

白光中子共振成像探测器空间分辨率 和时间分辨率研究



汇报人：王卫龙

中国科学院高能物理研究所
散裂中子源科学中心

2026年8月11日@河南郑州

第二十三届全国核电子学与核探测技术学术年会(NED2026)

目录



01

研究背景

02

探测器及实验介绍

03

空间分辨率

04

时间分辨率

05

总结与展望

目录



01

研究背景

02

探测器及实验介绍

03

空间分辨率

04

时间分辨率

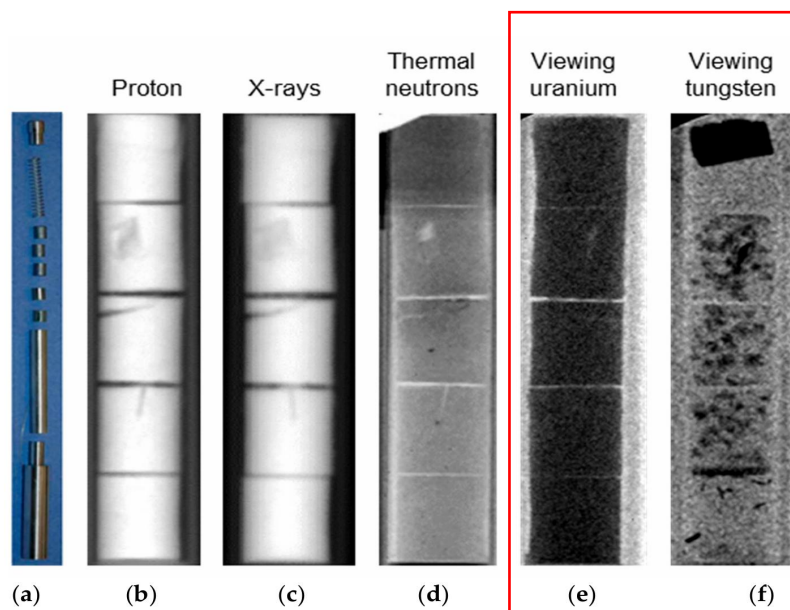
05

总结与展望

什么是WNRI?

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, 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。



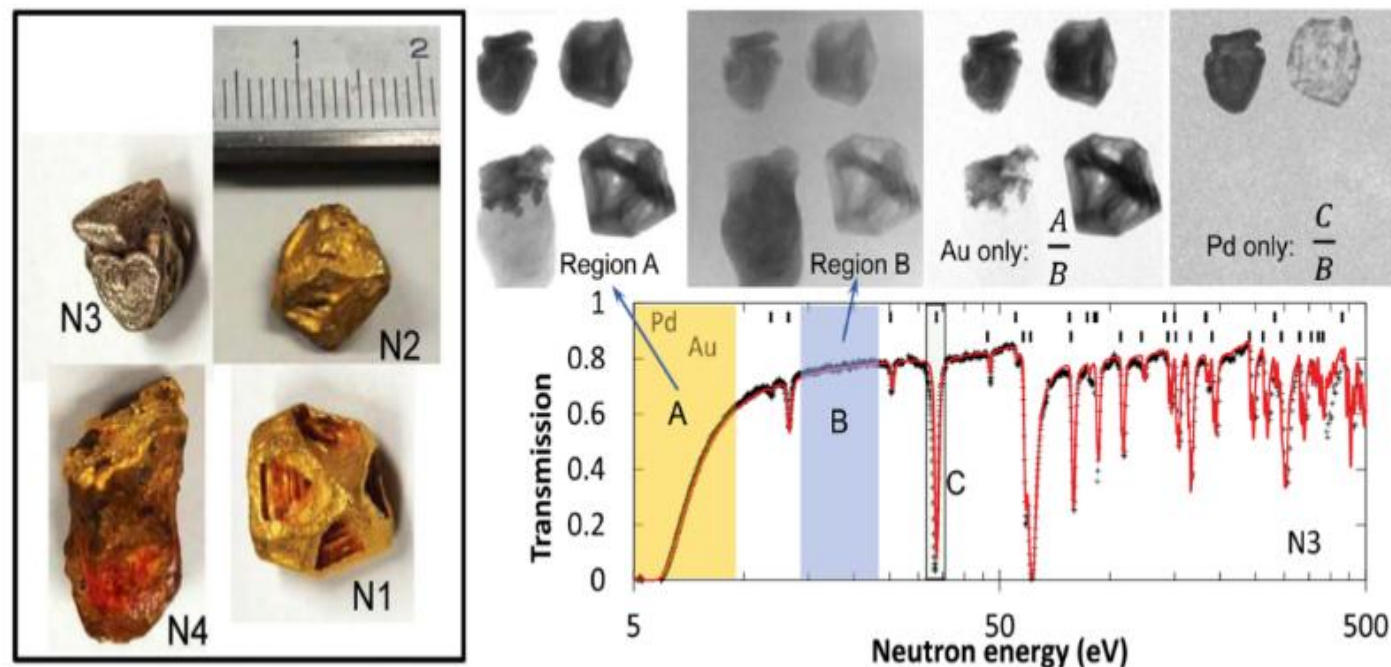
不同成像技术效果对比

增强图像对比度

提取特定能量段, 提升图像分辨能力。

核素成像与定量分析

不仅分辨元素或同位素且可以对物质含量进行定量分析

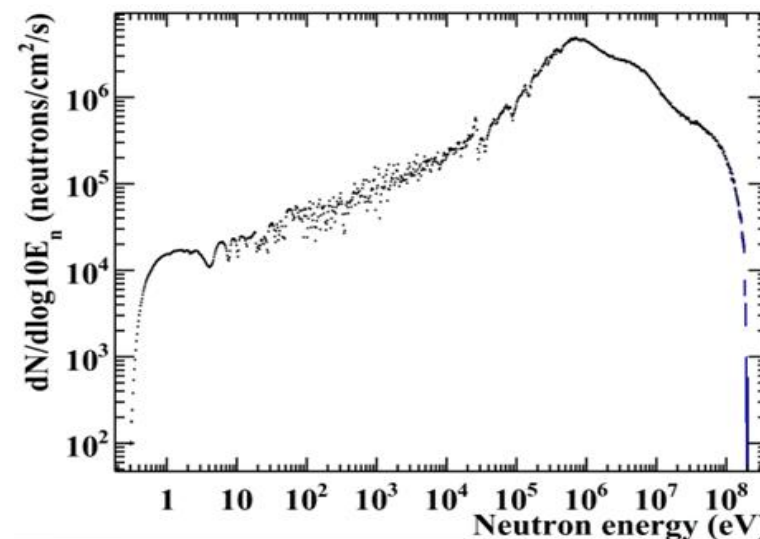


金属矿物的共振成像

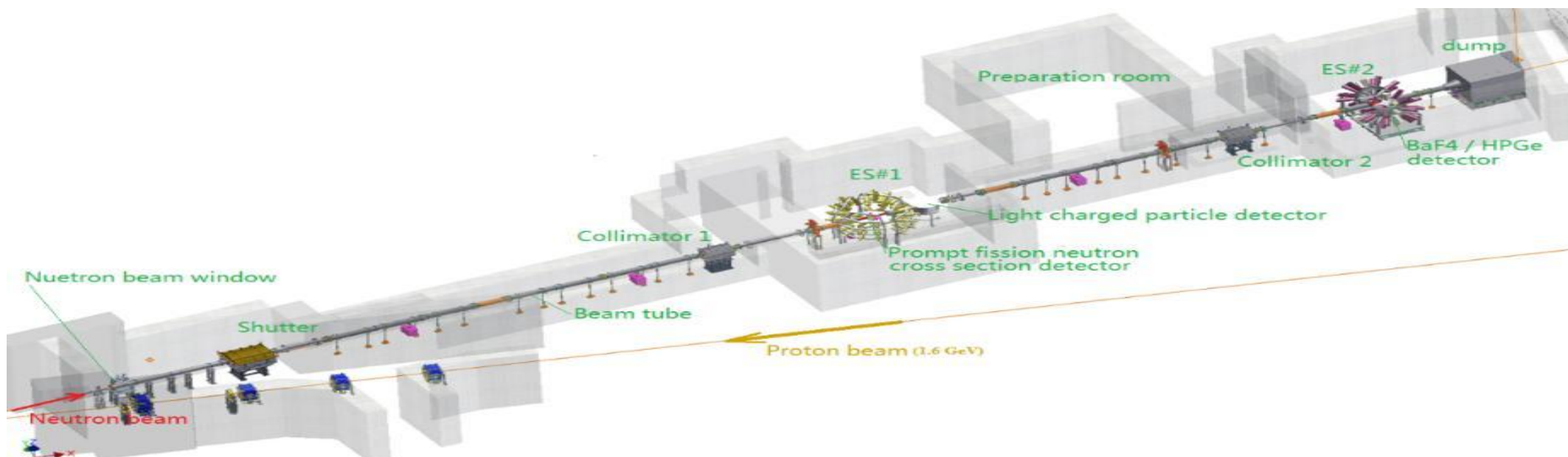
Journal of Imaging, 2018, 4(2): 45.
Sci. Rep., 2017, 7(1): 40759.

CSNS Back-n束流优势

- 宽能量范围：热中子 to 300 MeV
- 高中子通量： $\sim 1 \times 10^7/\text{s} \cdot \text{cm}^2$ @ES1
- 高能量分辨：0.4%(@1 eV)~4.9%(@10 MeV)
- 能够开展eV~MeV能区白光中子共振成像
- 理论上可以实现几乎所有核素的鉴别



CSNS Back-n中子能谱



目录



01

研究背景

02

探测器及实验介绍

03

空间分辨率

04

时间分辨率

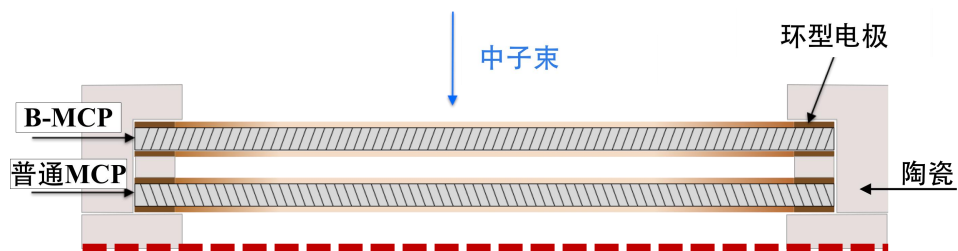
05

总结与展望

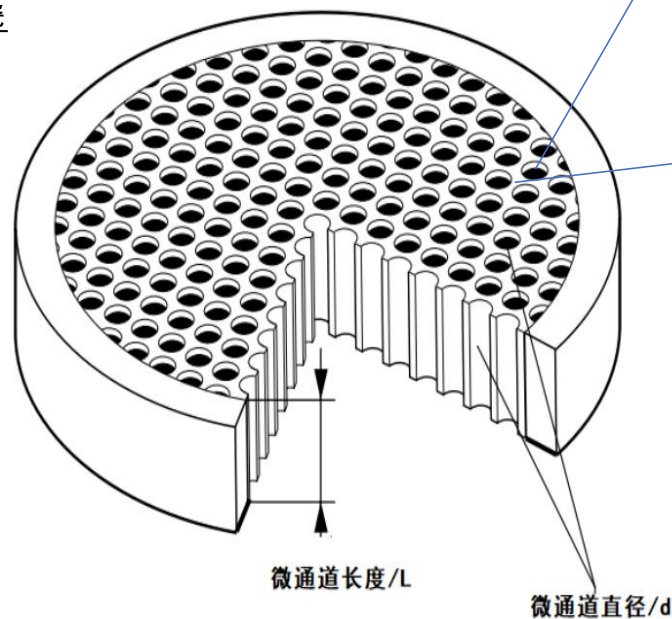
□ 采用B-MCP+MCP组合

□ 工作原理

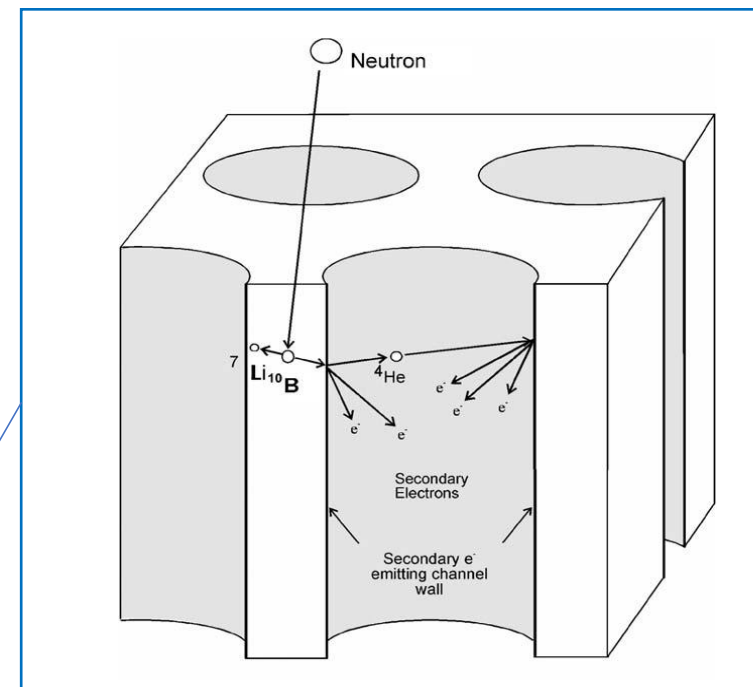
- 吸收中子($n+^{10}\text{B}\rightarrow^7\text{Li}+^4\text{He}$)
- 产生次级电子, 倍增
- 被有位置分辨的阳极接收



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	-

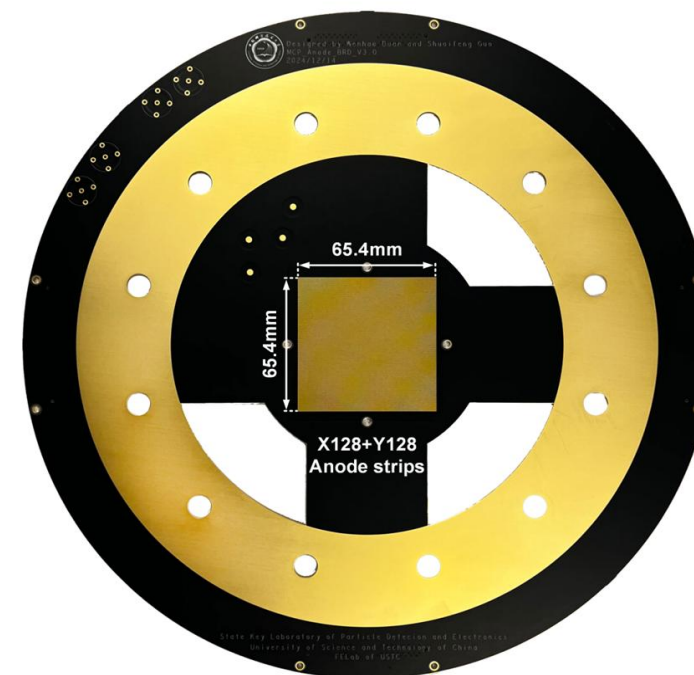
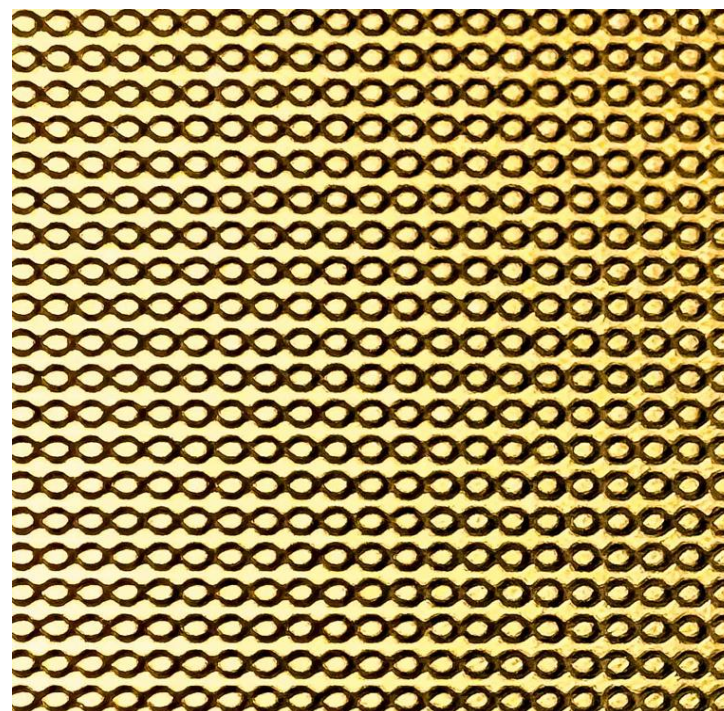
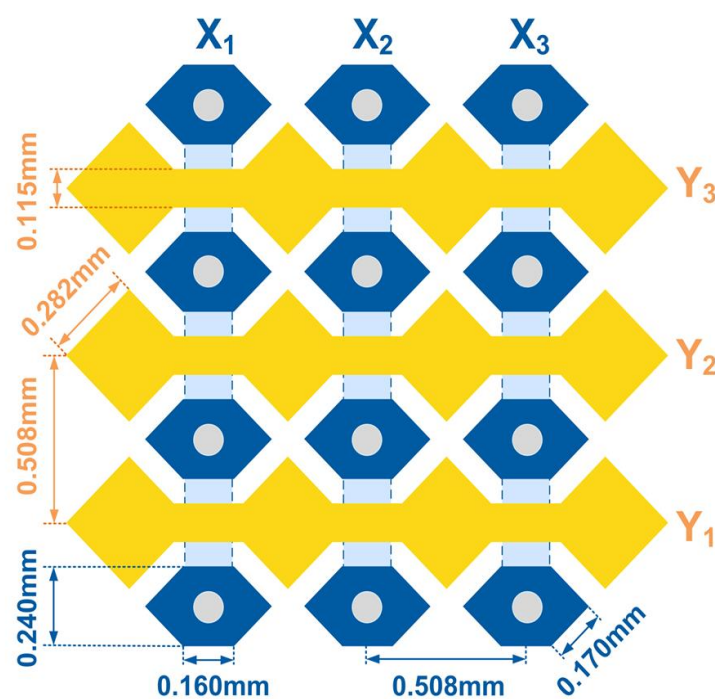


MCP内部结构示意图

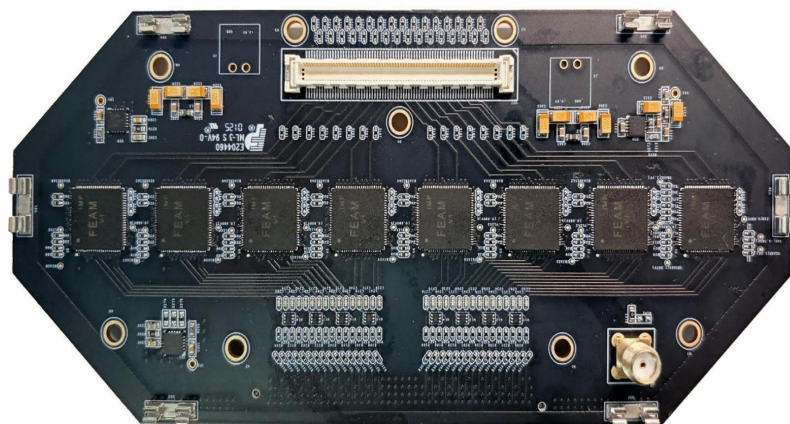


次级电子产生示意图

- 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

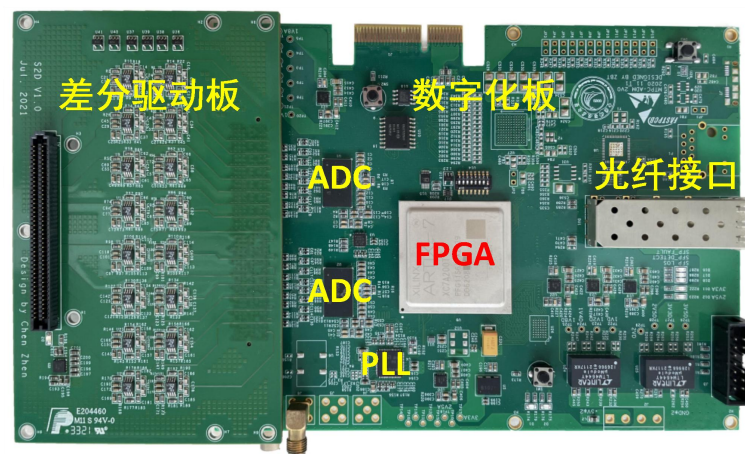


- ❑ 读出电子学:256通道
- ❑ 前端：FEAM芯片+波形采样ADC
- ❑ 后端：数据汇总模块



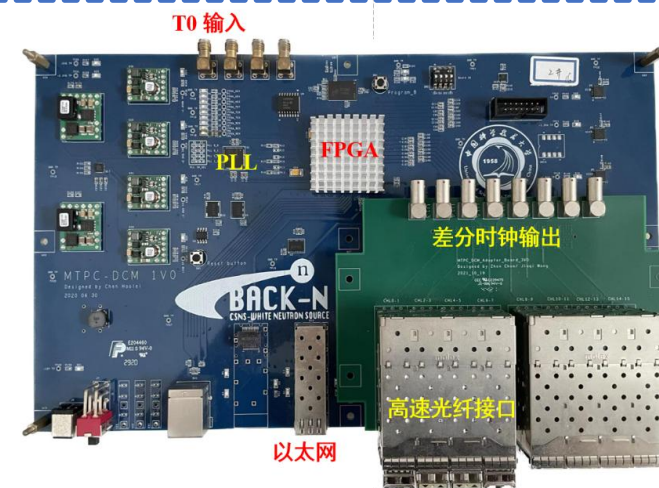
PAM*4

- ❑ 输出达峰时间 80 ns
- ❑ 动态范围 1000 fC



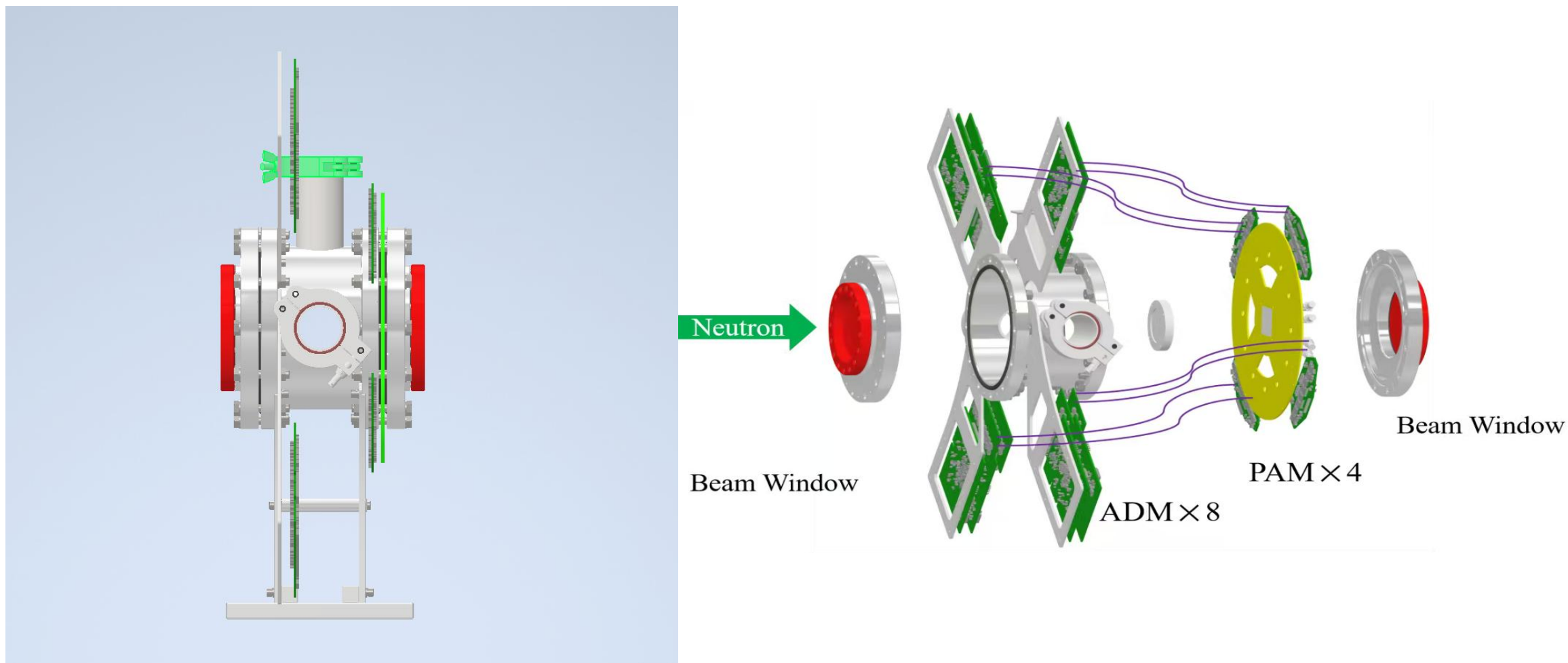
ADM*8

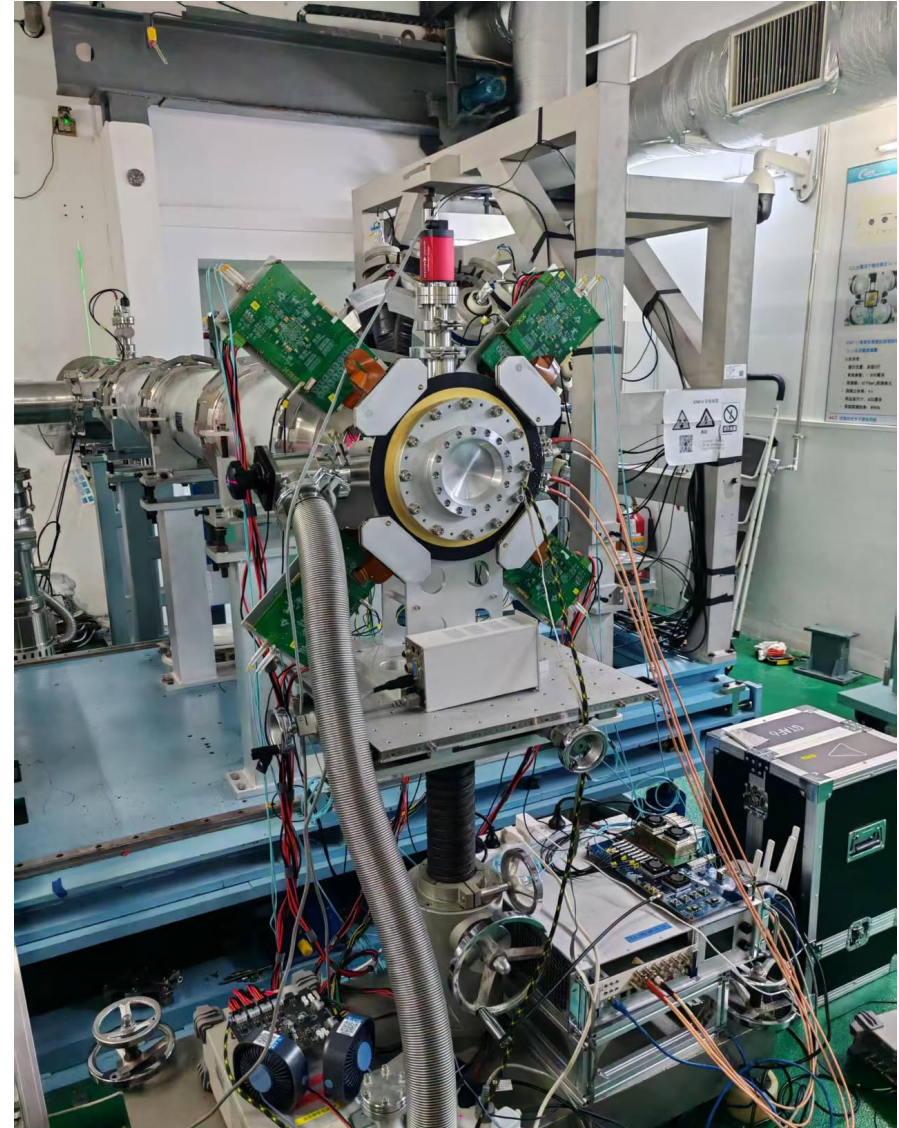
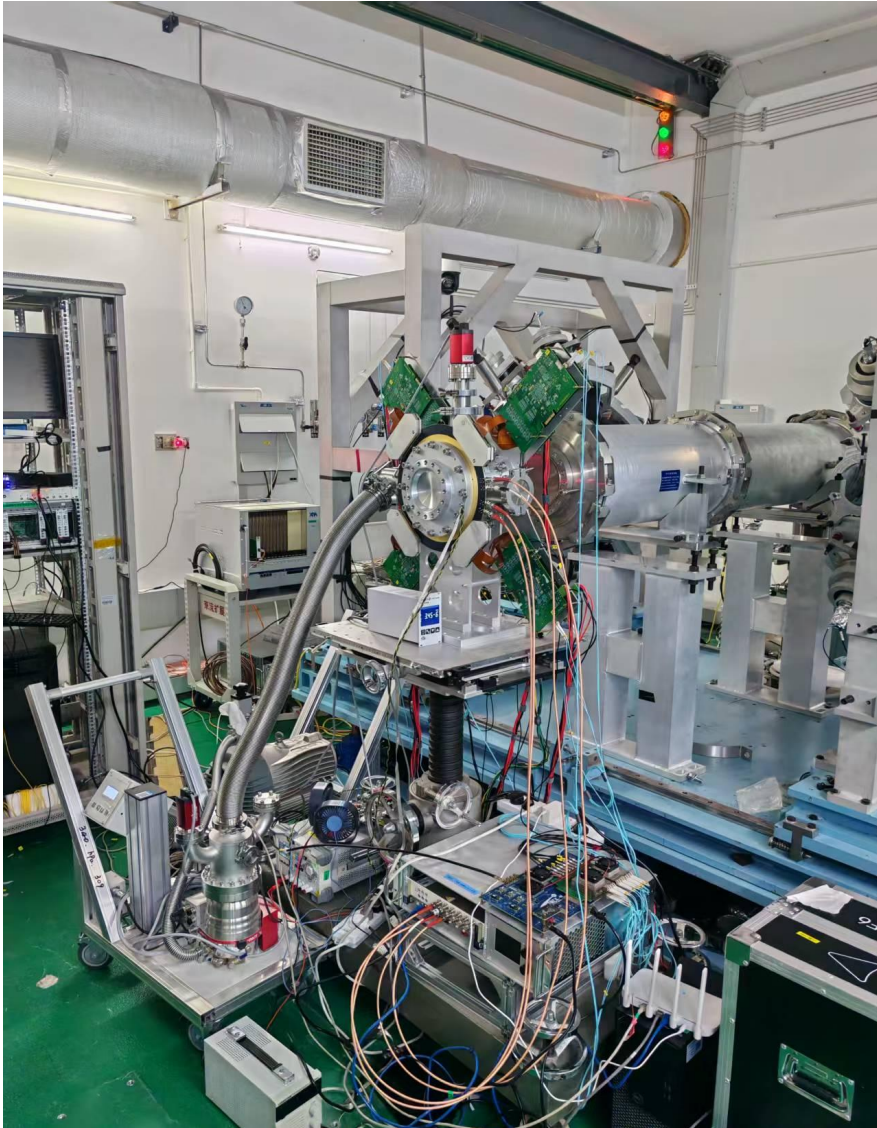
- ❑ 采样率: 80 MSPS
- ❑ 采样分辨:12 bit



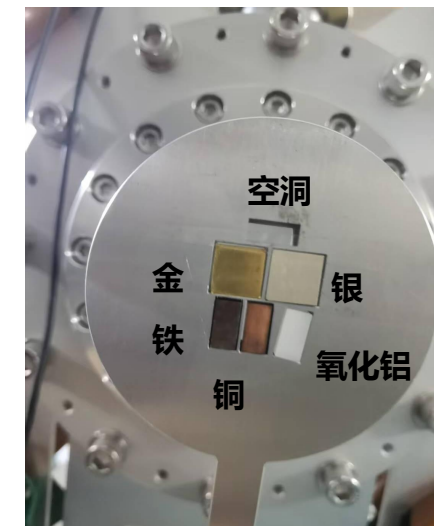
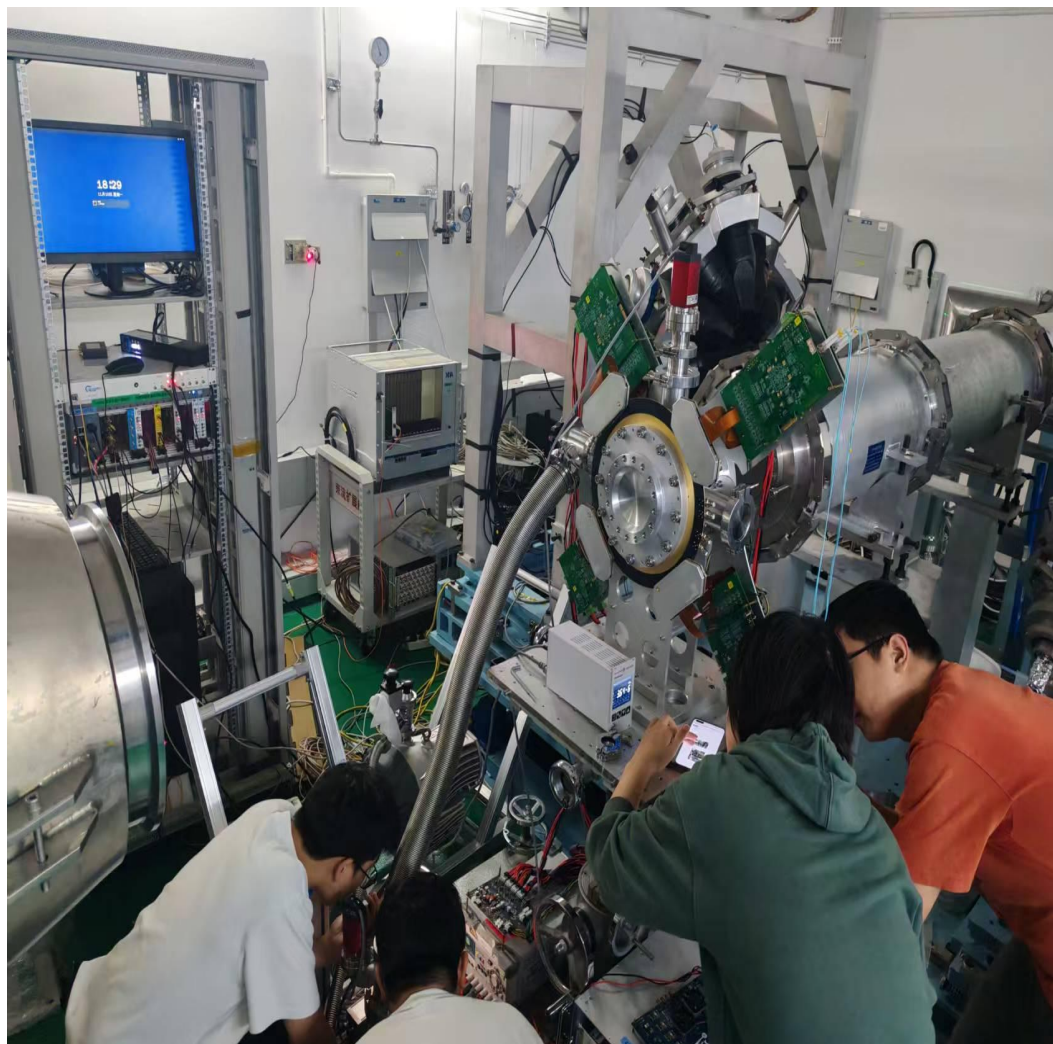
DCM*1

- ❑ 数据汇总、缓存
- ❑ 触发判选+时钟分发

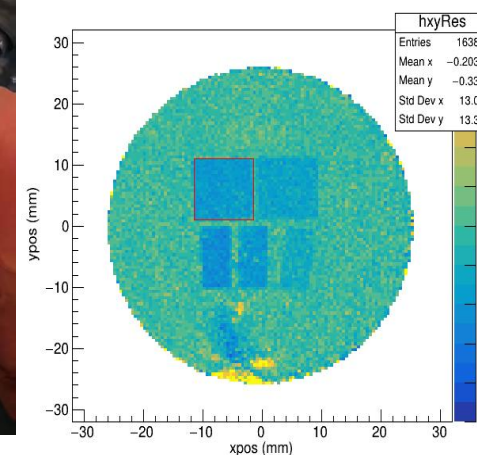




- 位置: ES#2 (~77 m)
- MCP: 2片 (B-MCP+Ordinary MCP)
- 10B含量: 15%mol
- 真空度: $2.8\text{E}-4$ -- $3.6\text{E}-4$ Pa
- 加速器功率: 140-160 kW
- 无样束班测量: 24小时
- 标准样品测量: 36小时
- 计数率: ~1G/min, 1.4T/day



标准样品



目录



01

研究背景

02

探测器及实验介绍

03

空间分辨率

04

时间分辨率

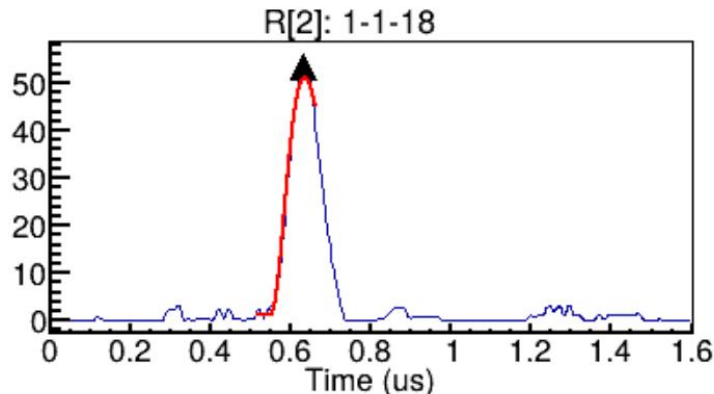
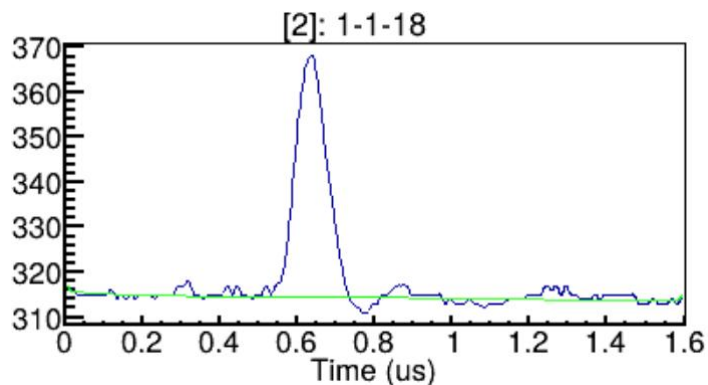
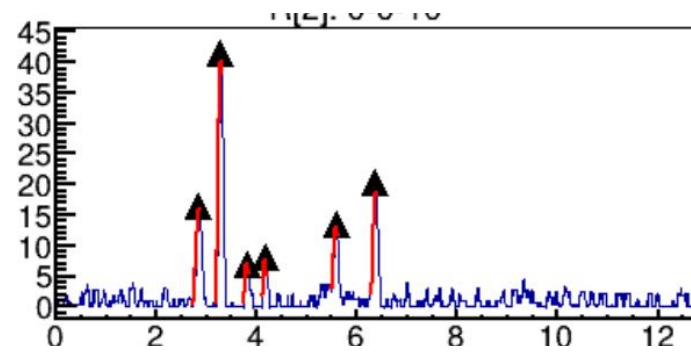
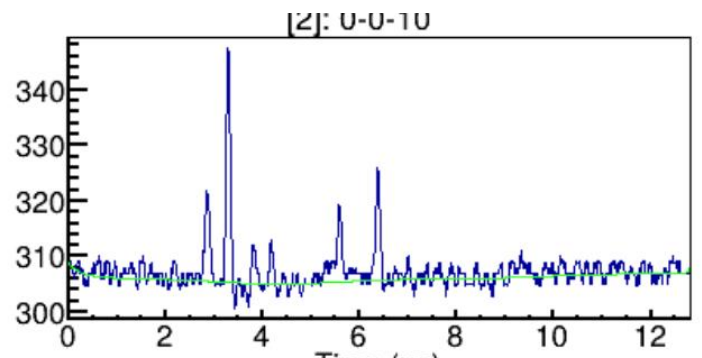
05

总结与展望

- 计数率非常高，多个中子的信号在时间上叠在一起，波形堆成了一团
- 针对叠加波形开发了多脉冲叠加拟合算法，提高了叠加波形的鉴别能力和效率

信号拟合公式：

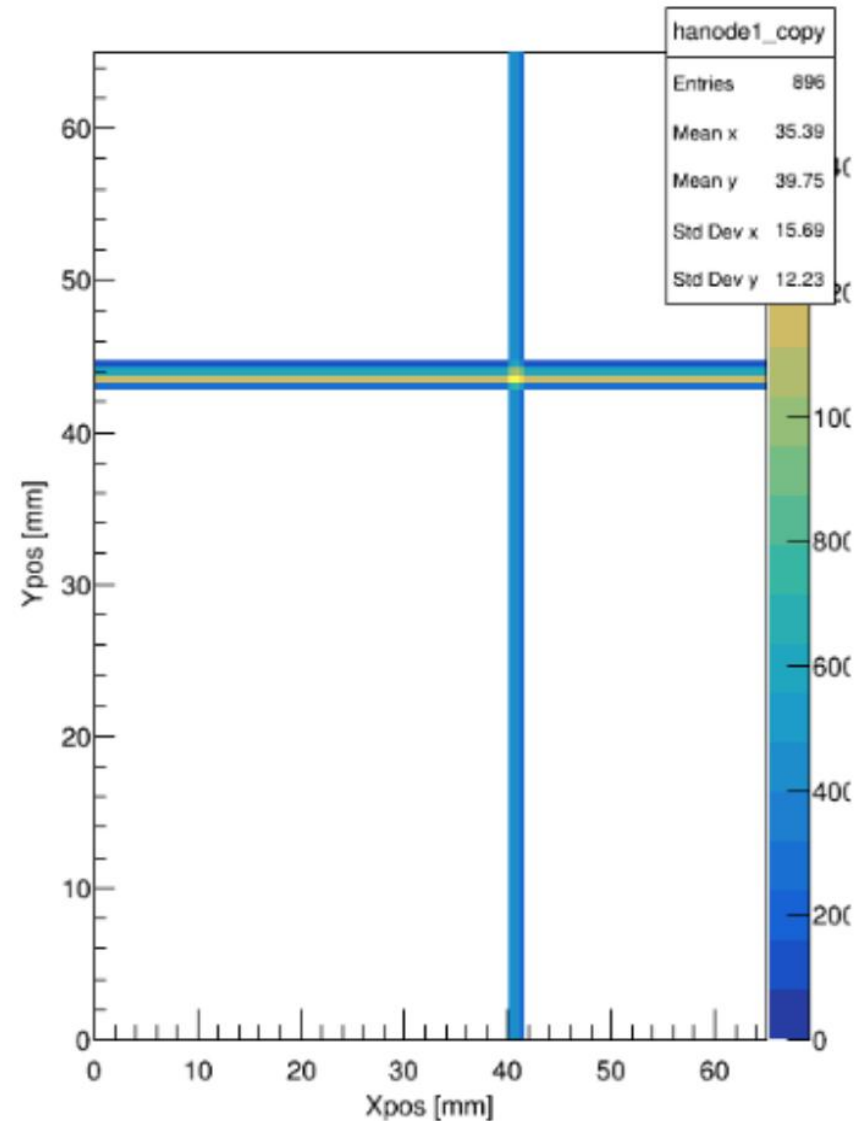
$$V(t) = \sum_{i=1}^N V_i(t) = \sum_{i=1}^N A_i \left(\frac{t - t_{0i}}{\tau_i} \right)^2 e^{-(t - t_{0i})/\tau_i} \cdot u(t - t_{0i}),$$



拟合脉冲的**时间**和**幅度**

- 交叉条阳极 PCB相邻两条的物理间距是 0.508 mm
- 电荷重心法

$$N(x_{centroid}, y_{centroid}) \left\{ \begin{array}{l} x_{centroid} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i A_i}{\sum_{i=1}^N A_i} \\ y_{centroid} = \frac{\sum_{i=1}^N y_i A_i}{\sum_{i=1}^N A_i} \end{array} \right.$$

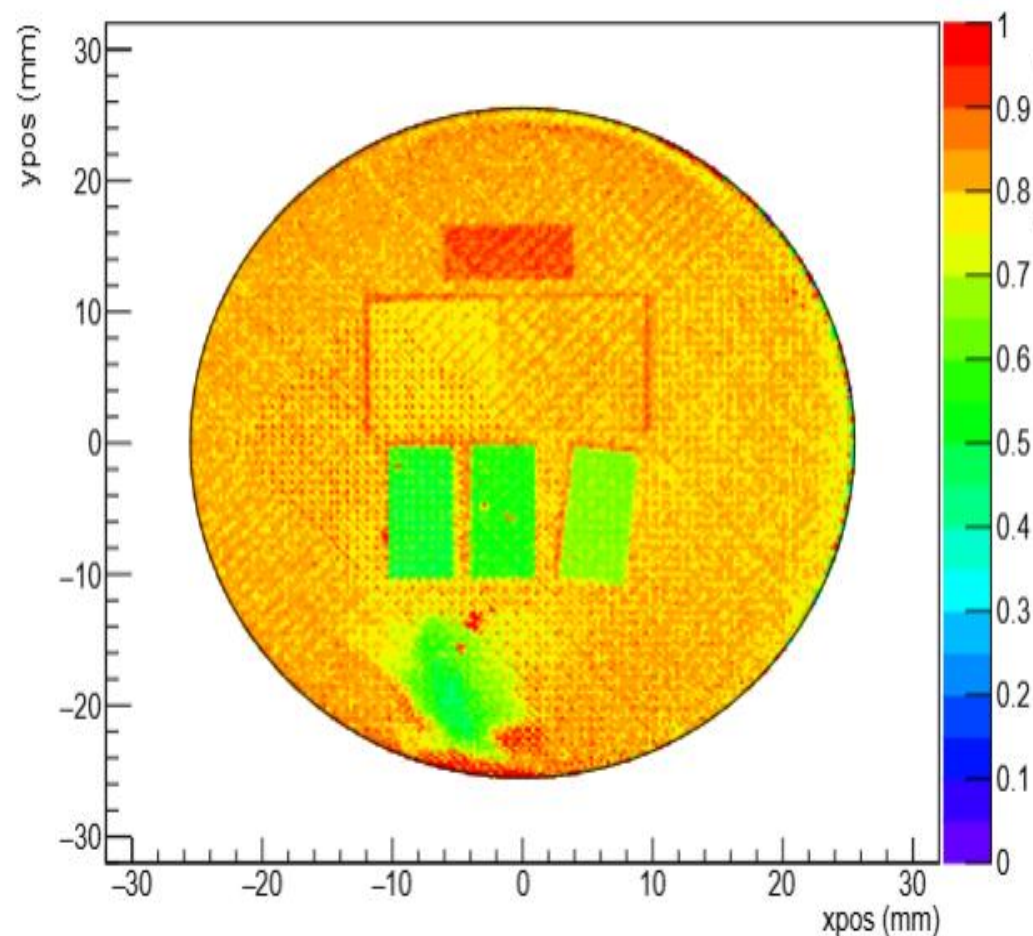


- 选取全能区的有样数据与无样数据分别分析
- 对有样与无样数据进行归一化处理
- 计算透射值

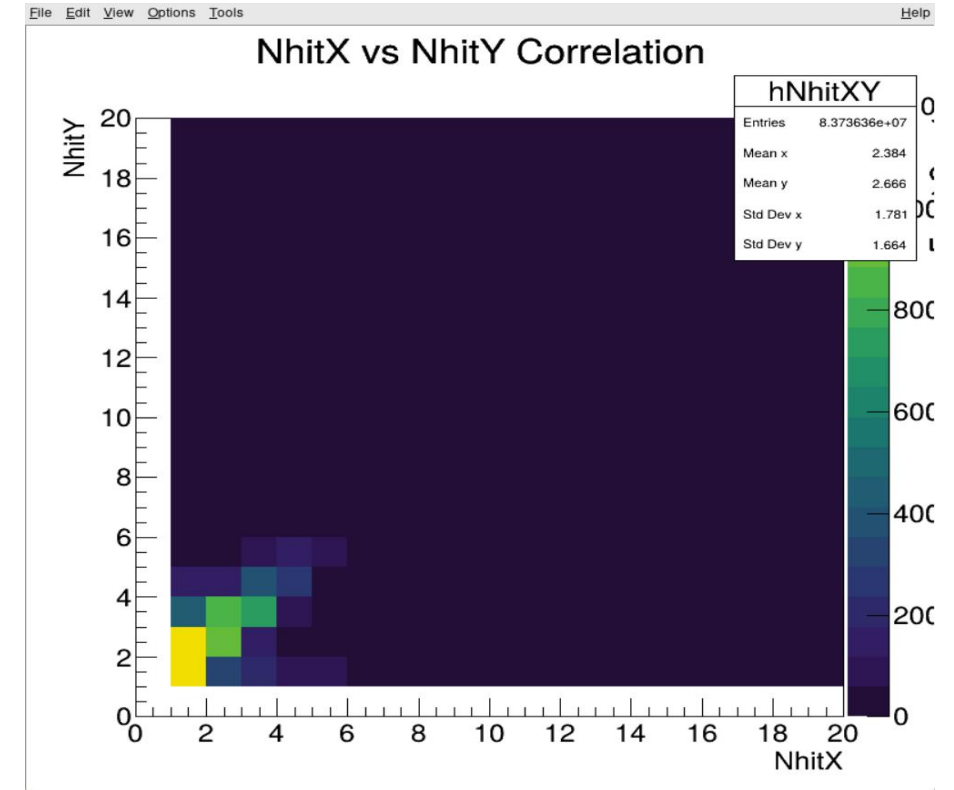
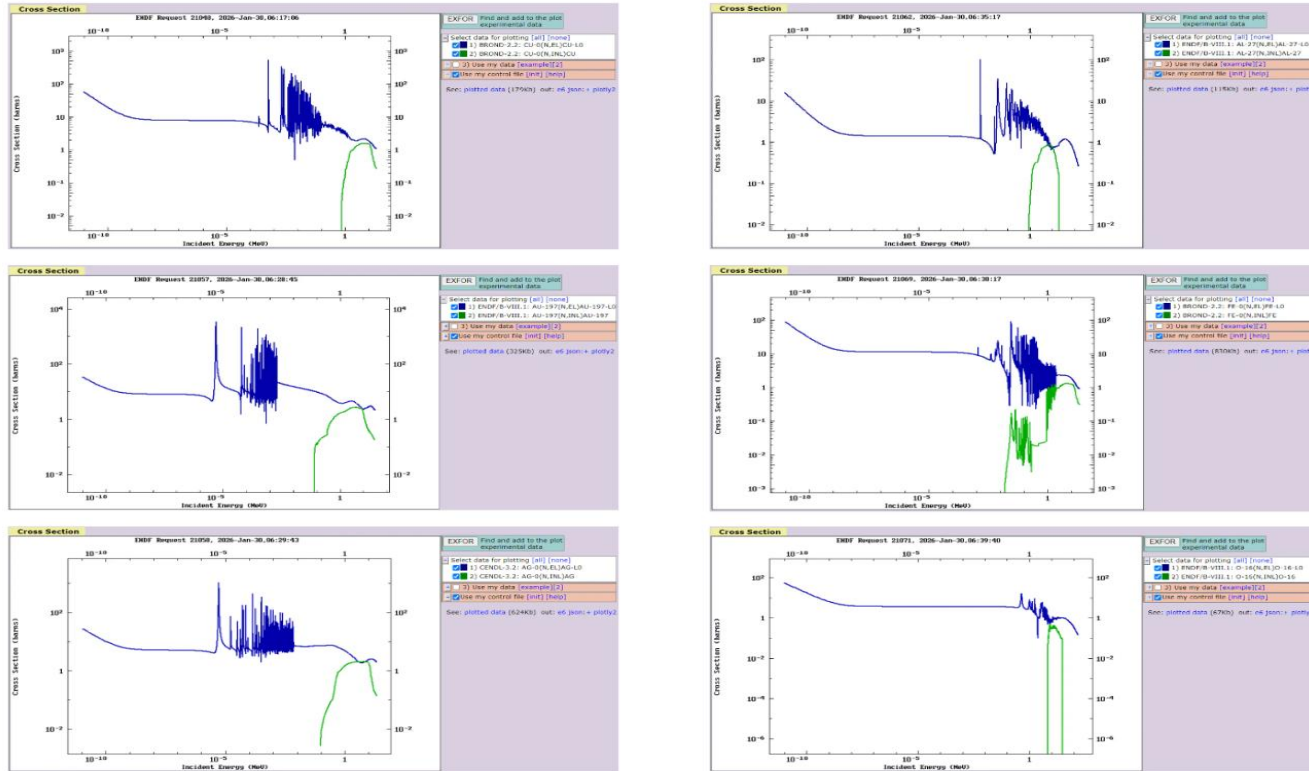
$$T(x, y) = \frac{N_{\text{samp}}(x, y)}{N_{\text{open}}(x, y)}$$

□ 影响因素

- 全能区散射影响
- 全能区对Ag、Au等元素透射率变化不明显
- 击中条Nhit影响



- 能区筛选：1eV-10keV
- Nhit筛选



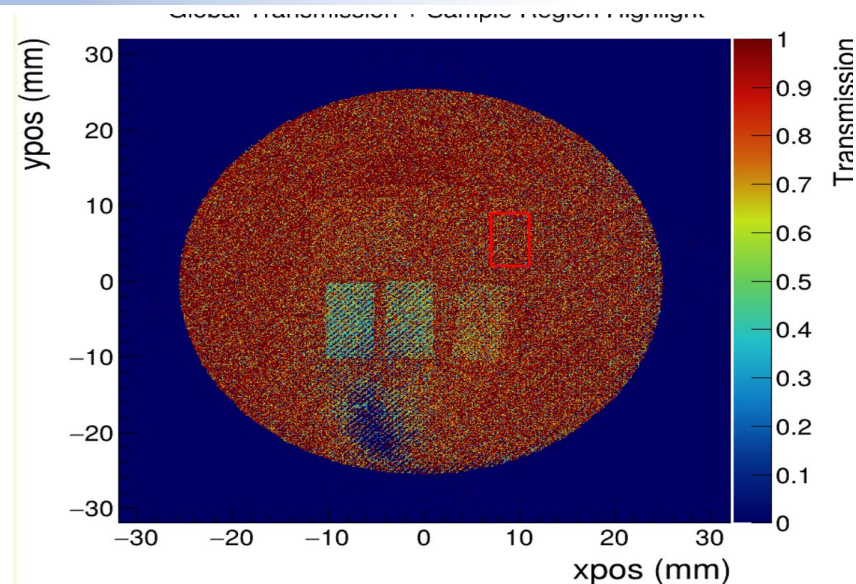
各元素的散射截面

$3 \leq \text{NhitX} \leq 4$
 $4 \leq \text{NhitY} \leq 5$

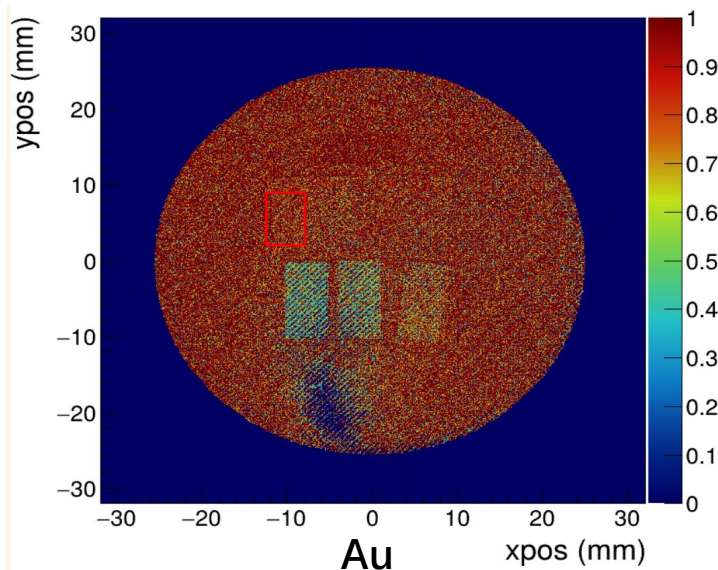
- 评价原理：边缘扩展函数 (ESF)+10%-90% 边缘上升距离判据
 - 提取垂直于样品边缘的线轮廓，平均得到归一化 ESF 曲线
 - 修正误差函数非线性最小二乘拟合

$$f(x) = p_0 + p_1 \cdot \operatorname{erf} \left(\frac{x - p_2}{p_3 \cdot \sqrt{2}} \right)$$

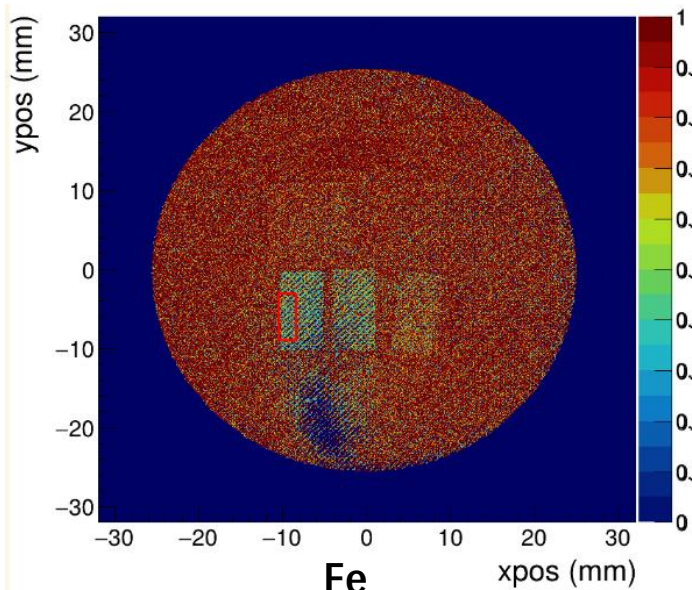
- 定义 10%~90% 透射幅度对应的距离为空间分辨率



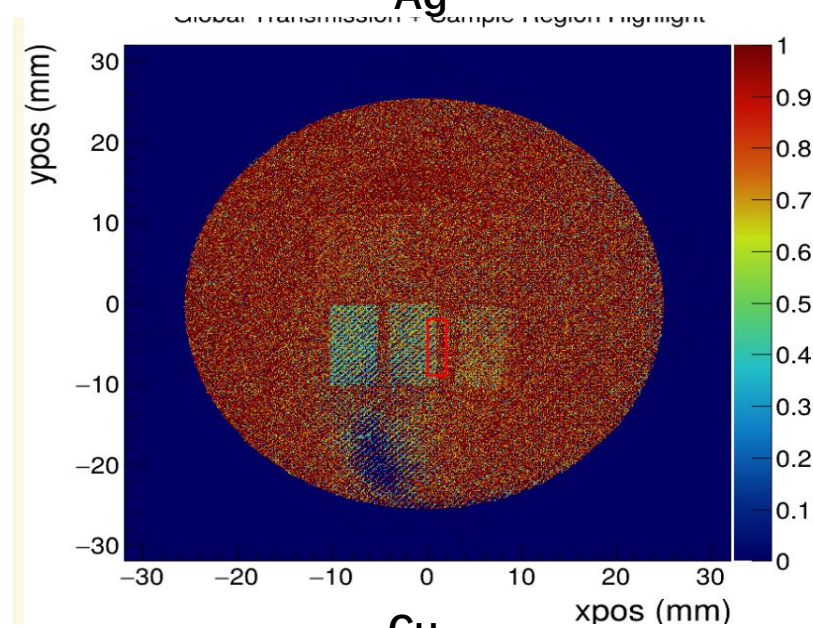
Ag



Au

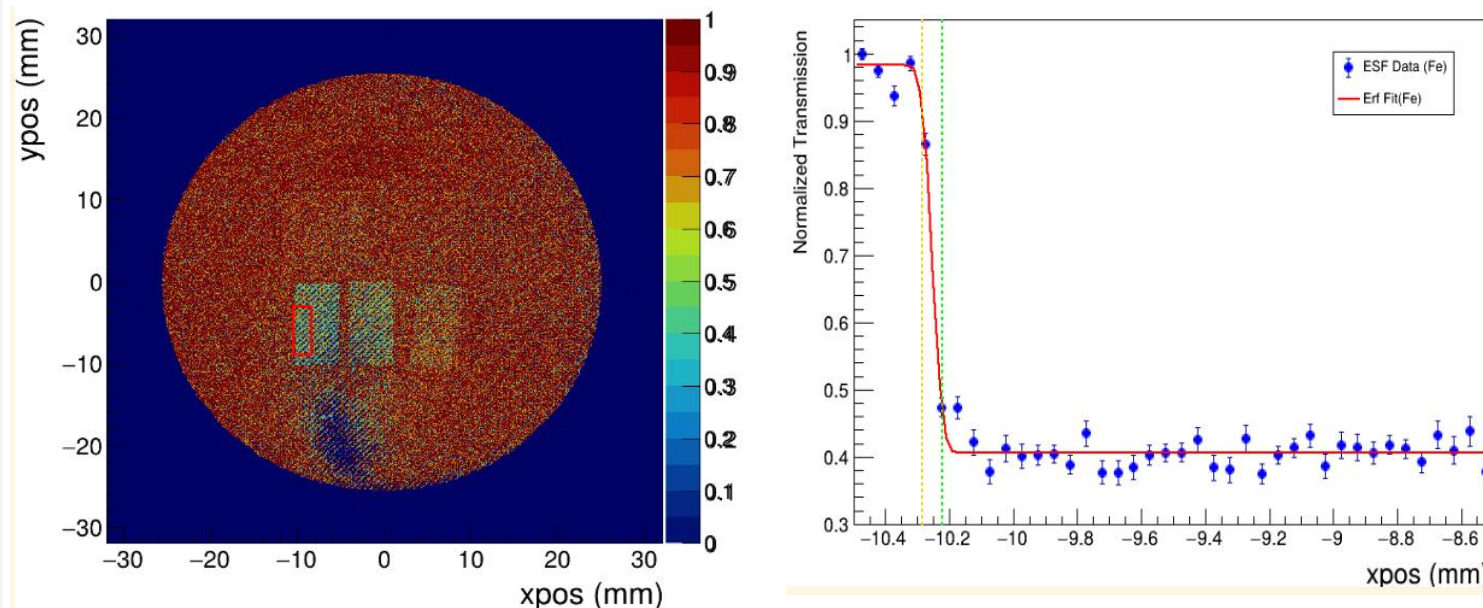


Fe



Cu

- 选取Fe样品边缘透射率曲线拟合得到空间分辨率
- 探测器分辨率 **63 μ m**



```
===== 拟合结果 =====
基线值: 0.693992 | 幅度: -0.288503
最大透射率T_max: 0.982495 | 最小透射率T_min: 0.40549
边缘中心: -10.2535 mm | 标准差: 0.0248969 mm
 $\chi^2/\text{ndf}$ : 1.90311
=====
10%透射率值: 0.46319 | 对应位置: -10.2216 mm
90%透射率值: 0.924794 | 对应位置: -10.2854 mm
10%-90%空间分辨率: 63.8133  $\mu$ m
=====
```

目录



01

研究背景

02

探测器及实验介绍

03

空间分辨率

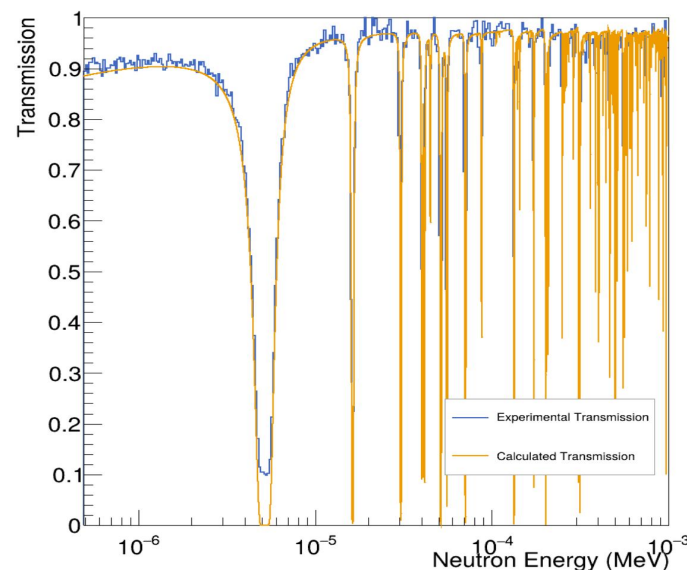
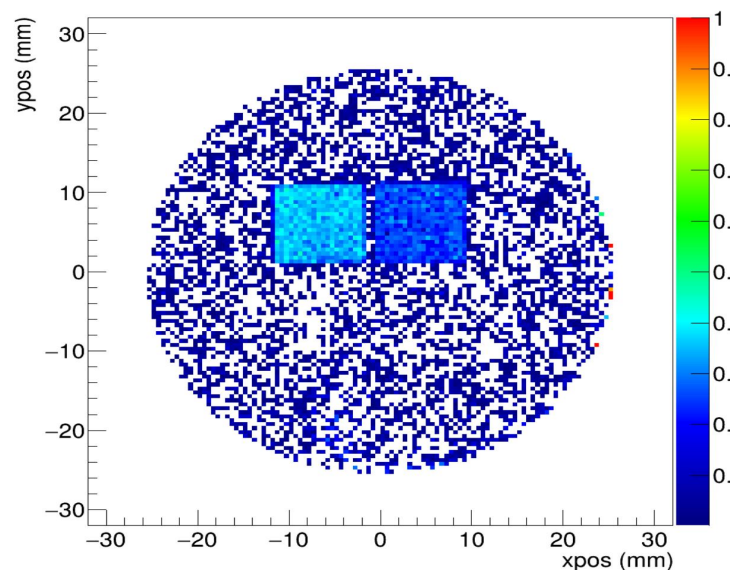
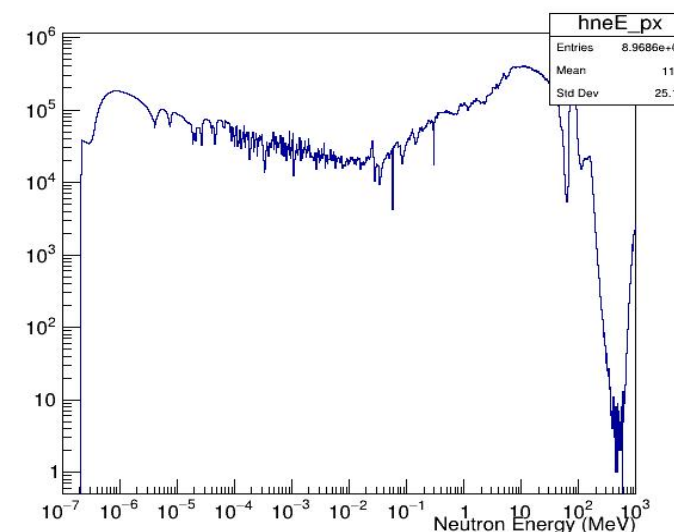
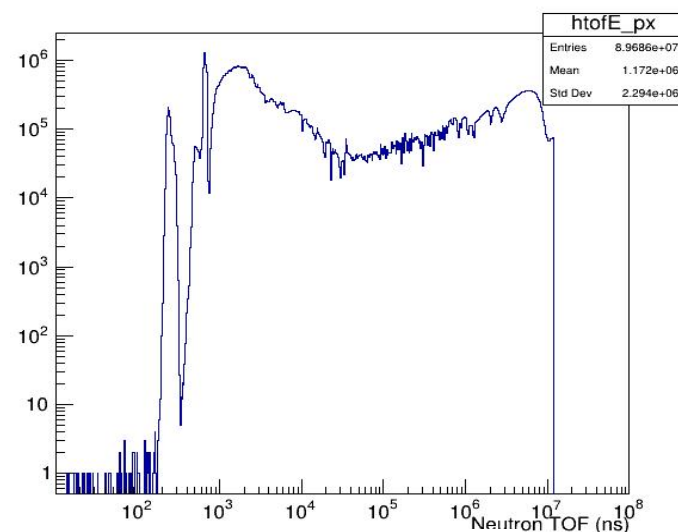
04

时间分辨率

05

总结与展望

- 飞行时间法 (ToF) 测中子能量
- 时间测量精度直接决定能量重建精度
- 影响共振峰识别与元素成像质量



B-MCP的单击中时间分辨率是决定整套成像系统能量分辨上限的关键参数

□ 常规探测器如何定义时间分辨率

- 使用外部绝对时间参考源(如快激光、 T_0 信号),测量探测器输出时间分布的半高全宽(FWHM)
- 必须有一个时间精度远高于探测器的外部参考,作为校准标准。

□ 我们为什么不用

- 白光中子源, 能量连续分布, 到达时间本身是连续展宽的, 不是窄脉冲, 中子到达探测器的时间无法精确得到
- 多通道 (128x128) 的位置灵敏探测器, 一个中子事件会触发多条相邻的读出条, 无法精确确认中子到达的时间

□ 本研究方法:单击中时间分辨率(σ)

- 基于**同一个中子事件内自参考**,利用多通道时间差异反推单通道本征误差, 测量单根读出条的本征定时误差标准差 σ
- 无需外部参考,利用同一事件内多通道共享同一 t_0 的特性。

- 中子的绝对到达时刻 t_0 未知, 无法直接测量 ε_i
- 用事件内平均时间 $\bar{t}$ 代替未知真值 t_0
- 以单中子事例各Hit的时间偏差分布标准差求真实各Hit时间分布标准差

$$[t_i = t_0 + \varepsilon_i, \quad i = 1, 2, \dots, N]$$

$$d_i = t_i - \bar{t} = \varepsilon_i - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \varepsilon_j$$

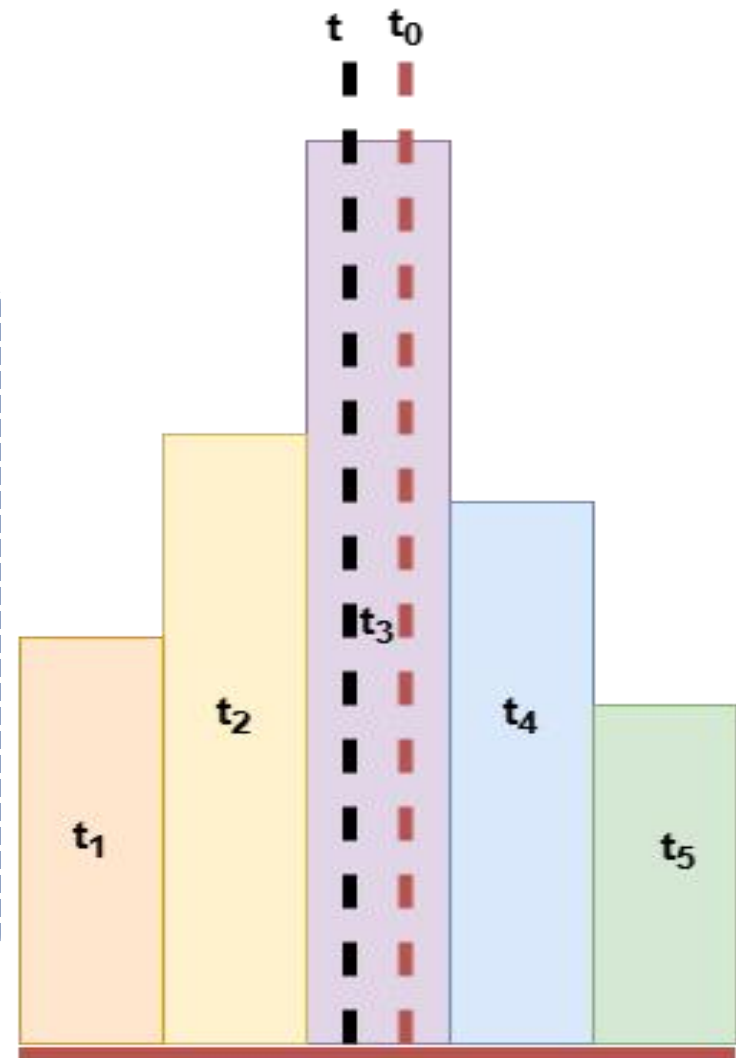
$$E[\Sigma_T] \approx \sigma \sqrt{1 - \frac{1}{N}}$$

$$[s_i^2 = \text{Var}(d_i) \cdot \frac{N}{N-1}]$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N d_i^2 &= \sum_{i=1}^N \left(\varepsilon_i - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \varepsilon_j \right)^2 \\ &= \sum_{i=1}^N \left(\varepsilon_i^2 - \frac{2}{N} \varepsilon_i \sum_{j=1}^N \varepsilon_j + \frac{1}{N^2} \left(\sum_{j=1}^N \varepsilon_j \right)^2 \right) \\ &= \sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2 - \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon_i \sum_{j=1}^N \varepsilon_j + \frac{N}{N^2} \left(\sum_{j=1}^N \varepsilon_j \right)^2 \\ &= \sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2 - \frac{2}{N} \left(\sum_{i=1}^N \varepsilon_i \right)^2 + \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N \varepsilon_i \right)^2 \\ &= \sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N \varepsilon_i \right)^2 \end{aligned}$$

$$\Sigma_T^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2 - \frac{1}{N^2} \left(\sum_{i=1}^N \varepsilon_i \right)^2$$

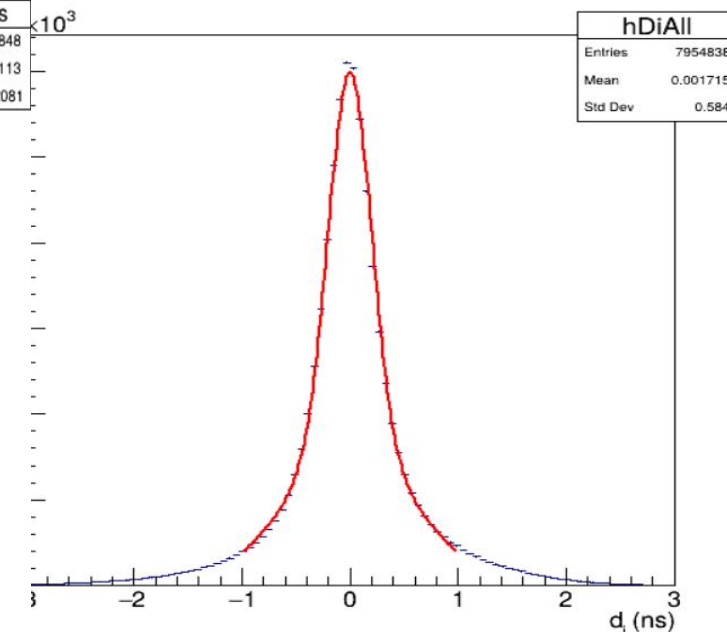
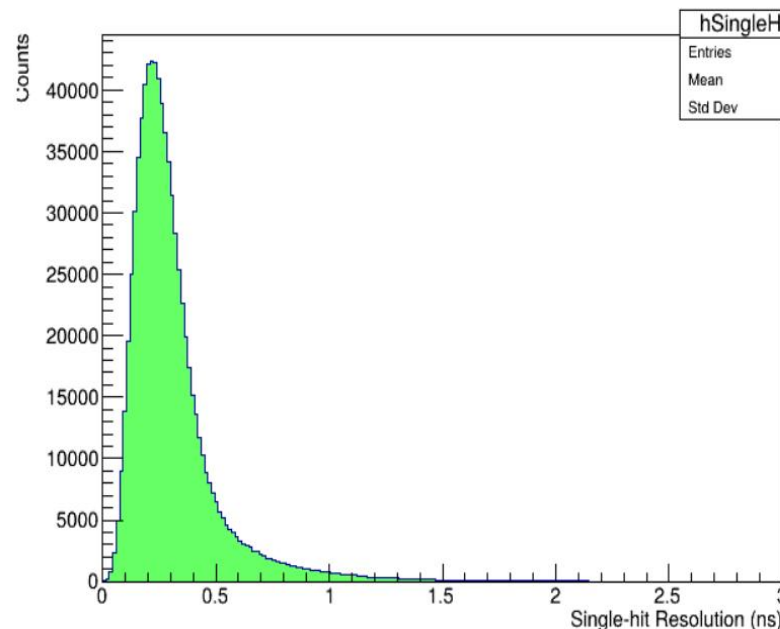
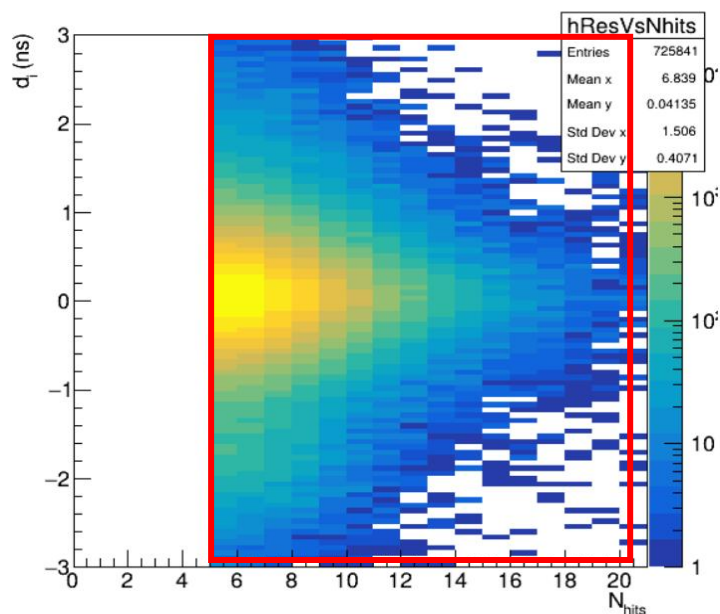
$$E[\Sigma_T^2] = \frac{1}{N} \cdot N\sigma^2 - \frac{1}{N^2} \cdot N\sigma^2 = \sigma^2 - \frac{\sigma^2}{N} = \sigma^2 \left(1 - \frac{1}{N} \right)$$



- ❑ 选取低能区单中子事例
- ❑ 选取 $5 \leq N_{\text{hit}} \leq 20$ 事件分析时间分辨
- ❑ 得到探测器时间分辨430ps

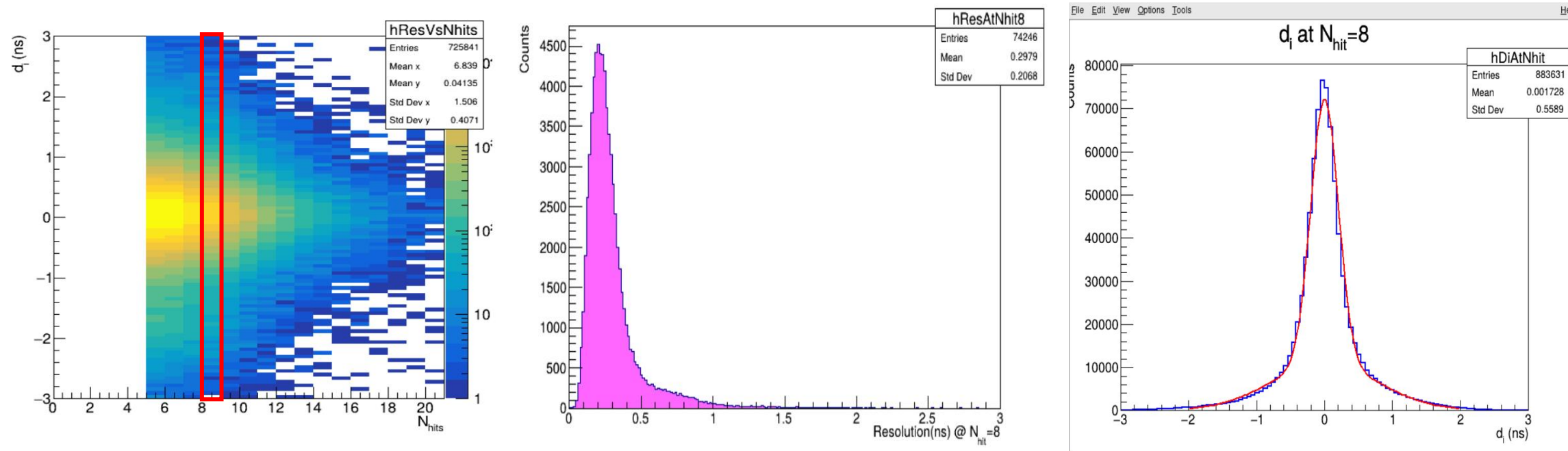
$$[\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_i (N_i - 1) \cdot s_i^2}{\sum_i (N_i - 1)}]$$

$$[y(x) = y_0 + A_1 \exp\left[-\frac{(x - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2}\right] + A_2 \exp\left[-\frac{(x - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right]]$$



方法	统计加权组合法	双高斯残差拟合法
条件	$5 < N_{\text{hit}} < 20$	$5 < N_{\text{hit}} < 20$
有效事例数	807848	818459
分辨率(ns)	0.378854	0.429079

- ❑ 选取特定Nhit=8事件分析时间分辨
- ❑ 得到探测器时间分辨误差<4.5%



方法	统计加权组合法	双高斯残差拟合法
条件	$N_{hit}=8$	$N_{hit}=8$
有效事例数	74246	76125
分辨率(ns)	0.365715	0.383132

目录



01

研究背景

02

探测器及实验介绍

03

空间分辨率

04

时间分辨率

05

总结与展望

- 通过边缘扩展函数法 (ESF)测得了最终空间分辨率约为63 μm 。
- 通过无偏估计和自由度加权合并，结合双高斯拟合模型分离物理过程，测得最终时间分辨率为 0.43 ns

**感谢各位专家，
敬请批评指正！**



汇报人：王卫龙
中国科学院高能物理研究所
散裂中子源科学中心
2026年8月11日@河南郑州

第二十三届全国核电子学与核探测技术学术年会(NED2026)