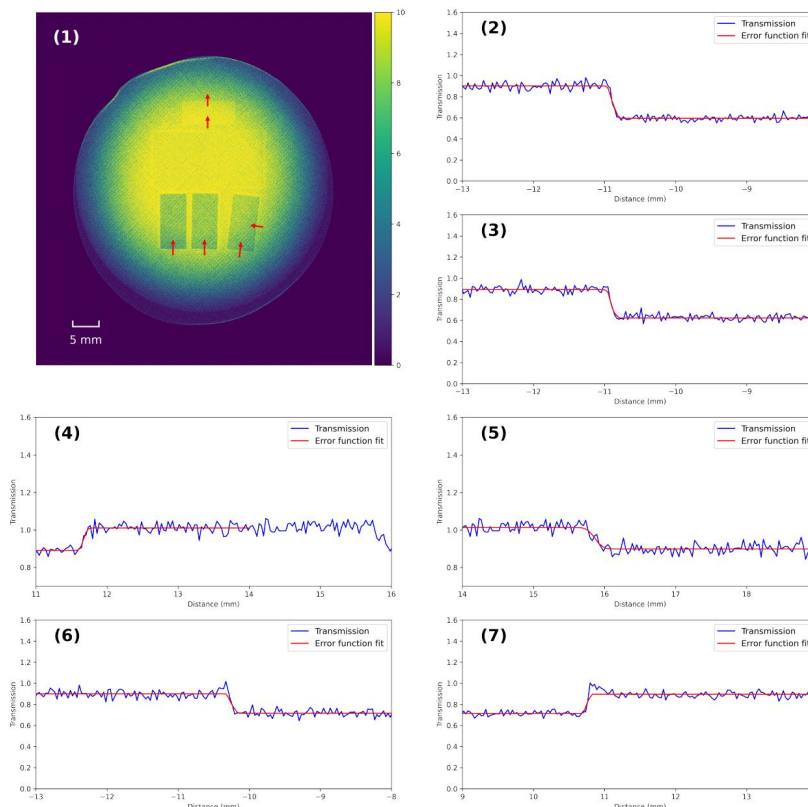
● 探测效率

- 外推到 $f_{eff}(0.1 \text{ eV}) = 17.6 \%$

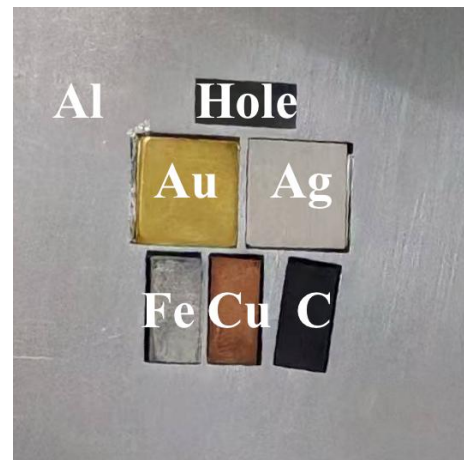


● 位置分辨

- 边缘扩散函数表征(10%→90%)
- 平均值 $97 \mu\text{m}$

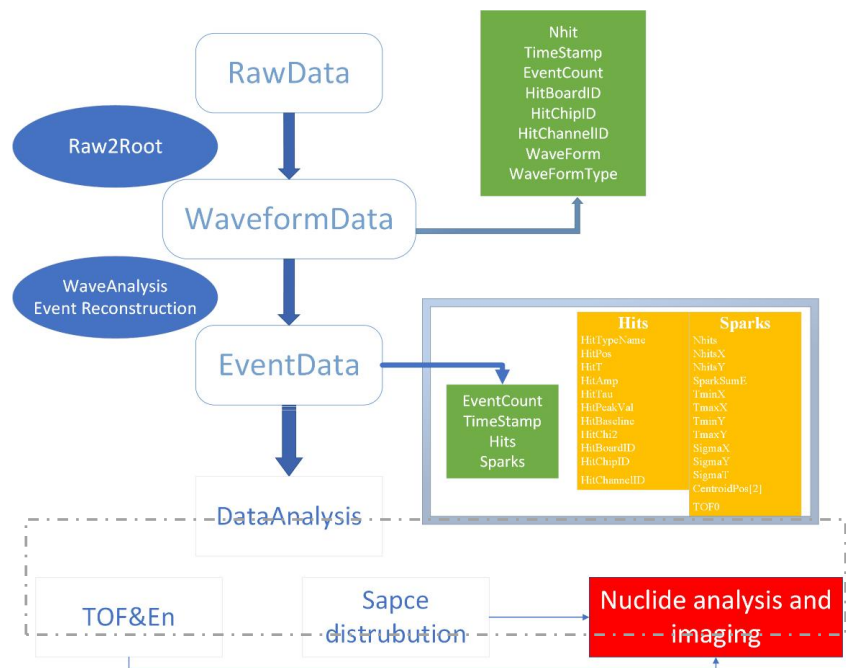


- 位置: ES#2 (~77 m)
- MCP: 2片 (B-MCP+Ordinary MCP)
 - ▣ 10B含量: 15%mol
- 时间: 2024 2.3-2.5 3.4-3.7 (~7天)
- 真空度: $2.8 \text{ E-4} \text{ -- } 3.6\text{E-4 Pa}$
- 加速器功率: 140-160 kW
- 时间窗: 12 ms
- 触发模式: 双触发



sample	thikness(cm)	S(cm2)
C	1	0.5
Al	1	
Fe	1	0.5
Cu	1	0.5
Ag	0.1	1
Au	0.1	1

● WNRI-Bluet数据处理框架



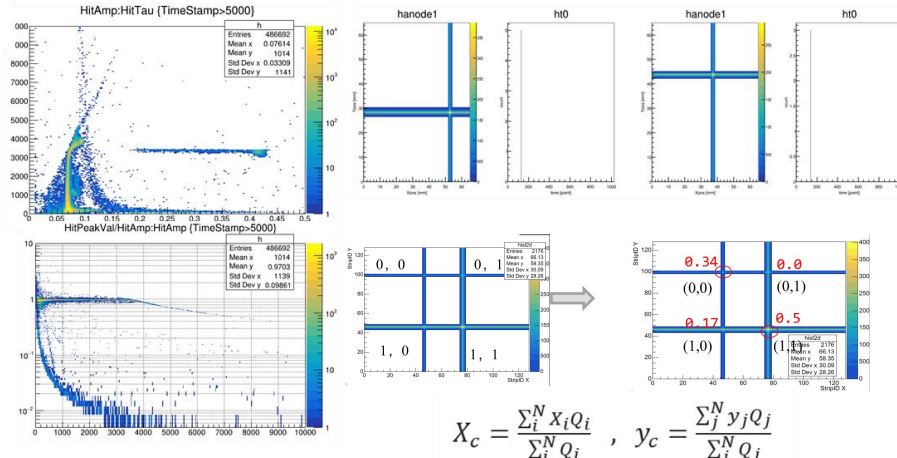
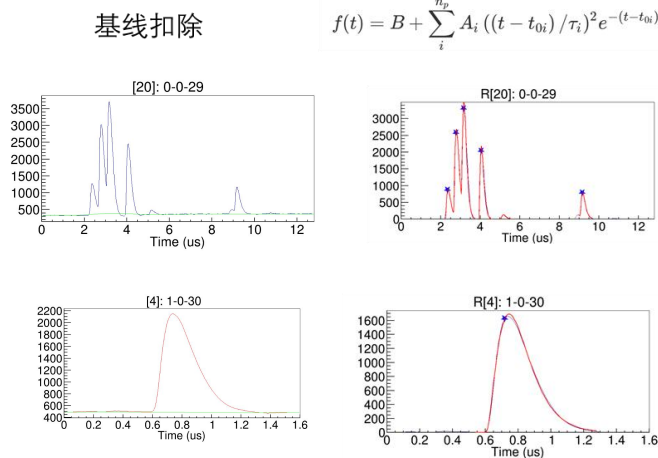
● 事例重建过程

• Event by event

波形分析

信号筛选

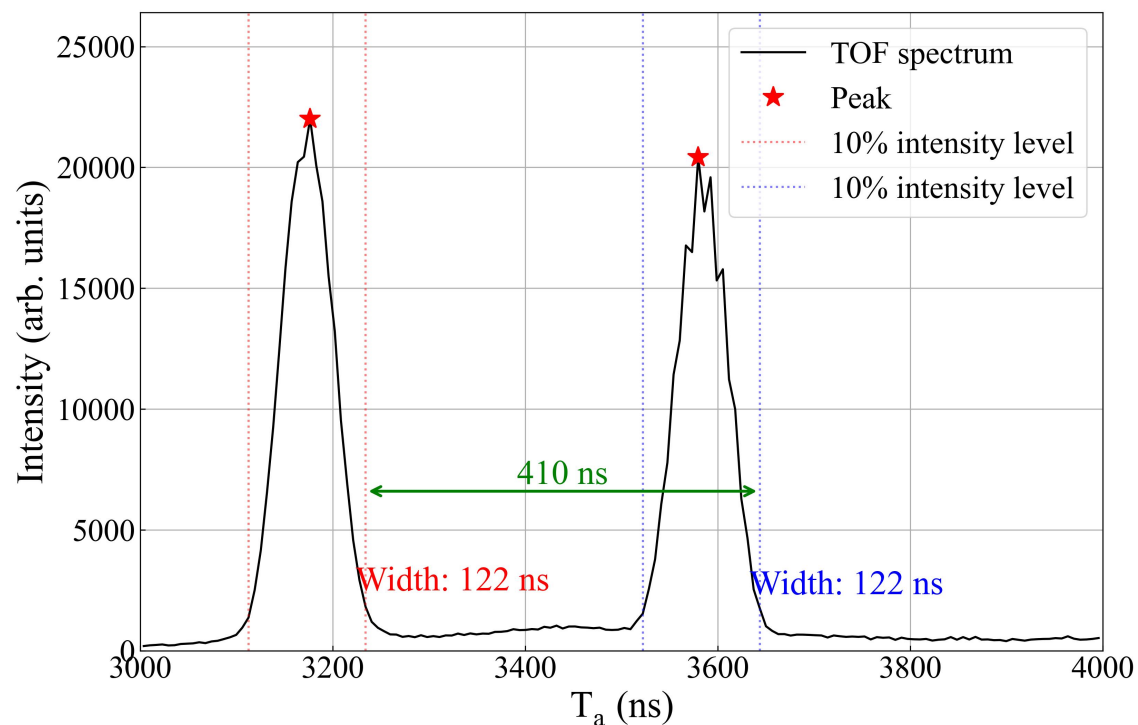
事例重建



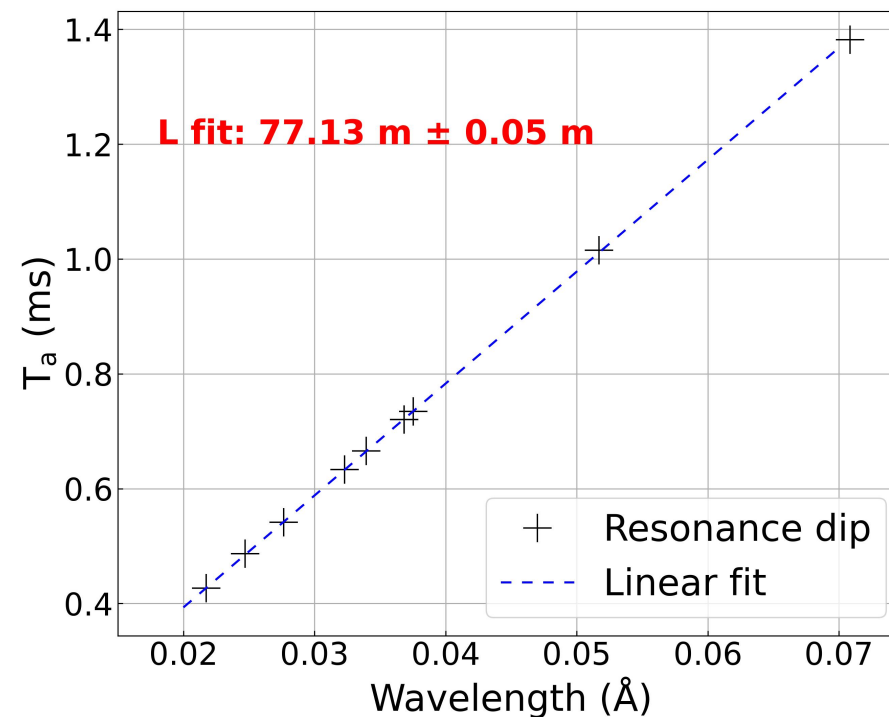
● TOF Method

$$TOF = T - T_g + L/c$$

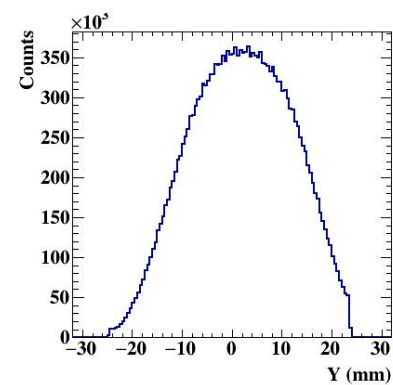
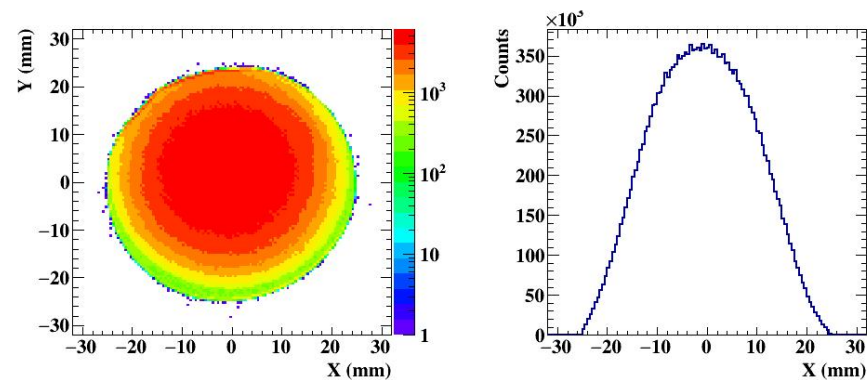
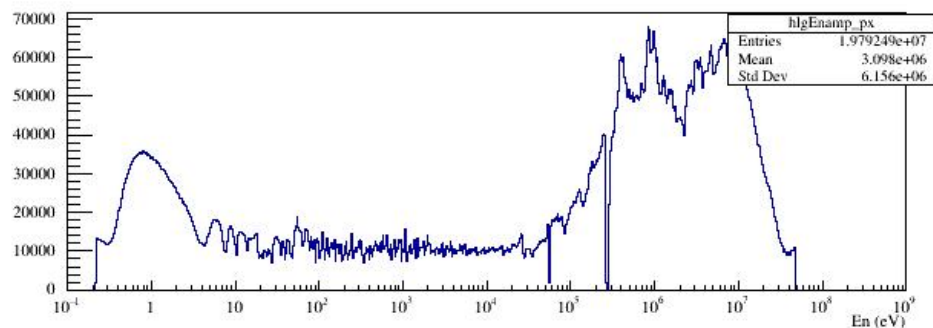
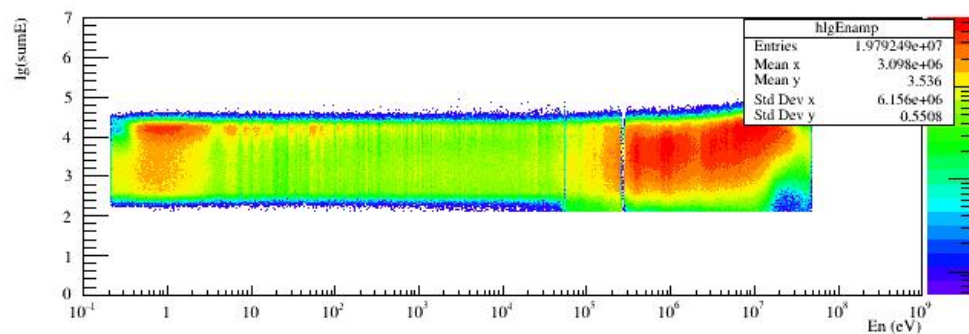
γ -flash刻度T0



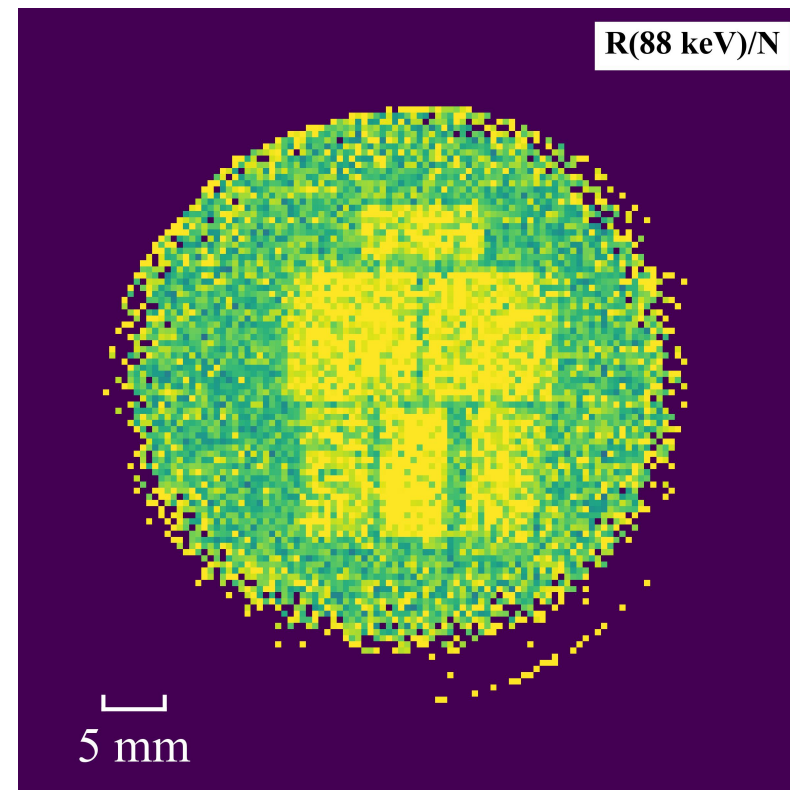
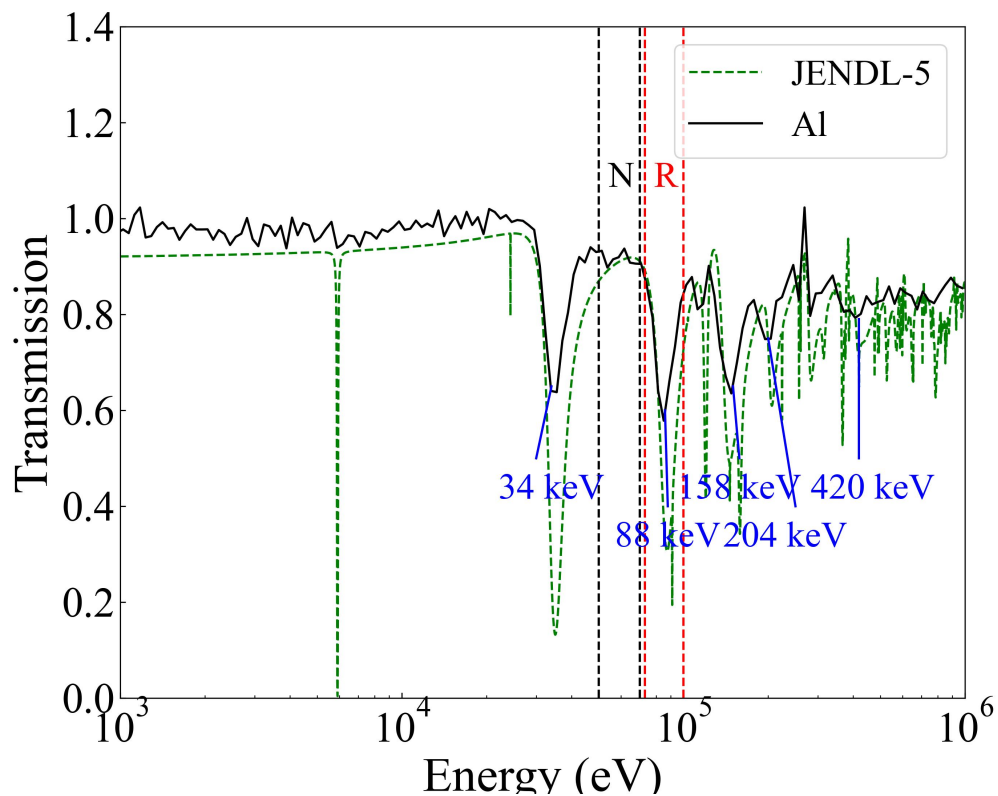
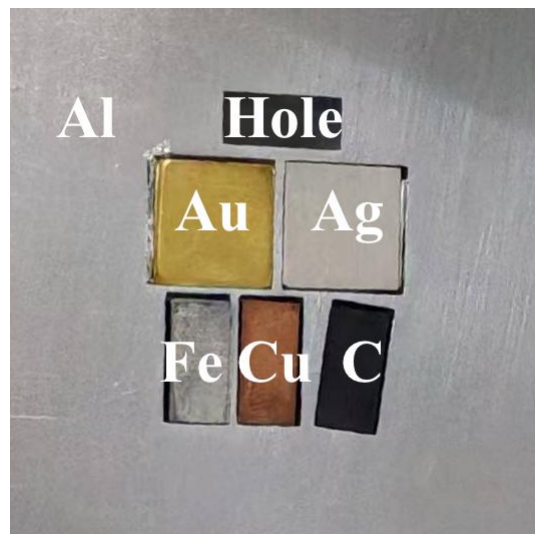
能谱(计数率谱)吸收谷刻度L

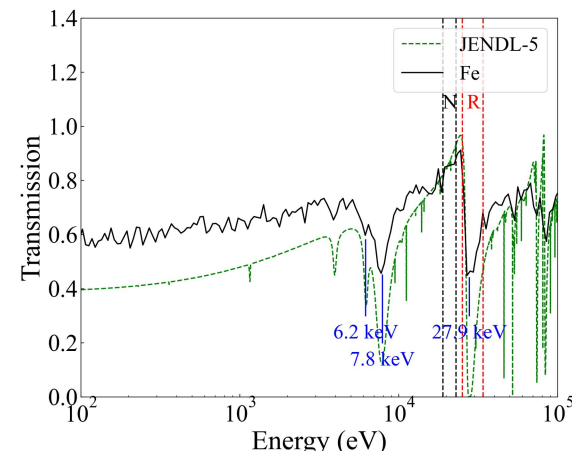
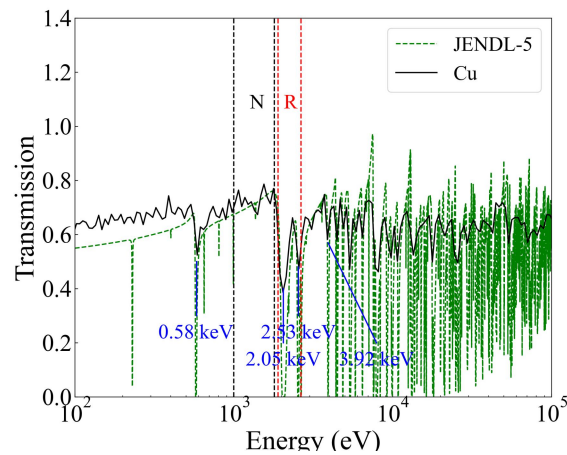
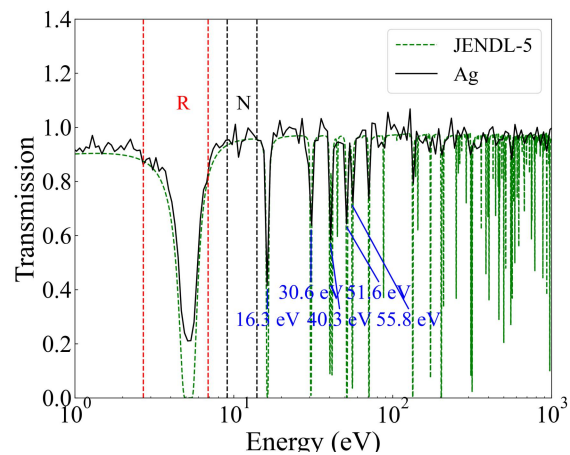
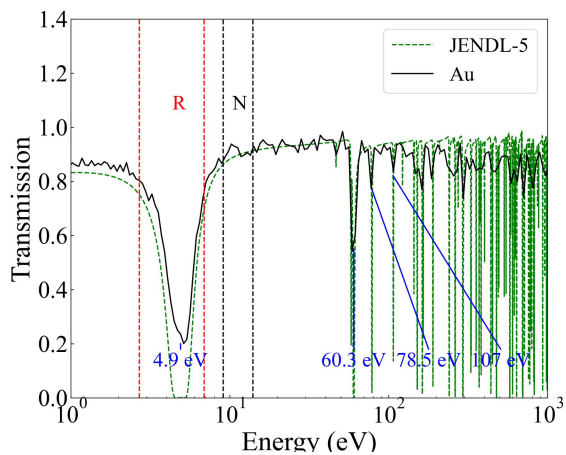


● 能谱与束斑



- Al能够清晰成像(158 keV), 420keV 吸收谷能够被探测到

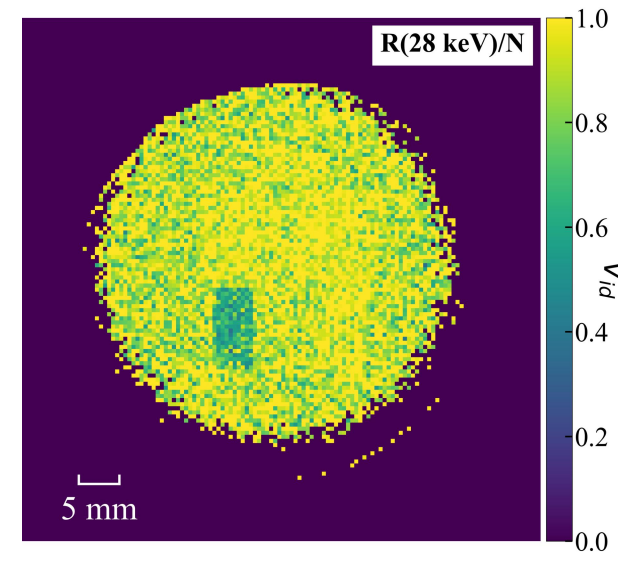
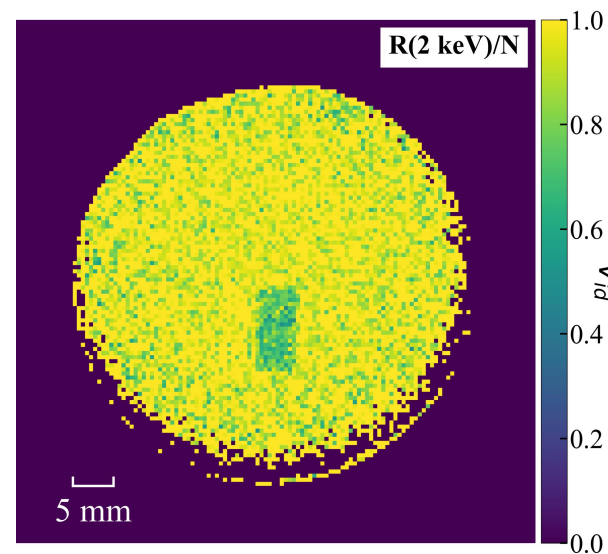
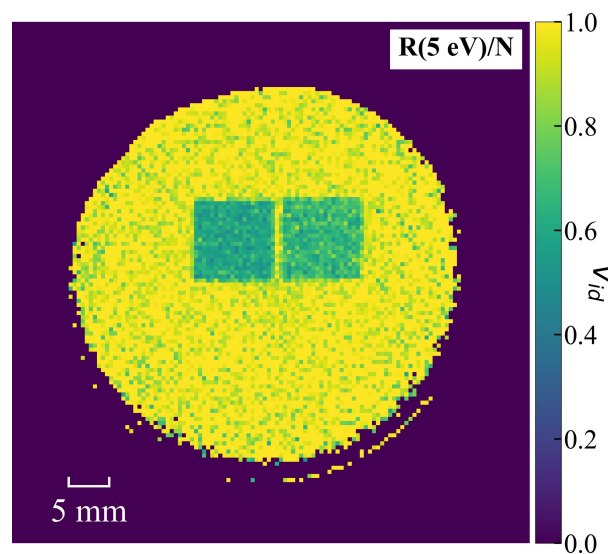
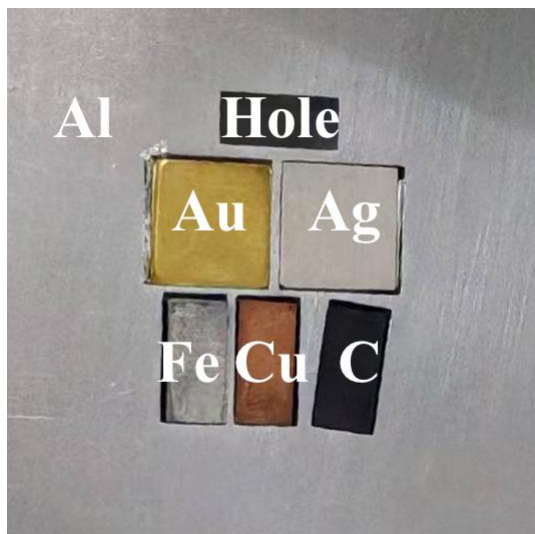




Au/Fe

Cu

Fe

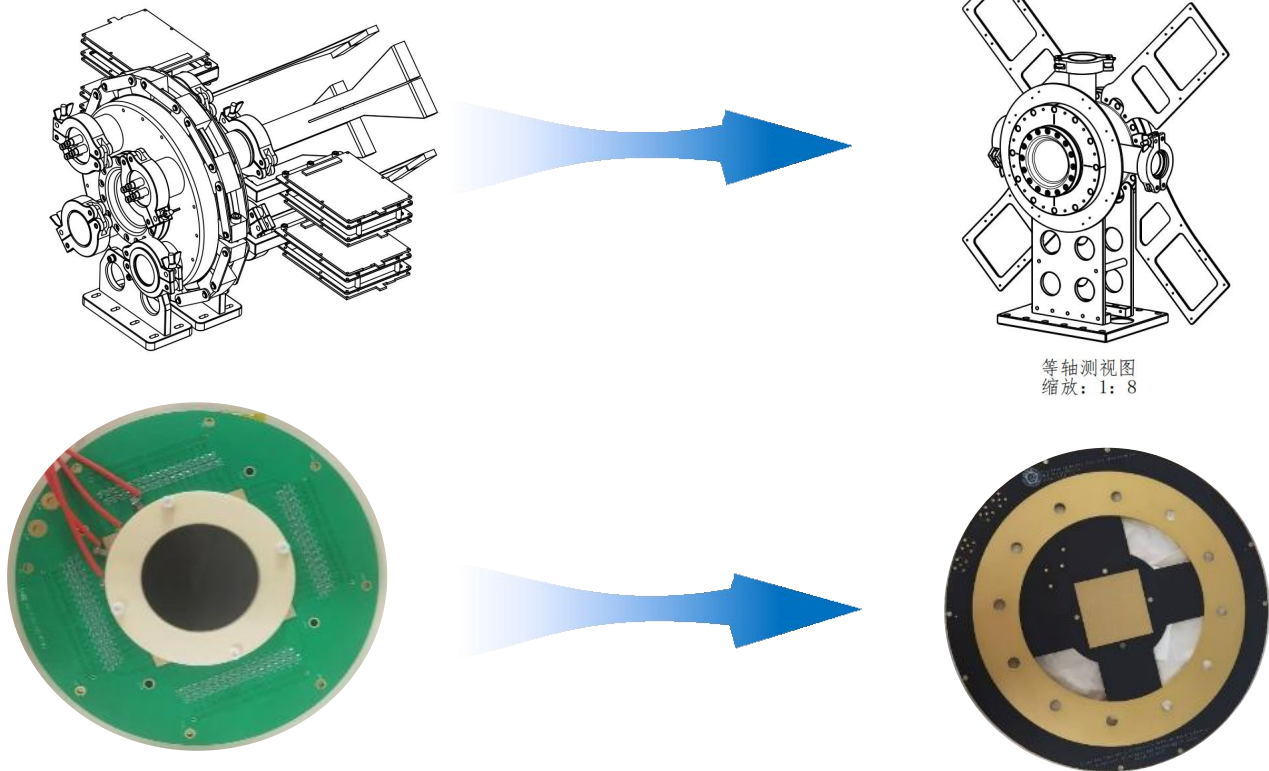


● 存在问题

- **极限真空度**: 抽真空时间长, 前放后放气严重
- **安装可靠性**: 内部组件和线缆安装焊接不便
- **信号稳定性**: 真空前放散热差, 温漂影响信号基线

● 设计优化

- **真空腔优化**: 前放外置, 减小腔体体积
- **电路板优化**: 从PCB走线, 内部不使用线缆



● MCP

- 体电阻降低
- 更低的带电流->更高的计数率上限

2023

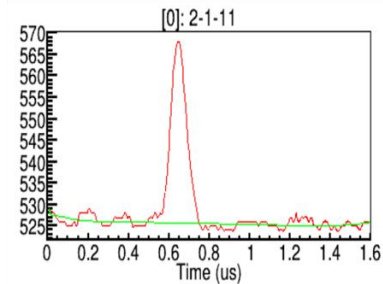
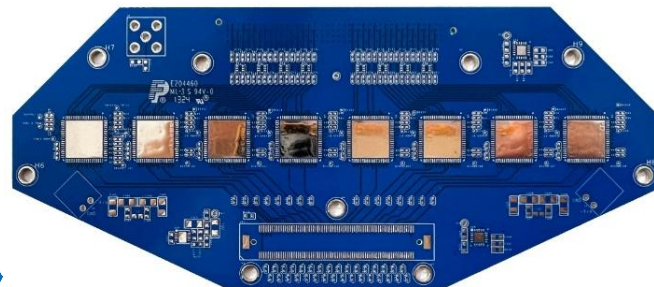
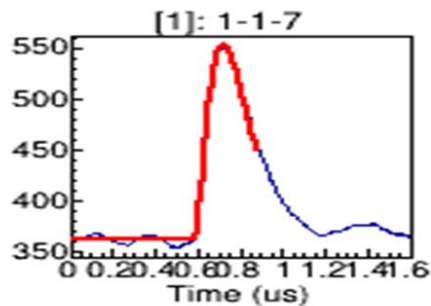
产品检测报告				
NNVT-BNMCP-2022112502				
客 户:	中国科学院高能物理研究所		合同编号:	HT-IHEP-SW-0360/2022
供货商:	北方夜视科技(南京)研究院有限公司			
			检测结果	
中子敏感微通道板编号			DW22060001-127	
序号	技术参数	合同要求技术指标	实际指标	
1	外径	55.95±0.05mm	56mm	
2	有效区直径	≥50mm	55mm	
3	单孔径	8μm-10μm	8.8μm	
4	增益	≥10 ⁴	115	
5	体电阻	30MΩ-150MΩ	99	
高增益微通道板编号			DW22023003-128	DW22023003-129
序号	技术参数	合同要求技术指标	实际指标	实际指标
1	外径	55.95±0.05mm	56mm	56mm
2	有效区直径	≥50mm	56mm	56mm
3	单孔径	8μm-10μm	8.8μm	8.8μm
4	增益	≥10 ⁴	10392	10731
5	体电阻	30MΩ-150MΩ	101	96

2025

客 户: ◁	中国散裂中子源◁		合同编号: ◁	/◁
供货商: ◁	北方夜视科技(南京)研究院有限公司◁			
检测结果◁				
产品名称◁			Φ56 中子 MCP 探测器◁	
序号◁	技术参数◁	要求技术指标◁	实际指标◁	
1◁	结构尺寸◁	参照图纸◁	参照图纸◁	
2◁	阳极类型◁	/◁	交叉条多阳极◁	
3◁	中子敏感 MCP 体电阻◁	/◁	35MΩ◁	
4◁	普通 MCP 体电阻◁	/◁	11MΩ◁	

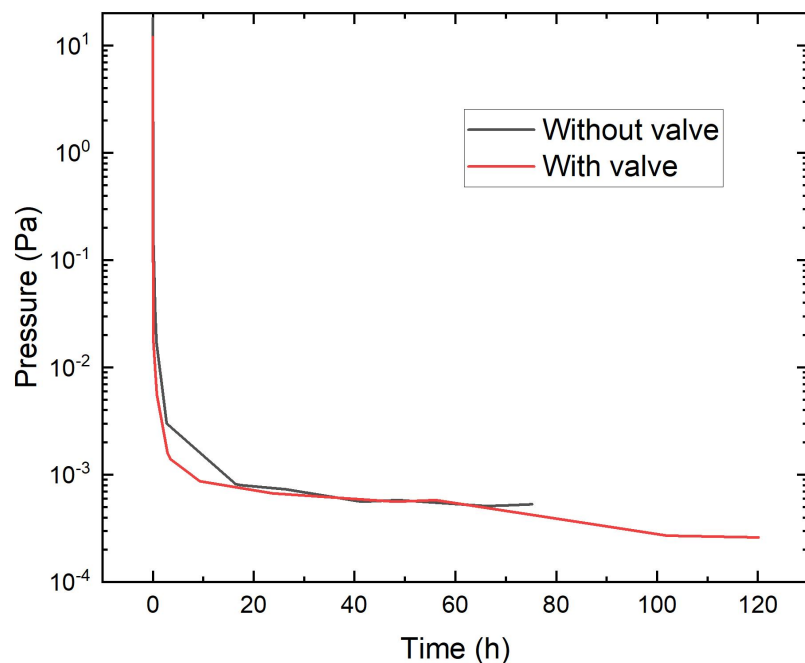
● 前放

- 芯片: GDA->FEAM
- 动态范围: 200 fC -> 1000 fC
- 信号底宽: 800 ns -> 200 ns



● 真空测试

- 极限真空为~3E-4Pa
- 真空受温度影响：PCB放气

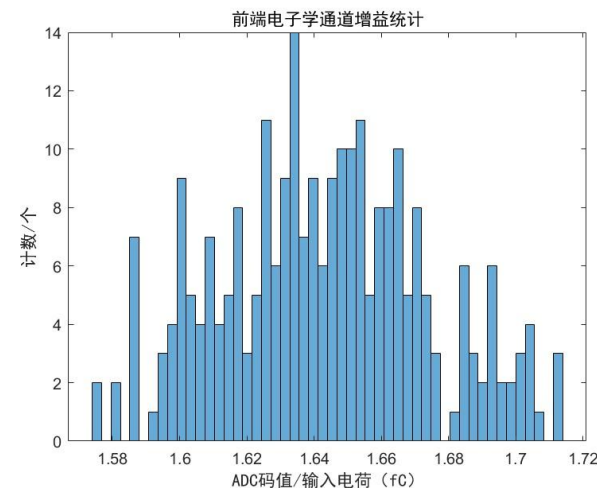
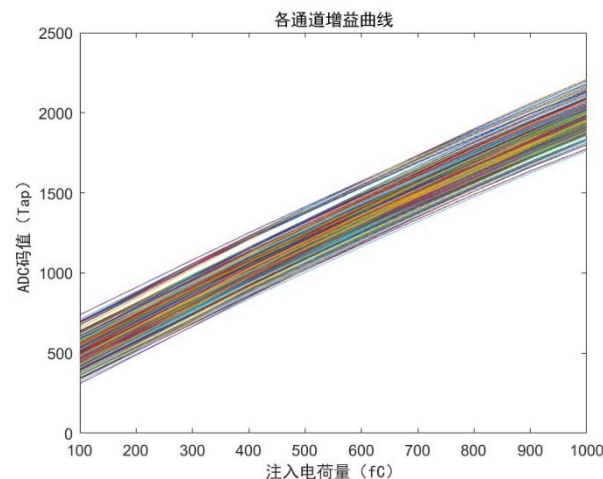


时间	腔体真空 (Pa)
3.26 07:51	12 开启分子泵
07:54	1.9e-3
08:20	9.4e-3
8:38	5.6E-3
10:45	1.6E-3
11:20	1.4e-3
17:10	8.7e-4
3.27 07:34	6.7e-4
3.28 8:00	5.6E-4
16:00	5.8E-4
3.30 13:50	2.7E-4
3.31 8:00	2.6E-4
4.1 8:00	2.7E-4
15:30	3.7E-4
4.2 9:00	3.7E-4
4.3 12:10	3.9E-4

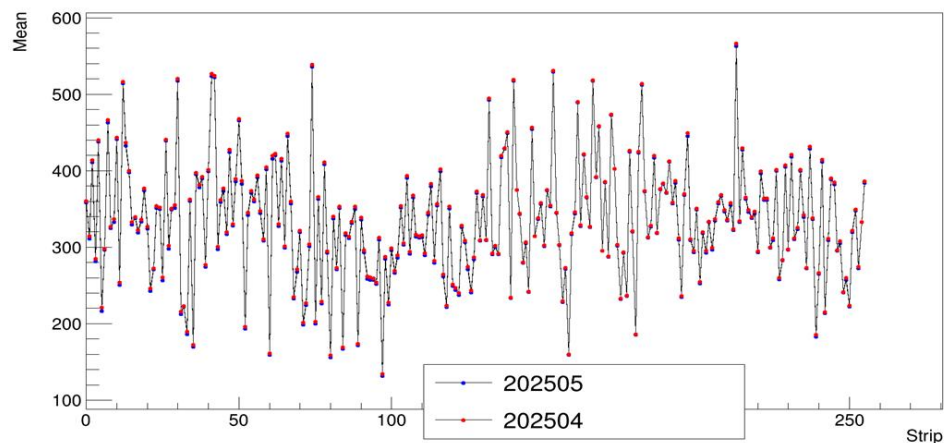
2025-03-25 周二	30°	20°
2025-03-26 周三	27°	22°
2025-03-27 周四	29°	21°
2025-03-28 周五	26°	14°
2025-03-29 周六	14°	12°
2025-03-30 周日	14°	9°
2025-03-31 周一	14°	9°
2025-04-01 周二	19°	12°
2025-04-02 周三	18°	13°
2025-04-03 周四	19°	15°

● 电子学测试

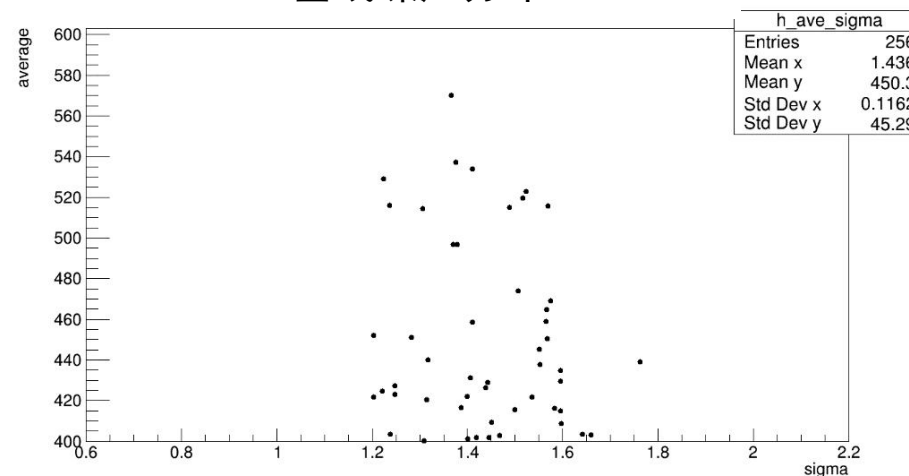
- 各通道增益约为1.64道/fC
- 各通道增益线性度均好于0.998
- 电子学稳定性好
- 各通道噪声水平约为1.5道 ($< 1\text{fC}$)



基线平均值分布



基线噪声分布



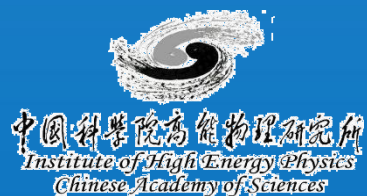
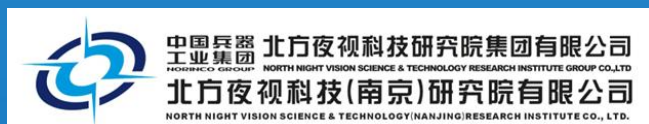
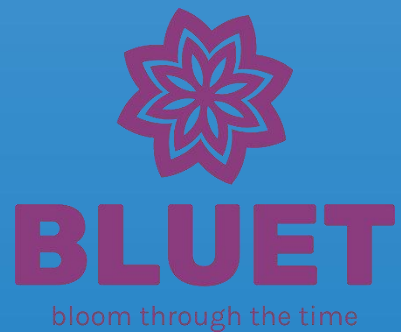
目 录

- 研究背景
- NRTI@Back-n
- **总结**

- 基于Back-n的BMCP探测实验技术已经基本掌握，核心的数据处理方法已确立
- 探测系统效率最高为17.6%(@0.1eV)，空间分辨好于97 μm
- 探测系统进行了升级优化，提升了性能和稳定性
- 能够开展实际样品的实验



- 硬件升级
 - 电子学：突破数据率限制/在线波形分析
 - MCP：暗计数下降，更大的面积
- 数据分析程序
 - 高能区成像算法优化(死时间，双束团...)
 - 定量分析
 - 机器学习优化成像结果
- 实际样品实验测量
 - 找到合适的应用场景和条件
- 成像技术
 - 2D->3D



谢谢!!!