



基于白光中子源的中子共振成像实验和模拟进展

报告人：王丽娇

2022.6.28

高能所东莞研究部



提纲

- CSNS反角白光中子源的束流特点
- 中子共振成像的蒙卡模拟
- 基于快门CMOS相机的中子共振成像实验
- 基于含硼微通道板(B-MCP)的中子共振成像实验
- 下一步工作计划



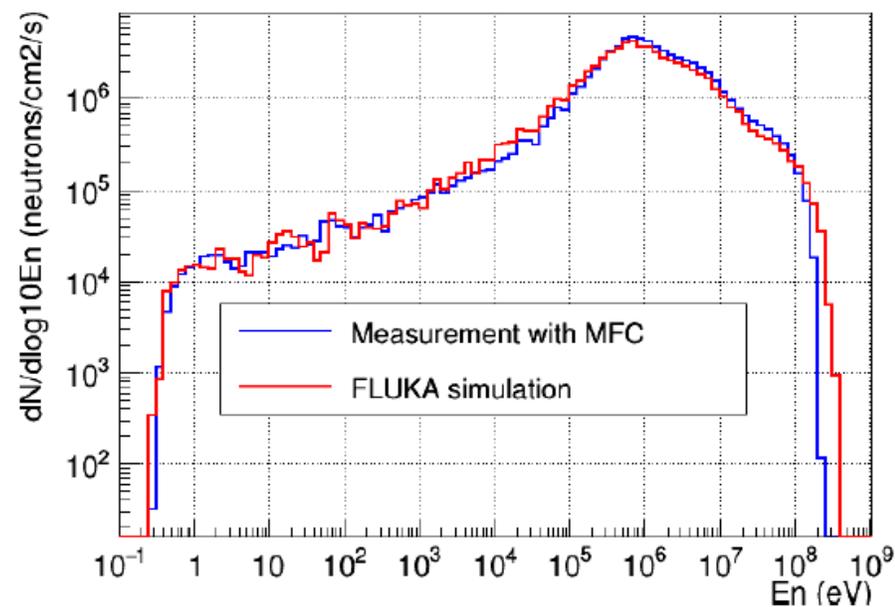
提纲

- **CSNS反角白光中子源的束流特点**
- 中子共振成像的蒙卡模拟
- 基于快门CMOS相机的中子共振成像实验
- 基于含硼微通道板(B-MCP)的中子共振成像实验
- 下一步工作计划



- CSNS中反角白光中子源的主要参数

中子能区	1 eV – 200 MeV
质子束能量和强度	1.6 GeV and 1.6×10^{13} (p/pulse)
脉冲重复频率	25 Hz
时间分辨率 (1 eV - 1 MeV)	0.2% ~ 0.9%
中子注量率	$\sim 9.3 \times 10^6$ n/cm ² /s (80 m)
	$\sim 2.0 \times 10^7$ n/cm ² /s (55 m)
不同能区内中子的比例	0.53 (1 eV - 1 MeV)
	0.40 (1 MeV – 20 MeV)
	0.05 (20 MeV – 200 MeV)

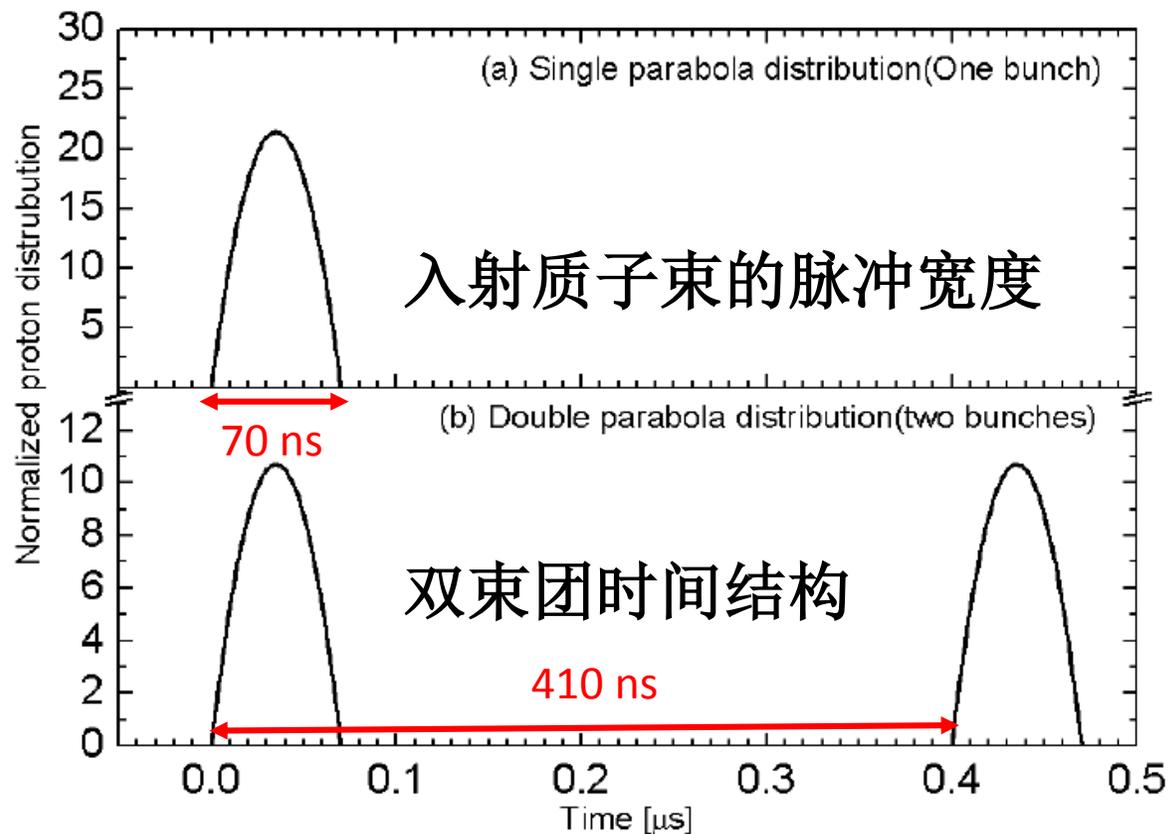


Back-n厅2的能谱

- 中子通量高，穿透能力强，有利于提高中子成像的质量和效率
- 中子能谱宽，可兼顾轻核素成份和中重核素成分分辨
- 目前可用设备: 门控CMOS相机
- 发展中: 掺硼MCP (像素+TOF读出)



• 决定中子束流脉冲时间结构的因素



质子束流的单束团和双束团时间结构

散裂靶造成时间展宽的来源:

1. 中子在散裂靶中产生的位置;
2. 散裂靶体本身对中子具有慢化作用;

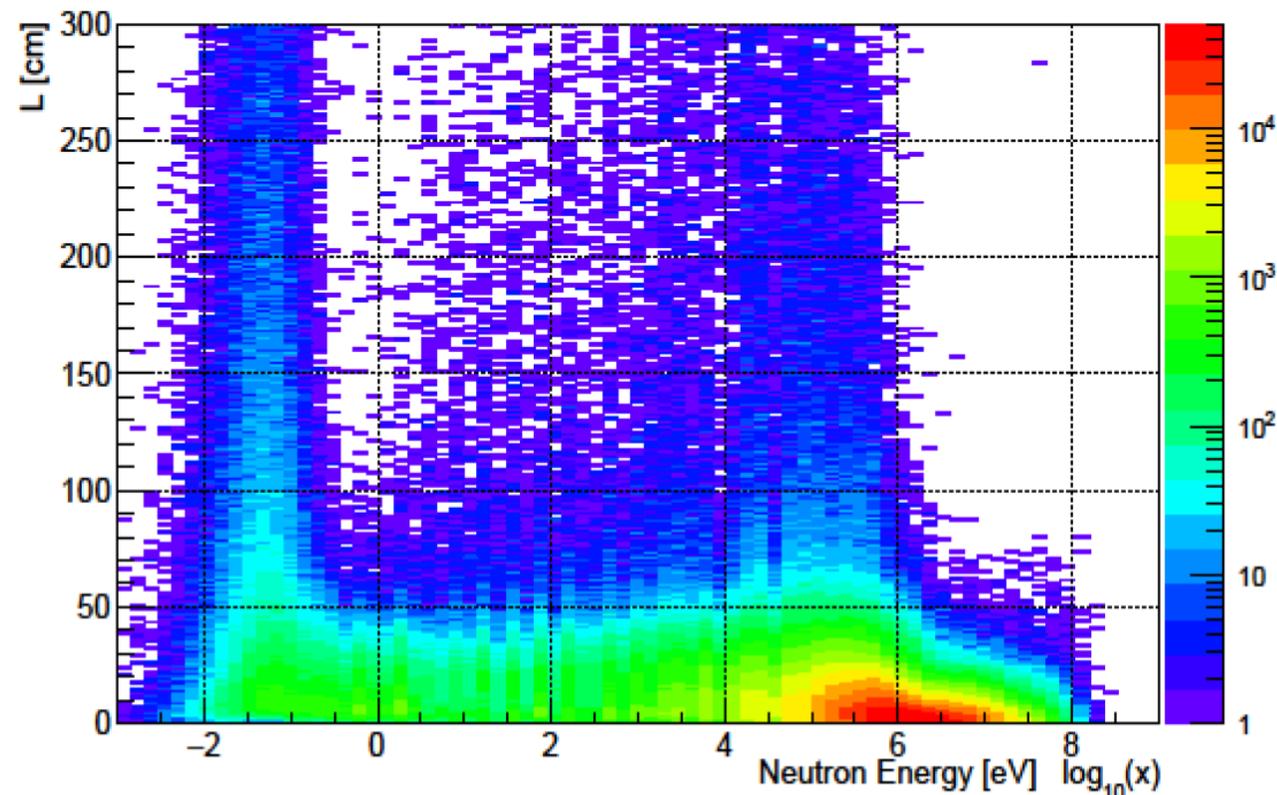


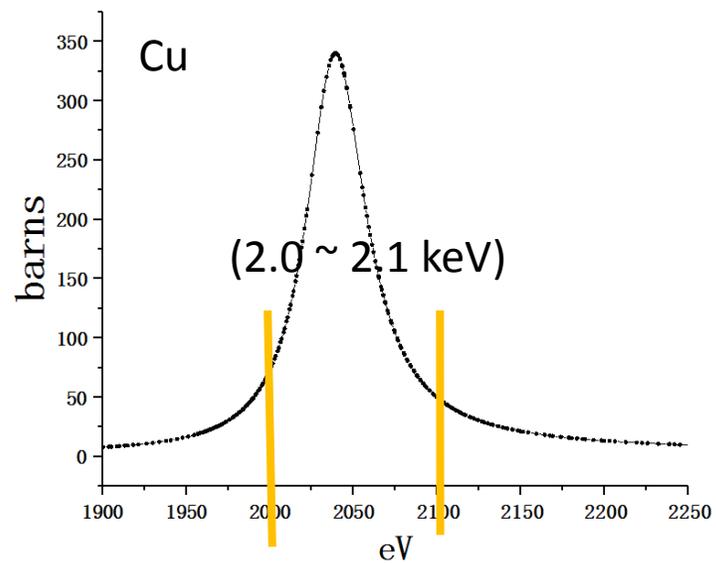
图 3.11 慢化长度的概率密度分布 vs.中子能量。

慢化长度

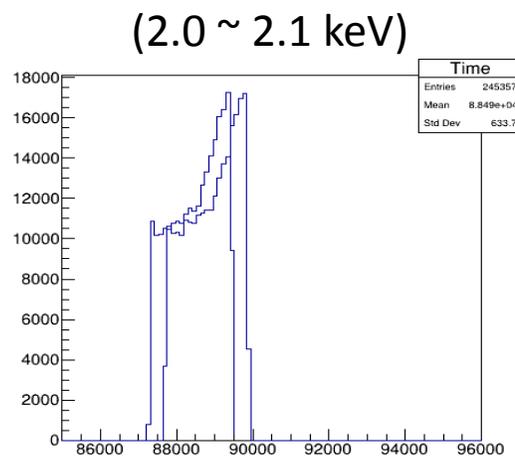


提纲

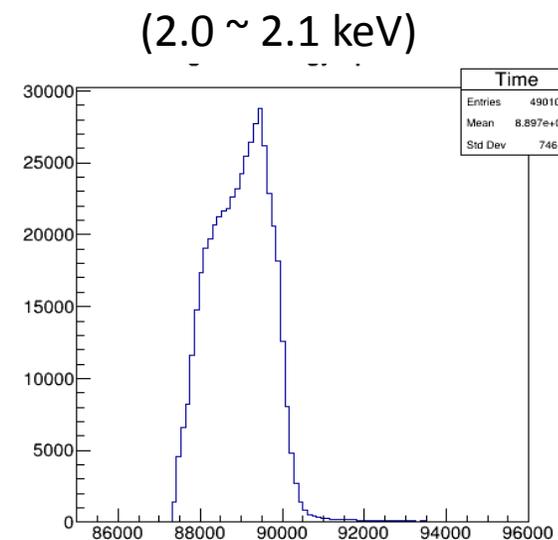
- CSNS反角白光中子源的束流特点
- **中子共振成像的蒙卡模拟**
- 基于快门CMOS相机的中子共振成像实验
- 基于含硼微通道板(B-MCP)的中子共振成像实验
- 下一步工作计划



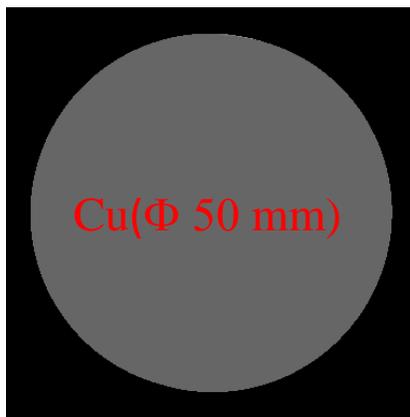
无慢化长度



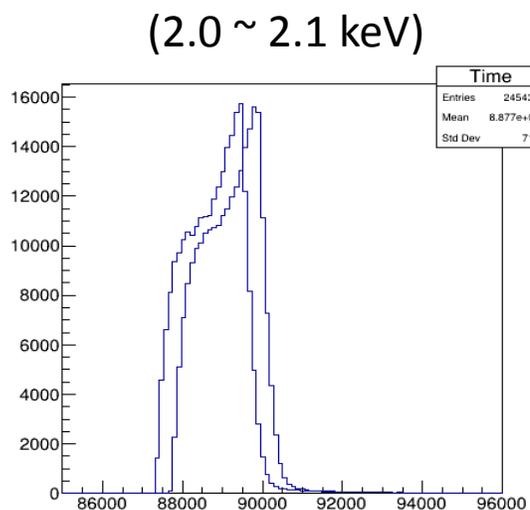
第一个中子束团的时间间隔是
87.2 ~ 89.4 μs (时长约2 μs)



两个中子束团的叠加

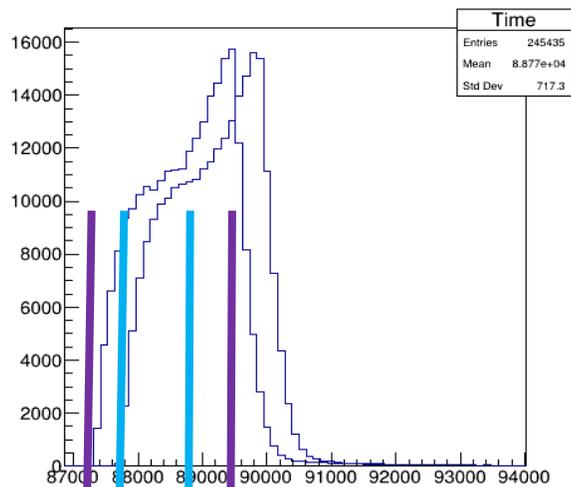


有慢化长度

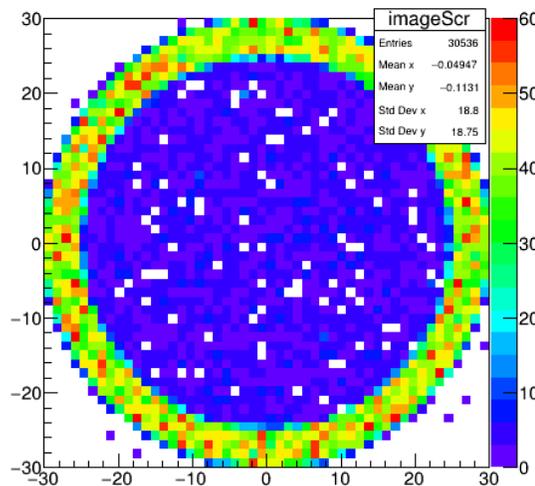




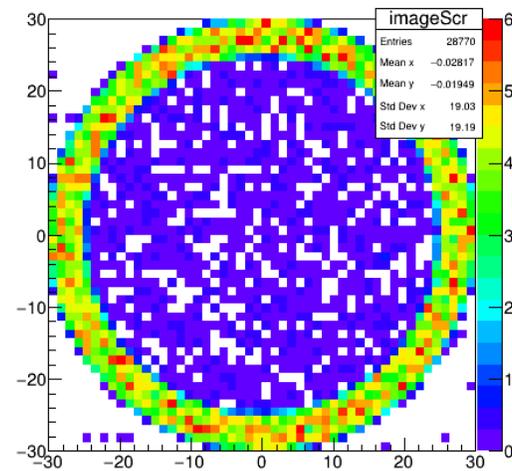
➤ 按照第一个束团的时间结构选择时间窗口



时间窗中心:88.36 μs



时长约2 μs



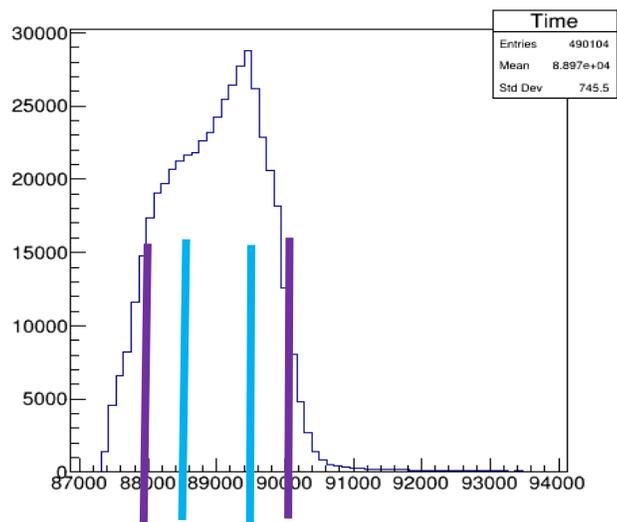
时长1 μs

➤ 有效粒子: 能量区间在2.0~2.1 keV的中子

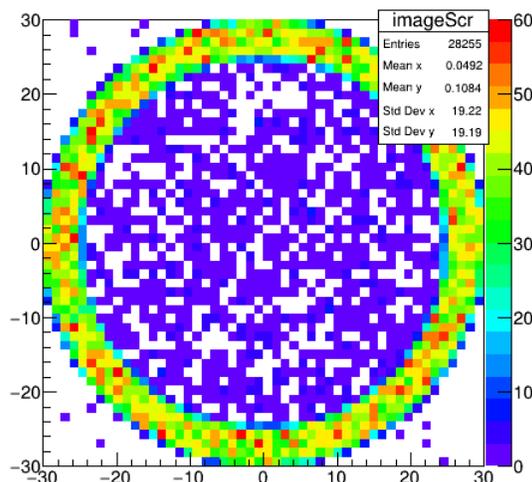
时间窗口(μs)	能量区间(keV)	有效粒子占比
87.3~89.4(时长约2.0 μs)	2.0~2.1	77.4%
87.9~88.9(时长约1.0 μs)	2.0~2.1	92.01%



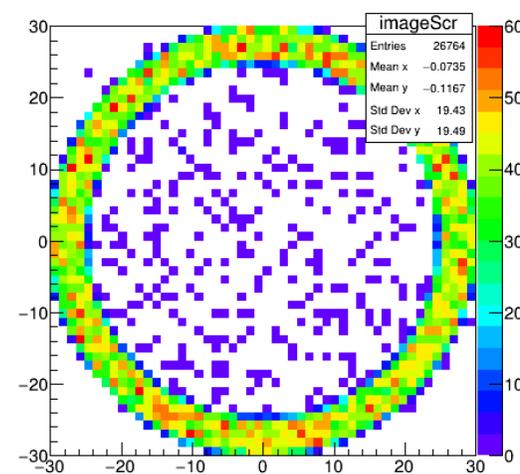
➤ 按照两个束团的累加时间结构选择时间窗口



时间窗中心: 89.0 μs



时长2 μs



时长1 μs

时间窗口(μs)	能量区间(keV)	有效粒子占比
88~90 (时长2.0 μs)	2.0~2.1	86.4%
88.5~90.5(时长约1.0 μs)	2.0~2.1	99.1%

➤ 重新选择时间窗口后, 相同时长可提高有效粒子数占比。



- 探测器的构建

➤ 探测器采用掺杂6LiF的ZnS为闪烁屏，核反应原理如下：

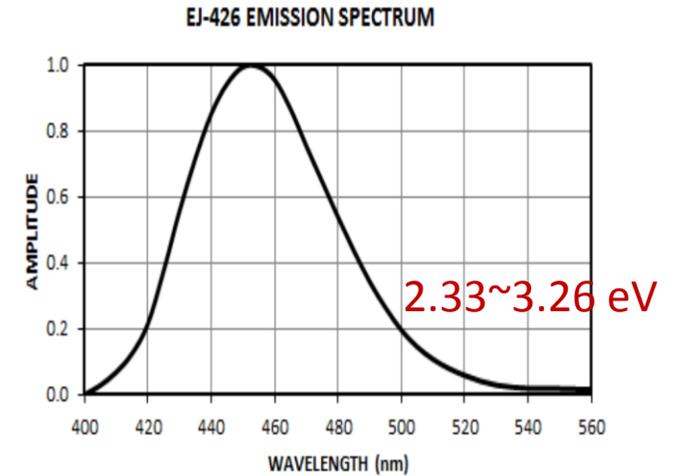


- 中子核反应产生的次级带电粒子沉积4.78 MeV能量，
可以产生 $1.6e5$ 个光学光子；

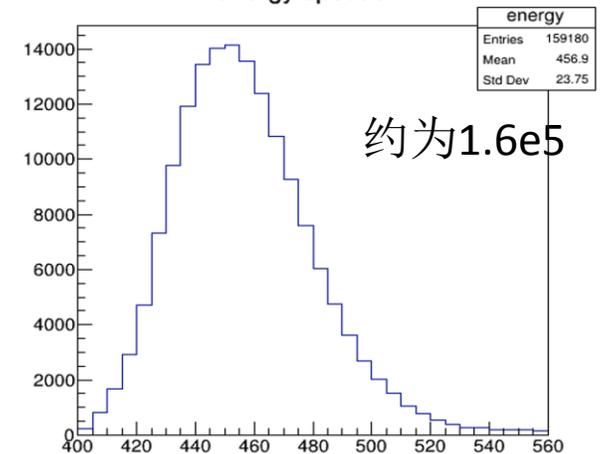
➤ ZnS闪烁屏：

- 厚度0.3mm； 6LiF: ZnS质量比是1:3
- Geant4中设置参数：光产额、时间衰减常数(200 ns)、光谱、
折射率(2.36)，吸收长度(~0.5 mm)、介质折射率(空气1.0)、
表面属性(粗糙、光滑、表面反射率1.0)。

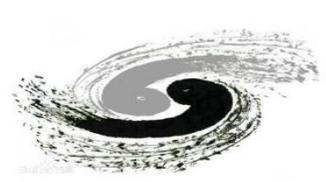
实验用的闪烁体是ZnS粉末状粘在Al片上



闪烁体发光光谱
energy spectrum



模拟得到的光谱



厚度	打在样品的中子数目 (0.025eV)	发光的中子数目	闪烁屏探测效率	总的发光光子数	照相机可收集到的光子数目	可收集到的光子比例
0.25mm	5000	917	18%	138545001	4473443	3.22%
0.3mm	5000	1084	22%	165384171	5012328	3.03%
0.4mm	5000	1381	28%	213617983	5729691	2.68%
0.5mm	5000	1661	33%	259082019	6218027	2.4%
0.6mm	5000	1931	38%	301189504	6472483	2.15%
0.7mm	5000	2176	43%	340729111	6532938	1.92%
0.8mm	5000	2360	47%	370814426	6367266	1.71%
0.9mm	5000	2584	52%	407158901	6282022	1.54%
1.0mm	5000	2732	55%	430451906	5953006	1.38%

DETECTION PROPERTIES			
Screen Type		EJ-426-0	EJ-426HD2
⁶ LiF:ZnS Mass Ratio		1:3	1:2
⁶ Li Density (atoms/cm ³)		8.81 × 10 ²¹	1.39 × 10 ²²
Theoretical N TH Efficiency	0.32 mm thick	0.23	0.34
	0.50 mm thick	0.34	0.48

➤ 闪烁体厚度越厚，光子转换效率越高，但在相机位置处，可收集到的光子比例逐渐下降。



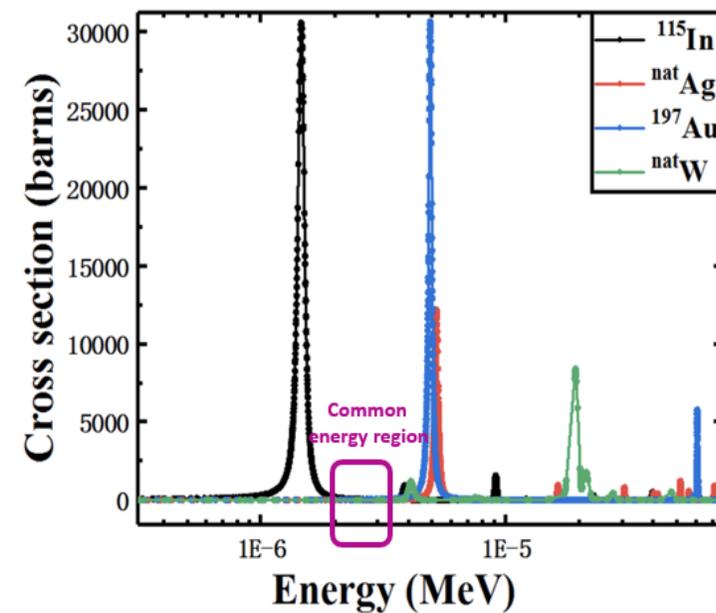
提纲

- CSNS反角白光中子源的束流特点
- 中子共振成像的蒙卡模拟
- **基于快门CMOS相机的中子共振成像实验**
- 基于含硼微通道板(B-MCP)的中子共振成像实验
- 下一步工作计划



➤ 低能区样品: Au、Ag、In、W

反应截面相对大小	延迟(ms)	时间窗宽度(ms)	能量区间
In	3968	4000	0.5eV~2.0eV
Ag	2371	140	5.0ev~5.6eV
Au	2510	135	4.5eV~5.0eV
W	1160	200	18.2eV~19.6eV
Au和Ag	2645	274	3.7eV~4.5eV
Public	3000	873	2.1eV~3.5eV

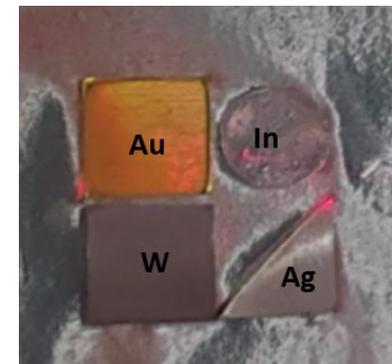
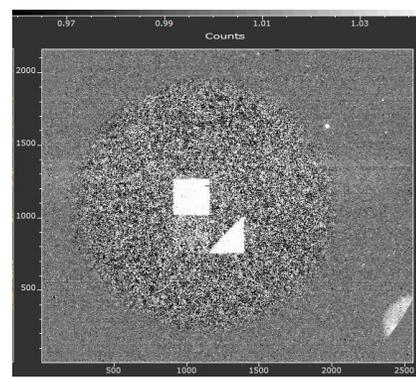
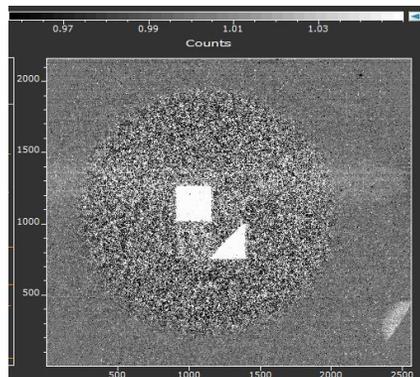
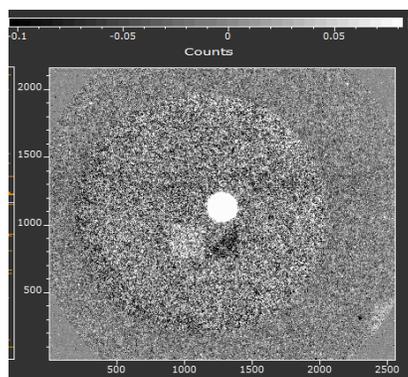
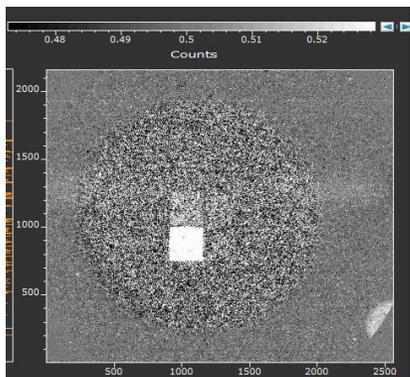


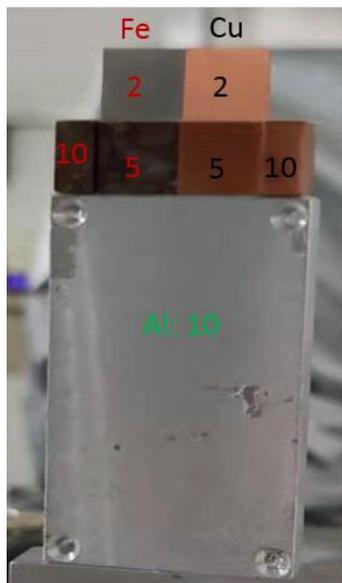
W

In

Ag

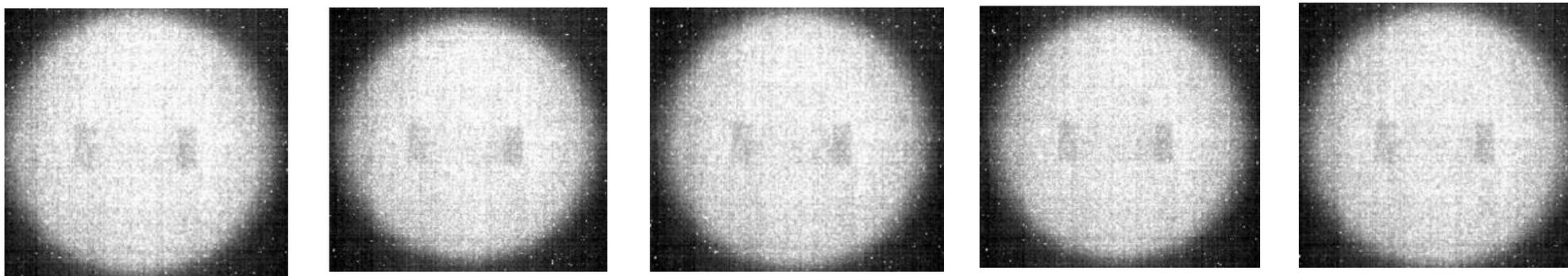
Au



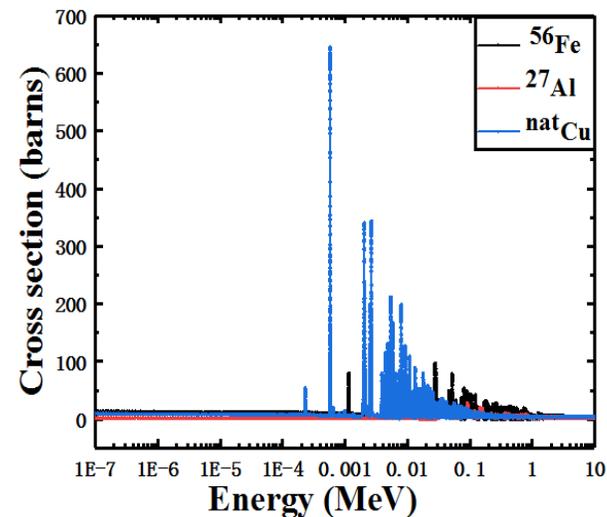


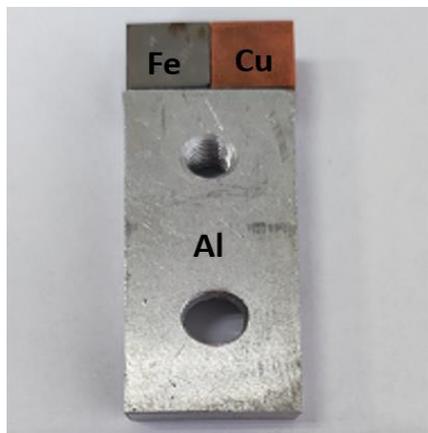
实验样品
(数值代表厚度mm)

➤ 122.52~124.52是理论计算的最优时间窗口，实验中同时拍摄了前后4个峰宽范围内的图像

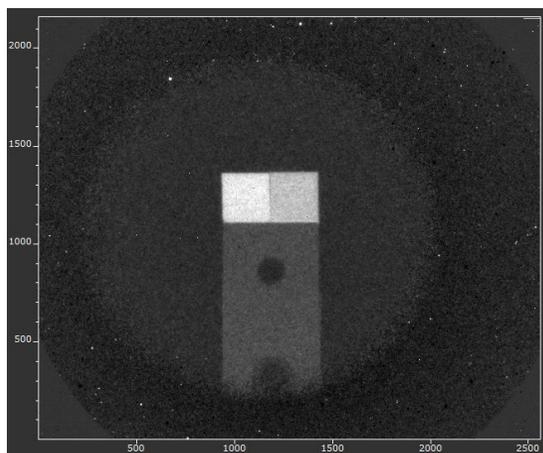
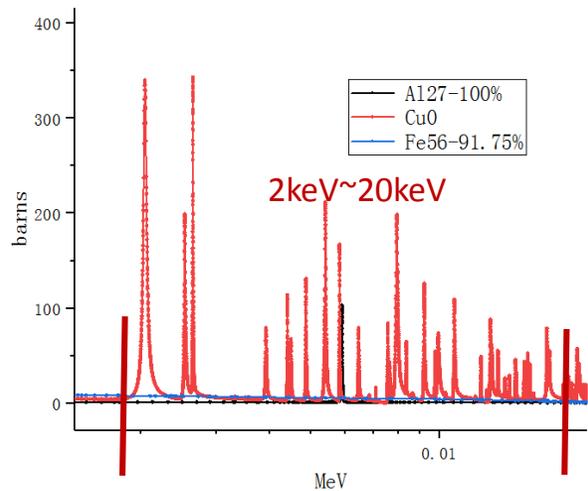


- 只能看到10mm的样品；5mm和2mm的样品不可见；
- 共振区和非共振区的成像结果基本没有差异，无法共振检出Cu；
- 样品成像不清晰原因分析：
 - 反应截面小；时间窗口短，中子探测效率低，共振区和非共振区的成像差异较小，导致共振区和非共振区数据相减后可能被噪声淹没；

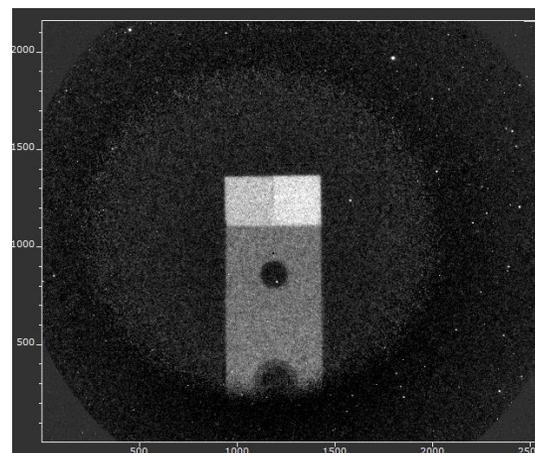




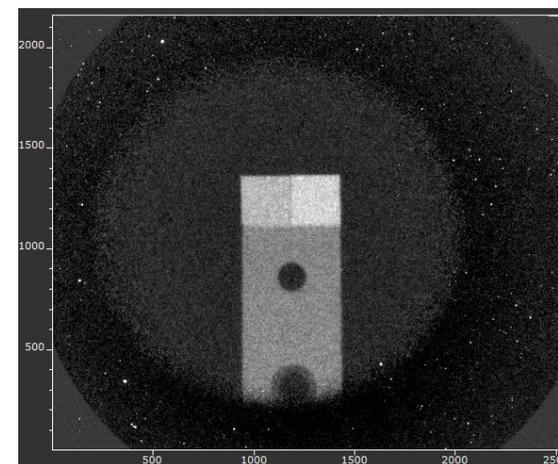
反应截面相对大小	延迟(μs)	时间窗宽度(μs)	能量区间
$\text{Al} < \text{Cu} < \text{Fe}$	600	5000	1~100eV
$\text{Al} < \text{Cu} > \text{Fe}$	40	85	2keV~20keV
$\text{Al} \sim \text{Cu} \sim \text{Fe}$	2.8	13.8	0.1MeV~2MeV



亮色为Fe



亮色为Cu

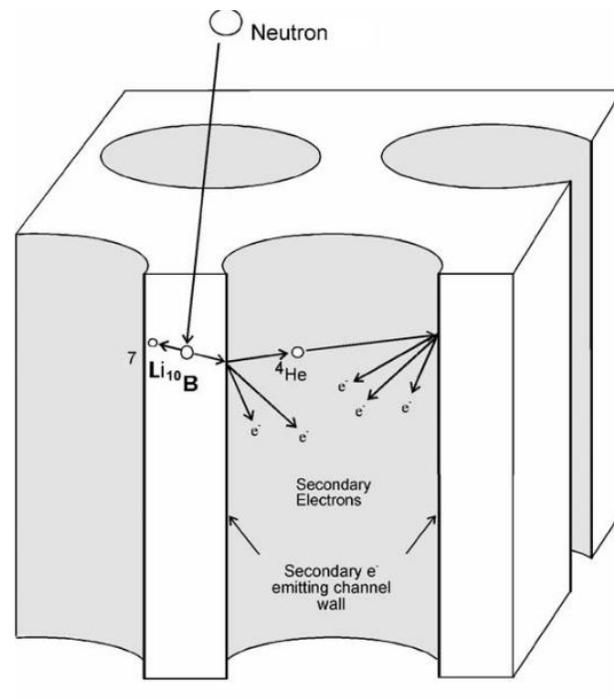
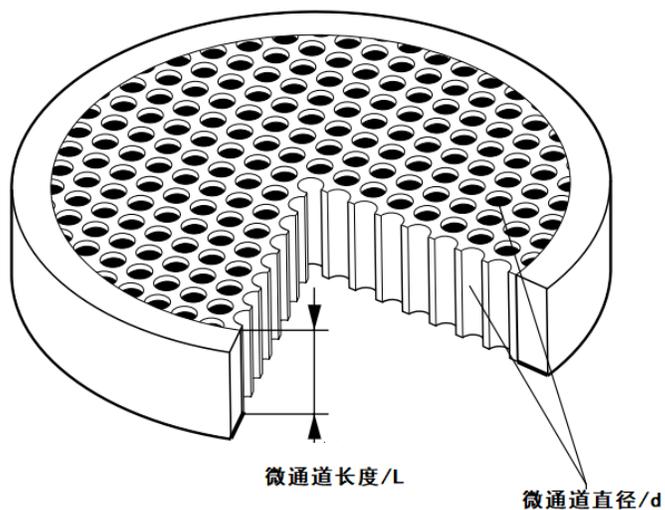


Al亮色差异最大



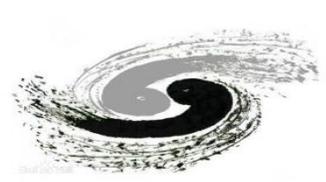
提纲

- CSNS反角白光中子源的束流特点
- 中子共振成像的蒙卡模拟
- 基于快门CMOS相机的中子共振成像实验
- **基于含硼微通道板(B-MCP)的中子共振成像实验**
- 下一步工作计划

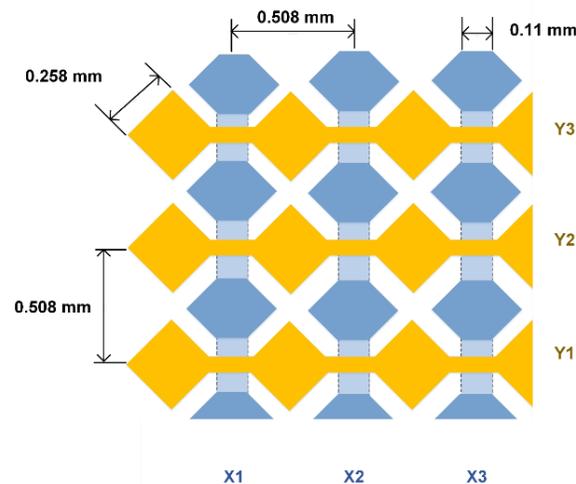
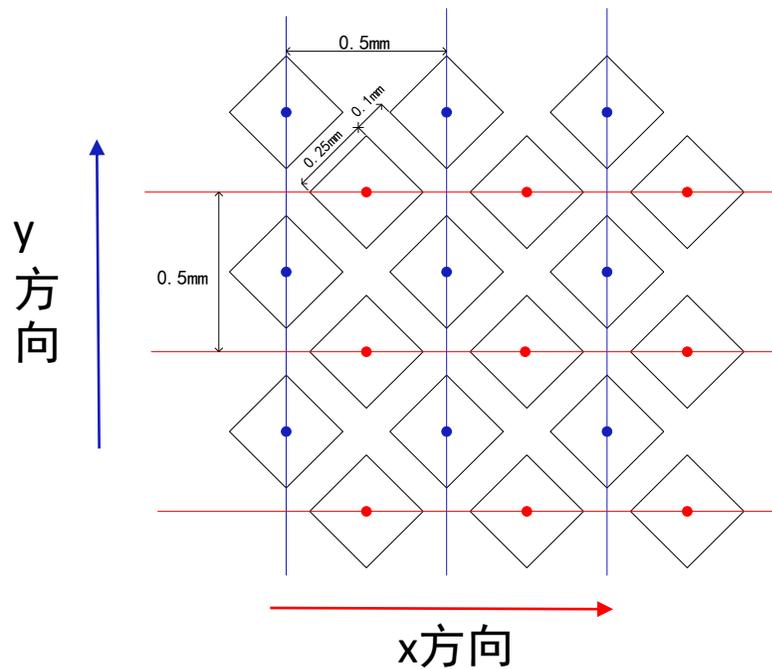
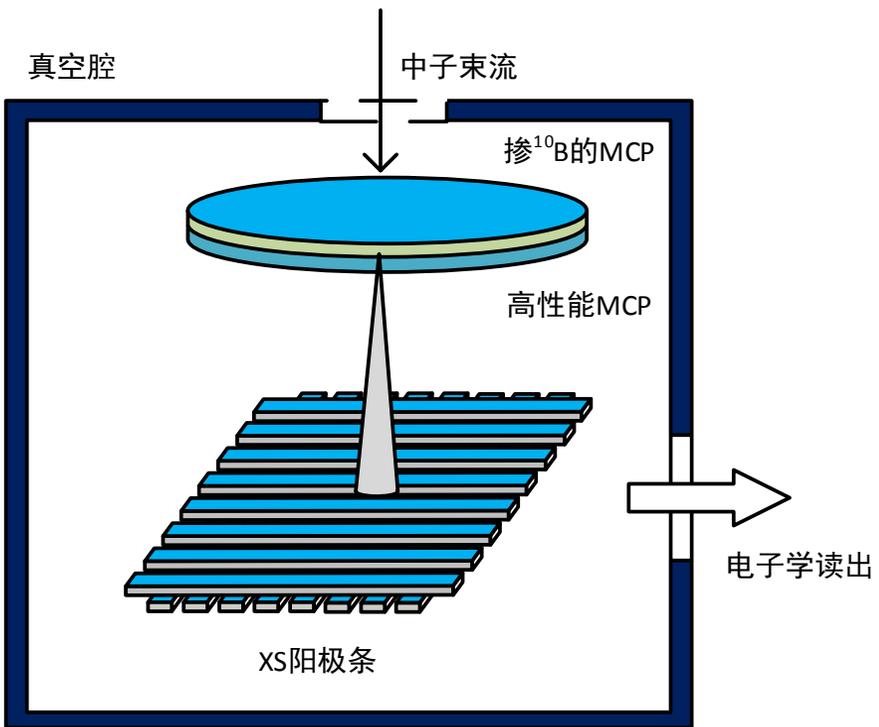


- 中子与核素 (^{10}B) 发生核反应生成带电粒子；
- 带电粒子进入孔道诱发二次电子产生；
- 二次电子在孔道内部电场作用下进行倍增

若原初电离2-3电子、增益 10^5 ，阳极收集到电荷约**数十fC**



中子敏感MCP+XS阳极条



- **128*128路电子学读出 (等效上万像素)**
- **阳极条宽0.5mm, 利用电荷重心法位置分辨好于百微米**
- **响应时间: ns量级**



- 测试条件与参数:

- ▶ 响应时间窗: T0信号之后6 μ s至20ms

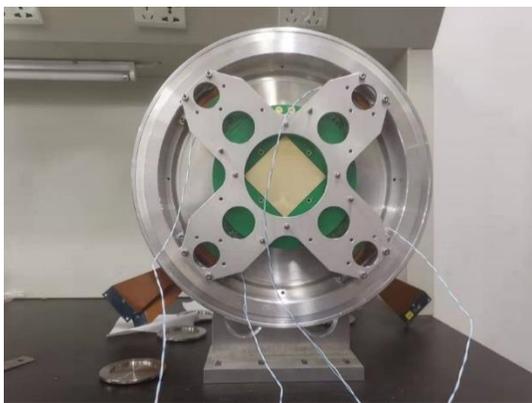
- ▶ 真空度: 约为 $3e-5$ Pa

- ▶ MCP高压: 2000V

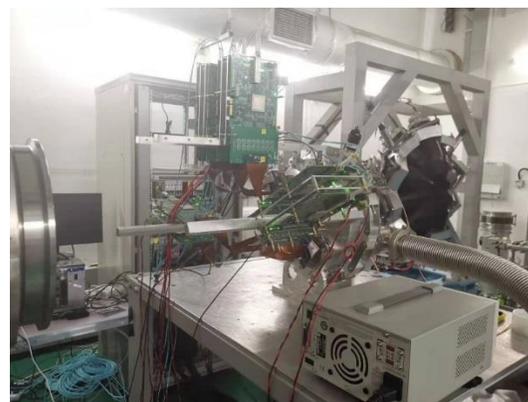
- ▶ 开关孔径: 12

- ▶ 准直器1孔径: 15

- ▶ 准直器2孔径: 40

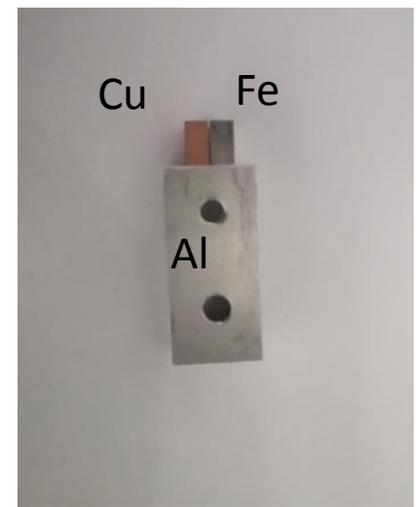
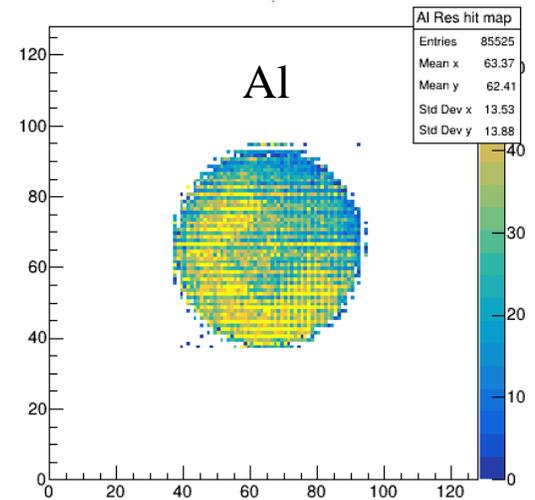
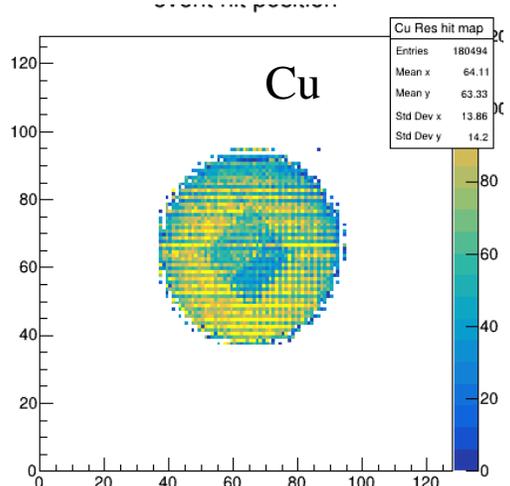
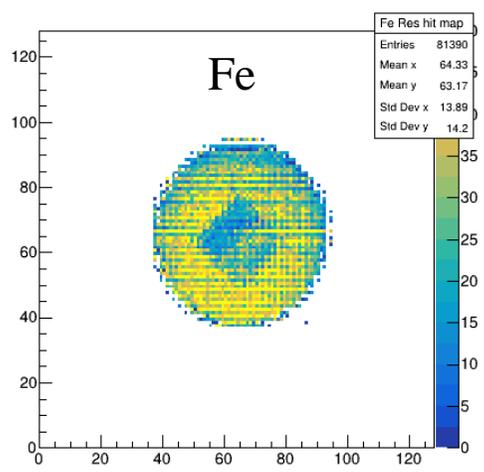
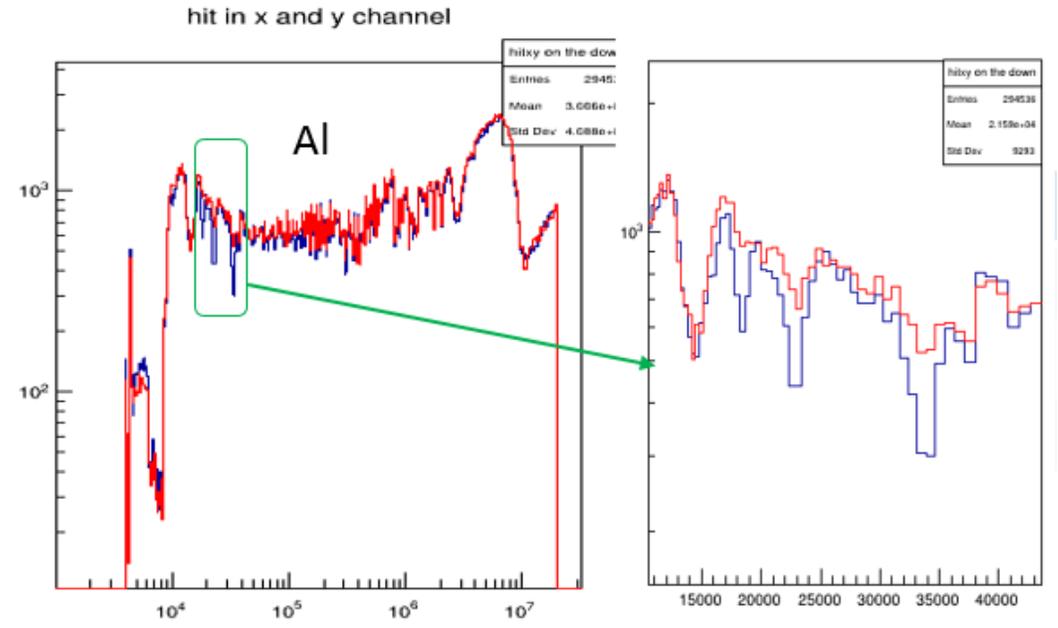
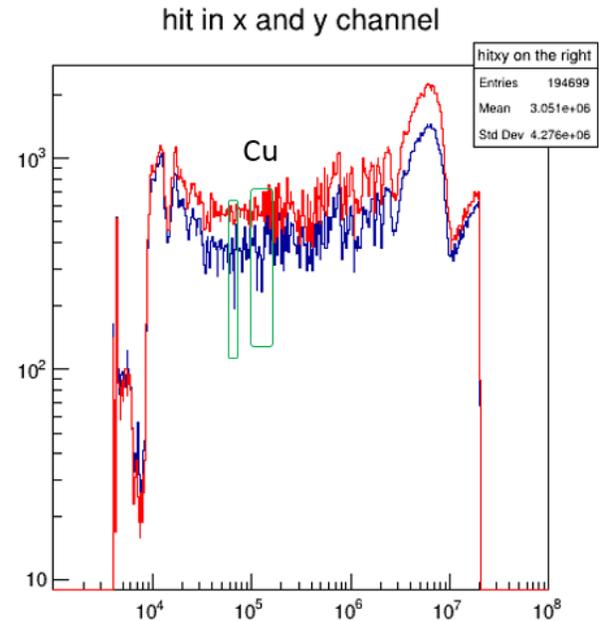
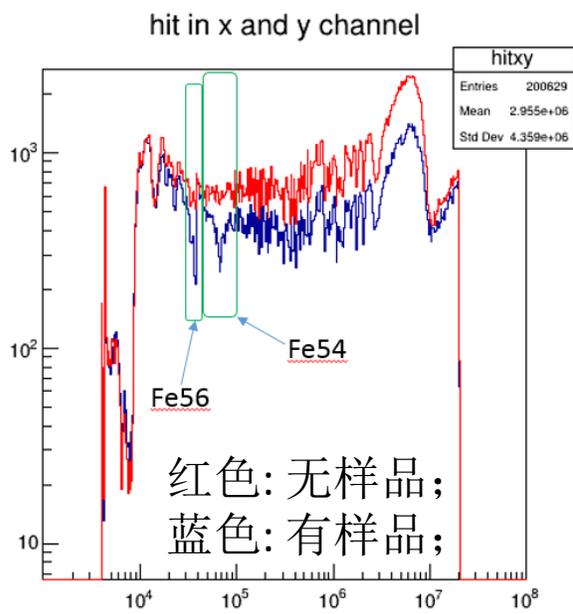
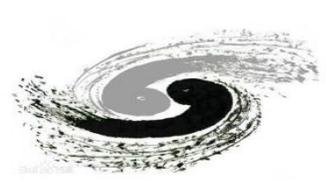


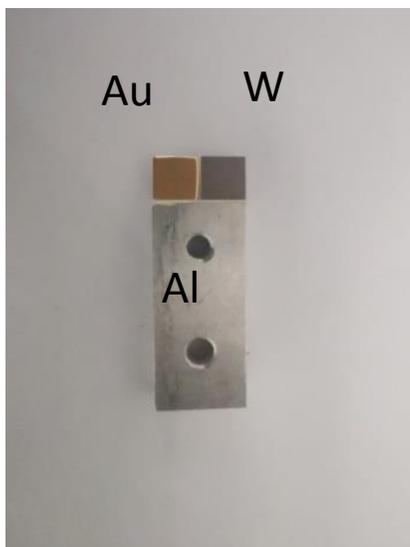
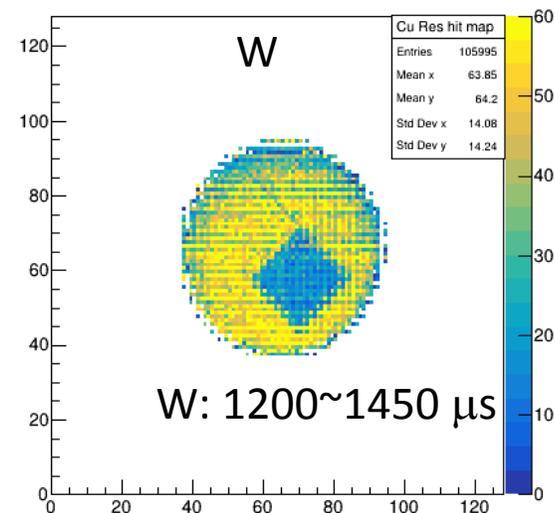
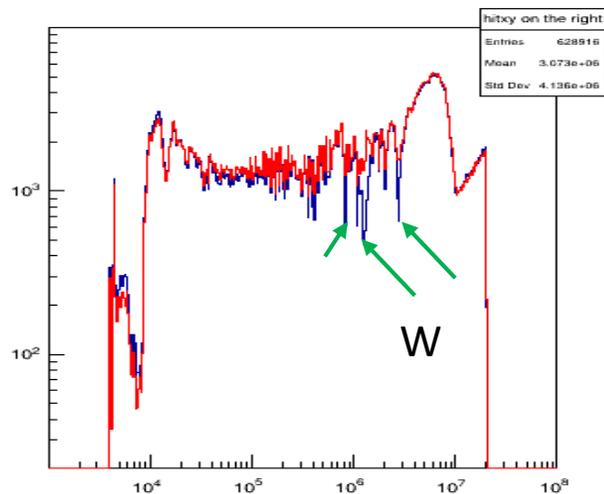
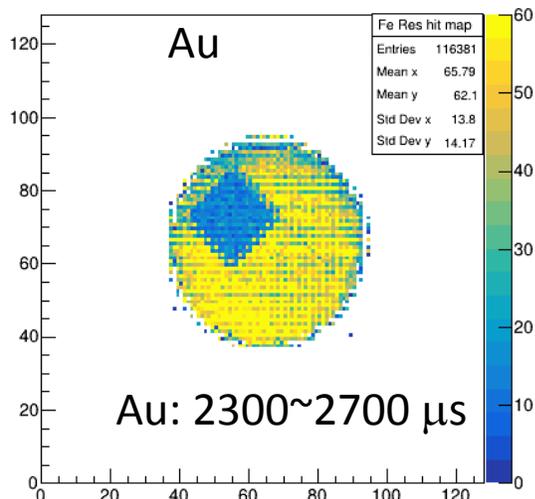
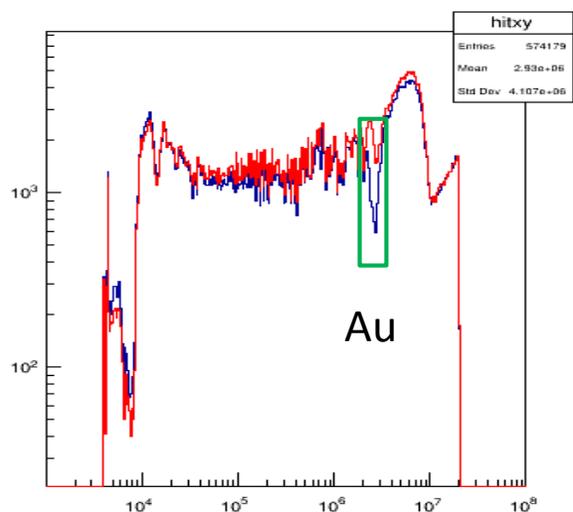
阳极板安装图



测试现场

- MCP电子学总共8块ADM板, 每块板有32个通道, 即共有256个通道(128个x通道和128个y通道);





- Au, W的反应截面大($>10^4$ barns), 中子吸收峰较明显(无样比有样的比值 ~ 3), 因此Au, W的共振检出效果较好;
- Cu, Fe的反应截面约300 barns, 中子吸收峰较明显(无样比有样的比值 ~ 2.3), 共振检出基本可以检出各自的核素位置;
- Al的反应截面小(20~30 barns), 中子吸收峰不明显(无样比有样的比值 ~ 1.8), 共振检出效果不好;



➤ 下一步工作计划

- 在模拟中考虑闪烁体发光后，照相机的光收集过程对共振成像的影响；
- 基于Back-n中子能谱，将噪声考虑在内时，给出不同能区核素分析的能力(厚度)以及不同核素清晰成像时照相机快门时间的选择；
- 对比模拟结果，分析寻找CMOS相机无法共振检出keV能区的原因；
- 测试改进后的MCP读出电子学，尝试不同厚度的中子共振成像；