

CSNS白光源上的伽马-分能中子成像

严小松

羊奕伟, 杨鑫, 李强, 谭志新

核物理与化学研究所
高能物理研究所
东莞散列中子源

责任 执行 创新 卓越
自主创新 军民融合 三元发展
建成在核科技领域有重要影响力的研究所

提纲

一. 背景

二. 实验条件

三. 实验结果

四. 中子成像的透射分析

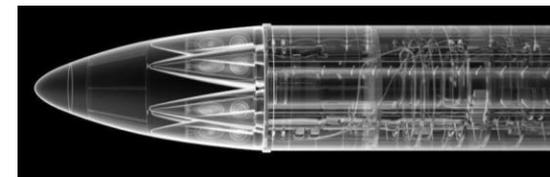
五. 小结

一. 背景

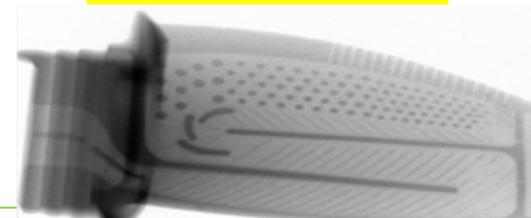
- 无损检测技术在工业制造和国防工业中扮演着重要的角色。

X/γ射线透射成像是目前主要的最成熟的无损检测技术

- ✓ 对高Z物质敏感；
- × 对高Z材料穿透能力弱；
- × 对低Z物质不敏感；
- × 缺乏对物质的识别能力



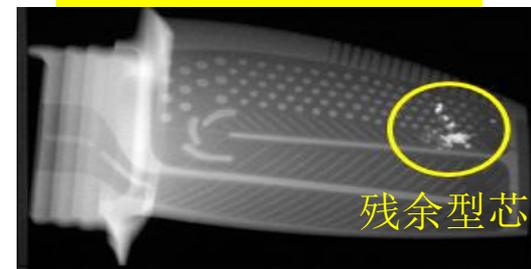
核弹头内的结构



飞机发动机的叶片

中子透射成像技术快速发展，能起到重要作用

- ✓ 对低Z材料敏感；
- ✓ 对高Z材料具有较强的穿透能力；
- ✓ 具备同位素甄别能力；



残余型芯

在一套系统中将X/γ射线成像与中子成像技术结合，综合优势，可极大的增强无损检测能力

一. 背景

• 超热共振能区 [eV 10keV] 中子分能中子与共振中子成像

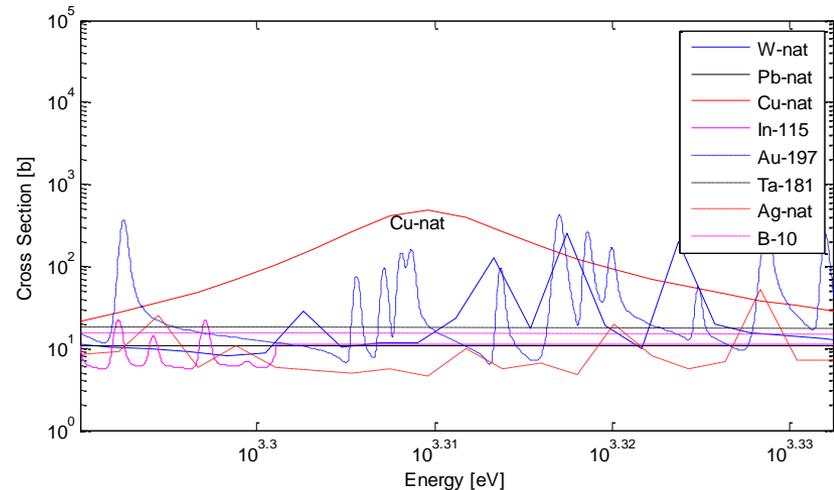
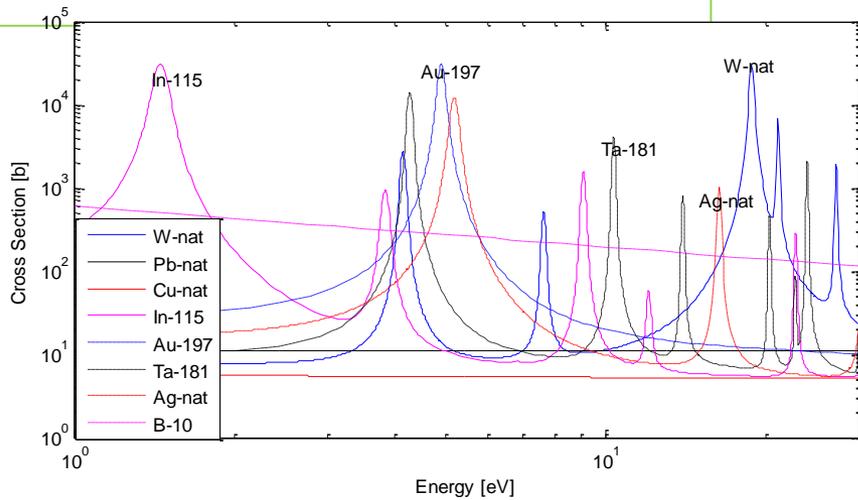
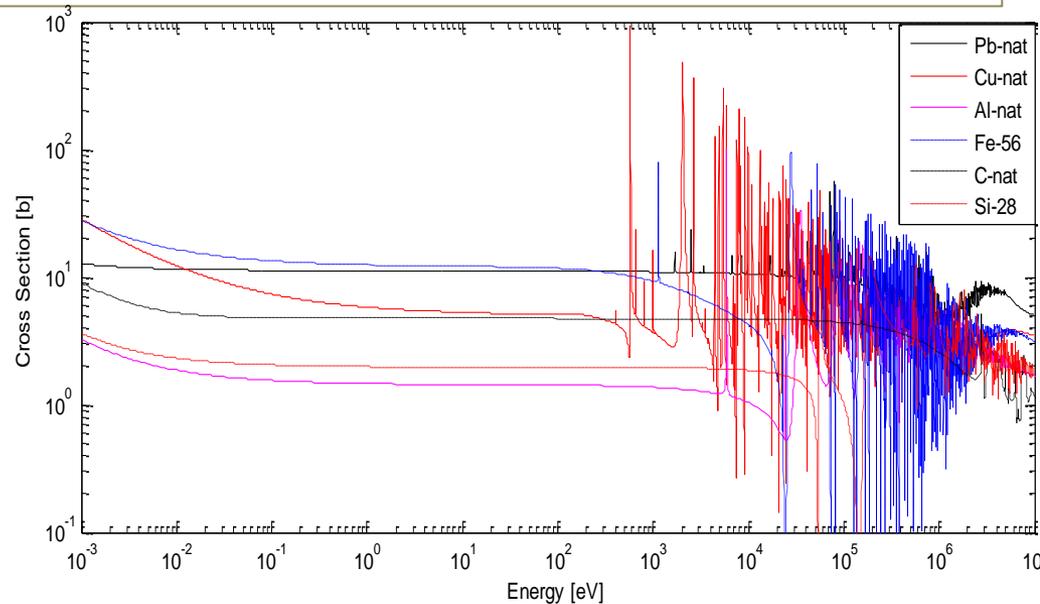
✓ 中子穿透能力强

对工程材料的非共振截面与~MeV快中子截面相当([1 10]b), 明显低于热中子截面, 穿透能力强

✓ 中子成像探测效率高、分辨率高

能量较低, 在探测器中射程短, 探测效率高, 空间分辨率高

✓ 同位素与元素识别能力



二、实验条件

- 束流参数

白光源厅2距靶76.4m, 50kW双束团

伽马 1.8 MeV $0.9E6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

中子 1MeV $3.5E6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

- ANDOR new istar ICCD

预设TOF (伽马拾取&中子能量筛选)

多脉冲数据累积存储

循环水冷 -35°C

- 闪烁体

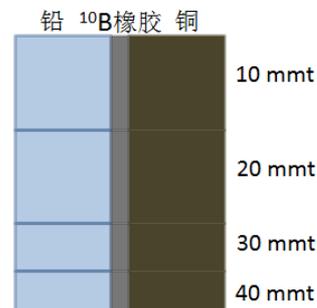
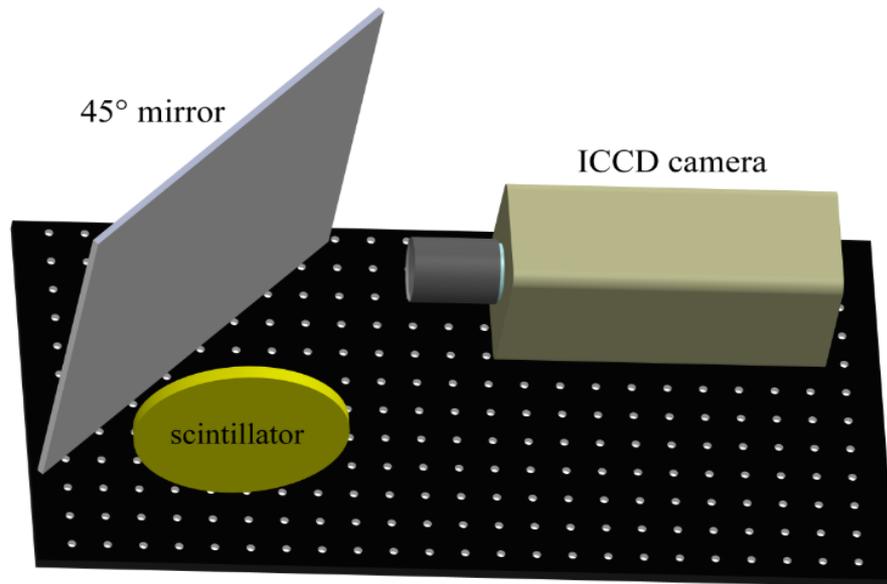
伽马: $\phi 70\text{mm} \times 3\text{mm}$ LYSO

中子: $\phi 70\text{mm} \times 450\mu\text{m}$ 6Li-ZnS

- 实验样品

台阶样品 (铅/10B橡胶/铜)

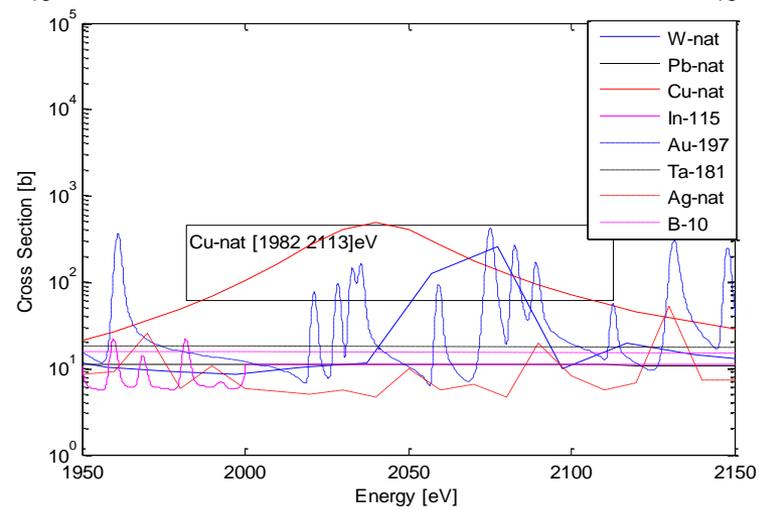
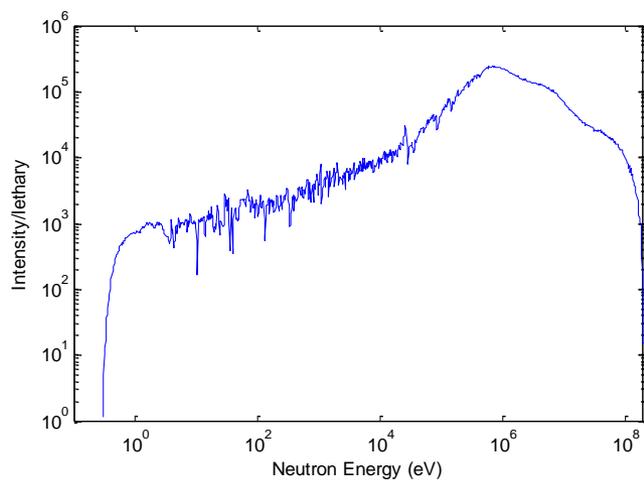
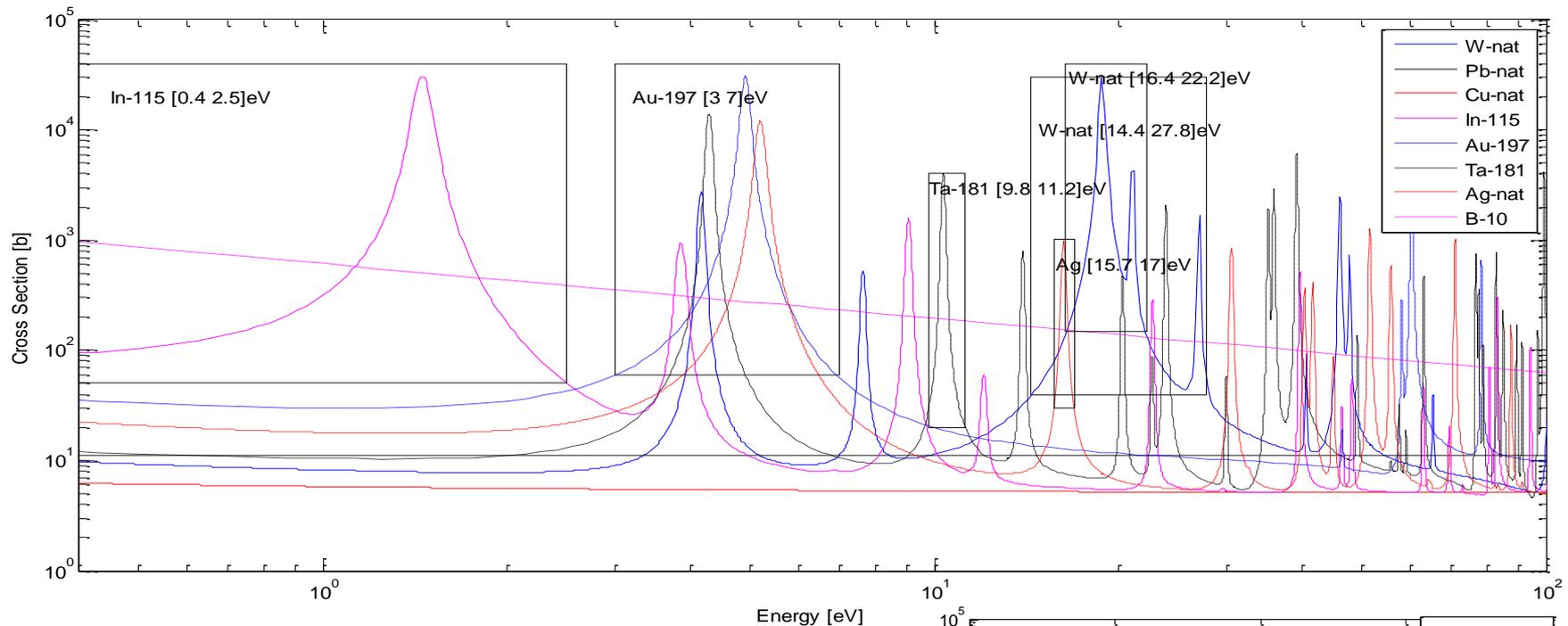
阵列样品 (铅/10B橡胶/铜/金/银/钽/钨/铀)



1mmt ^{10}B 橡胶		3mmt Cu	4mmt Pb
1mmt Cu	1mmt In	2mmt ^{10}B 橡胶	3mmt Pb
1mmt Ag	1mmt W	2mmt Au	2mmt Ta
1mmt Ta	1mmt Au	2mmt W	2mmt Ag

二、实验条件

分能中子与共振中子成像能量选择



三、实验结果

□ 台阶样品

- 伽马照相

快速、信噪比高；

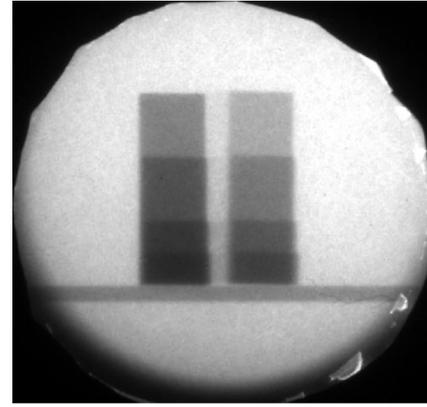
凸显高Z材料；

穿透厚低Z材料；

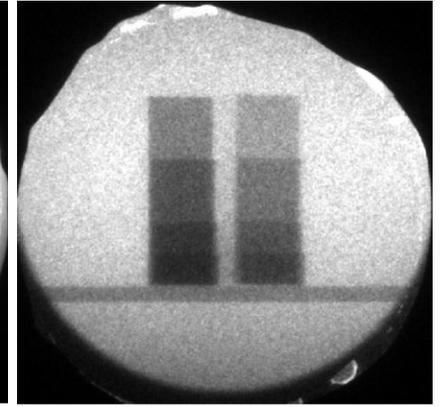
ZnS闪烁体也能用于伽马照相

- 分能中子照相

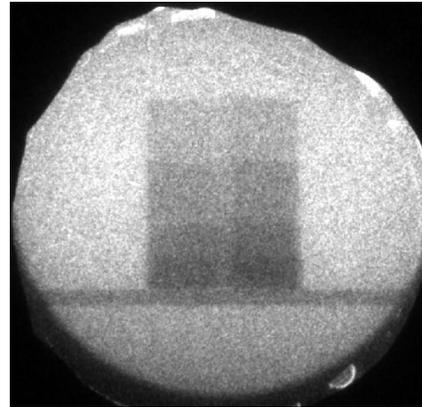
不同对比度显示低Z (^{10}B) 材料



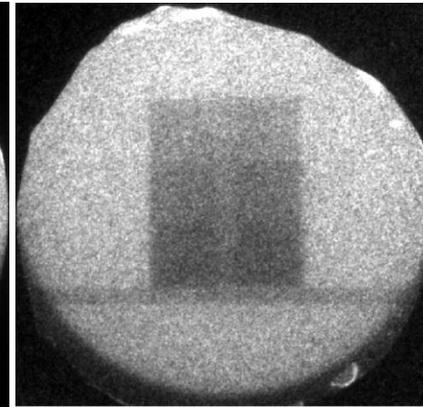
LYSO
伽马



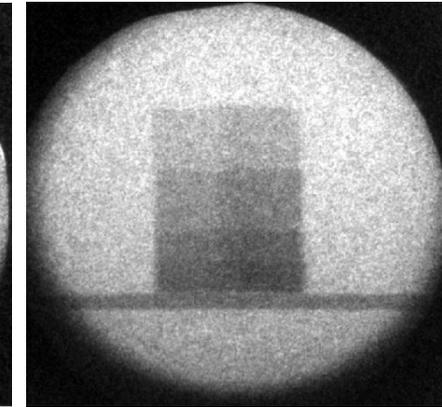
6Li-ZnS
伽马



6Li-ZnS
>250keV 中子



6Li-ZnS
[30eV 250keV] 中子



6Li-ZnS
[1eV 1MeV] 中子

三、实验结果

阵列样品

- 伽马照相

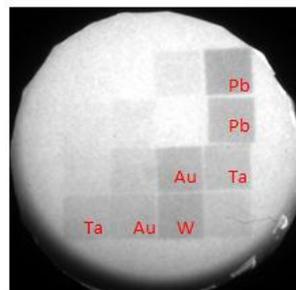
快速显现厚高Z材料；

- 共振中子照相

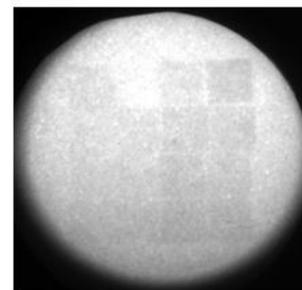
识别 ^{115}In 、 ^{197}Au 等同位素；

不同对比度显示低Z (^{10}B) 材料；

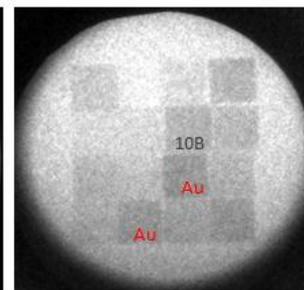
对W、Ta、Cu等显现不佳



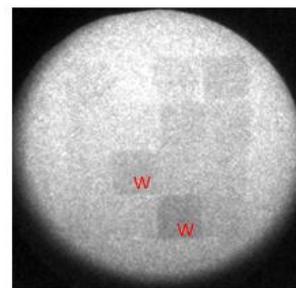
LYSO
伽马



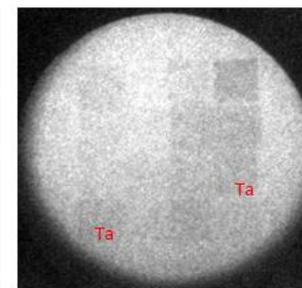
6Li-ZnS
[1eV 1MeV]中子



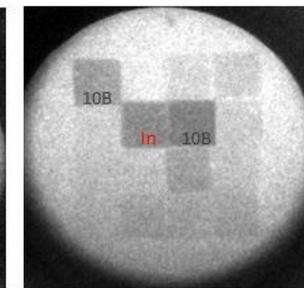
6Li-ZnS
[3 7]eV Au共振



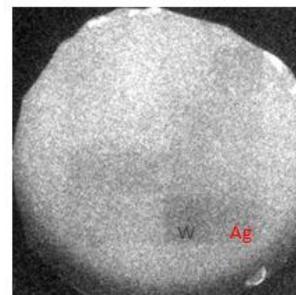
6Li-ZnS
[14.4 27.8]eV W共振



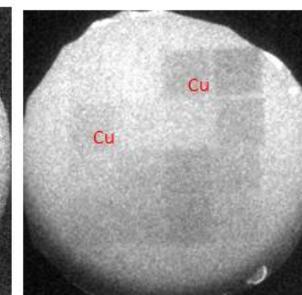
6Li-ZnS
[9.8 11.2]eV Ta共振



6Li-ZnS
[0.4 2.5]eV In共振



6Li-ZnS
[15.7 17]eV Ag共振



6Li-ZnS
[1982 2113]eV Cu共振

三、实验结果

□ 台阶+阵列样品

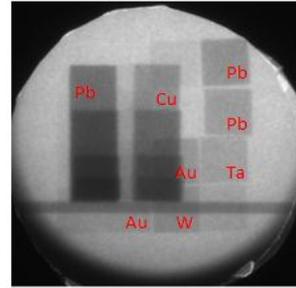
模拟关心样品被遮挡的情况

- 伽马照相

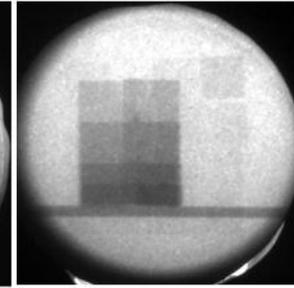
快速显现厚高Z材料；
穿透低Z材料；

- 共振中子照相

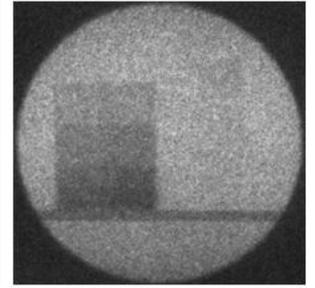
显现与识别厚屏蔽后的薄材料；
识别¹¹⁵In、¹⁹⁷Au、W等同位(核)素；
不同对比度的显示低Z (¹⁰B) 材料；
对Ta、Cu等显现不佳



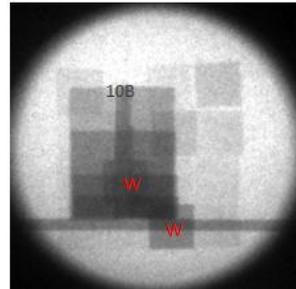
LYSO
伽马



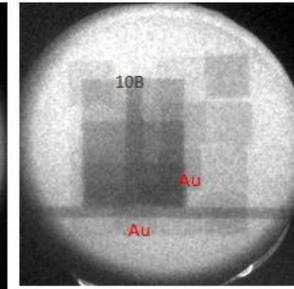
6Li-ZnS
>1eV 中子



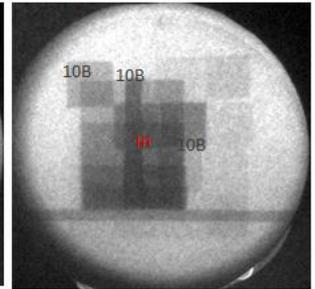
6Li-ZnS
[100eV 10keV]中子



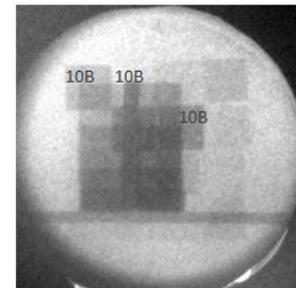
6Li-ZnS
[16.4 22.2]eV W共振



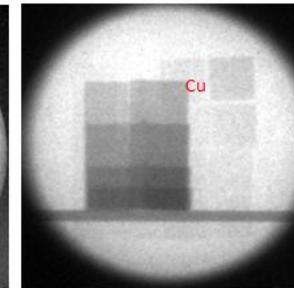
6Li-ZnS
[3 7]eV Au共振



6Li-ZnS
[0.4 2.5]eV In共振



6Li-ZnS
[0.1 2]eV 中子



6Li-ZnS
[1960 2160]eV Cu共振

四、中子成像的透射分析

厚度为 d_{det} 的探测器测量厚度为 d_m 的材料 m 的成像的透射率 Tr_m 计算为：

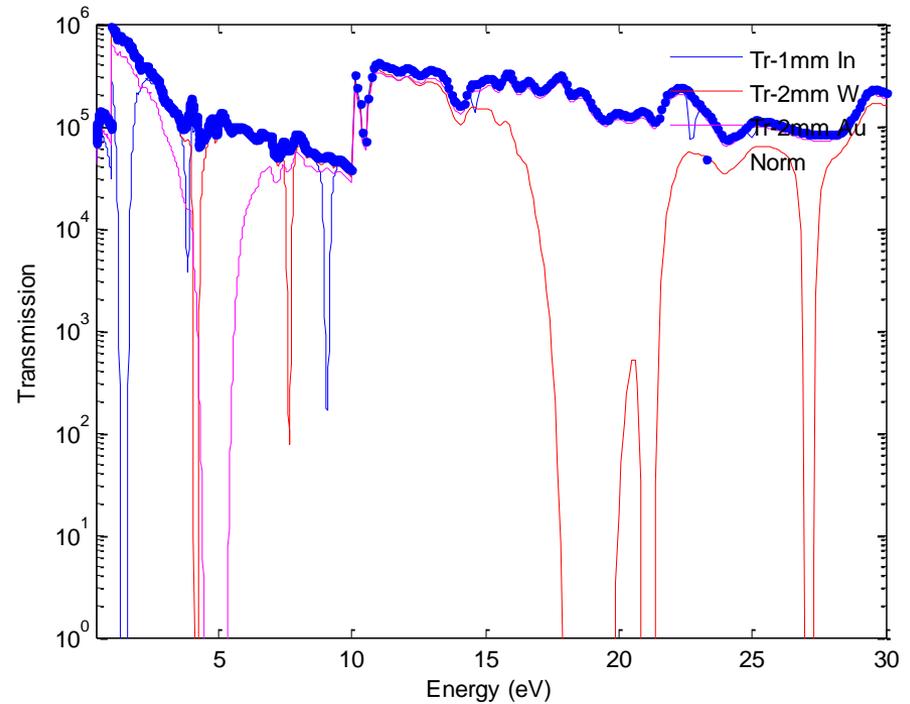
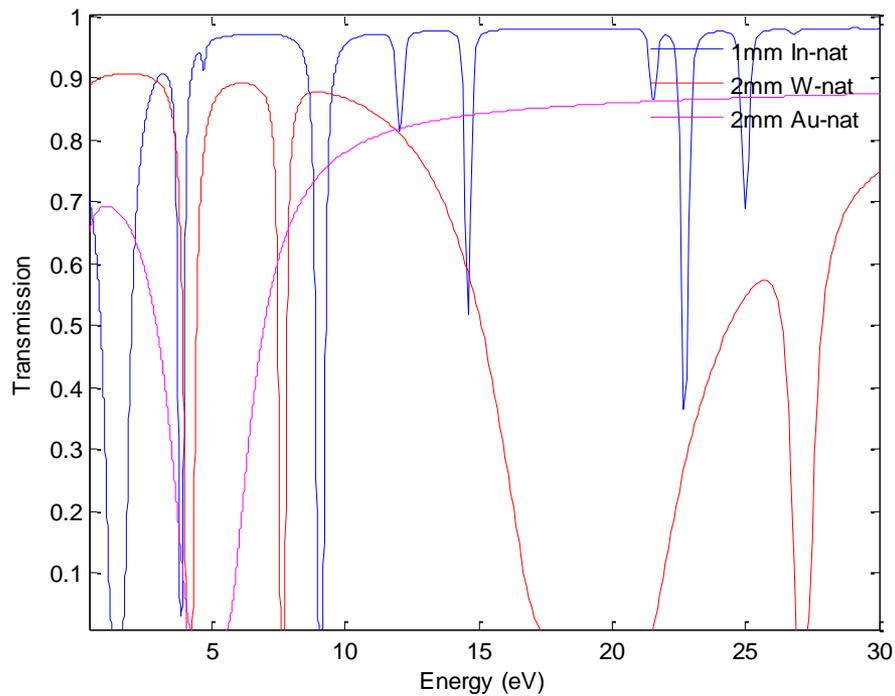
$$Tr_m = \frac{\int_{E_{\text{low}}}^{E_{\text{high}}} \frac{dN}{dE} e^{-N_m \sigma_{E,m} d_m} (1 - e^{-N_{\text{det}} \sigma_{E,\text{det}} d_{\text{det}}}) dE}{\int_{E_{\text{low}}}^{E_{\text{high}}} \frac{dN}{dE} (1 - e^{-N_{\text{det}} \sigma_{E,\text{det}} d_{\text{det}}}) dE}$$

对于~eV能段的中子， $\sigma_{E,\text{det}} = \sigma_{E,6\text{Li}}$ ， $1 - e^{-N_{\text{det}} \sigma_{E,\text{det}} d_{\text{det}}} \approx N_{\text{det}} \sigma_{E,6\text{Li}} d_{6\text{Li}}$

$$Tr_m = \frac{\int_{E_{\text{low}}}^{E_{\text{high}}} \frac{dN}{dE} e^{-N_m \sigma_{E,m} d_m} \sigma_{E,6\text{Li}} dE}{\int_{E_{\text{low}}}^{E_{\text{high}}} \frac{dN}{dE} \sigma_{E,6\text{Li}} dE} = \frac{\sum_{E_{\text{low}}}^{E_{\text{high}}} e^{-N_m \sigma_{E_i,m} d_m} \sigma_{E_i,6\text{Li}} dN_i}{\sum_{E_{\text{low}}}^{E_{\text{high}}} \sigma_{E_i,6\text{Li}} dN_i}$$

- 对于单能中子，测量样品的透射图像，即可计算样品厚度；
- 对于连续谱中子，知道中子能谱，测量样品的透射图像，即可计算样品的厚度。

四、中子成像的透射分析



材料	能段	透射比
2mm In	0.4 eV -2.5 eV	0.3873
2mm W	14.4 eV -27.8 eV	0.2320
2mm Au	3 eV - 7 eV	0.1803

四、中子成像的透射分析

实验-计算比较

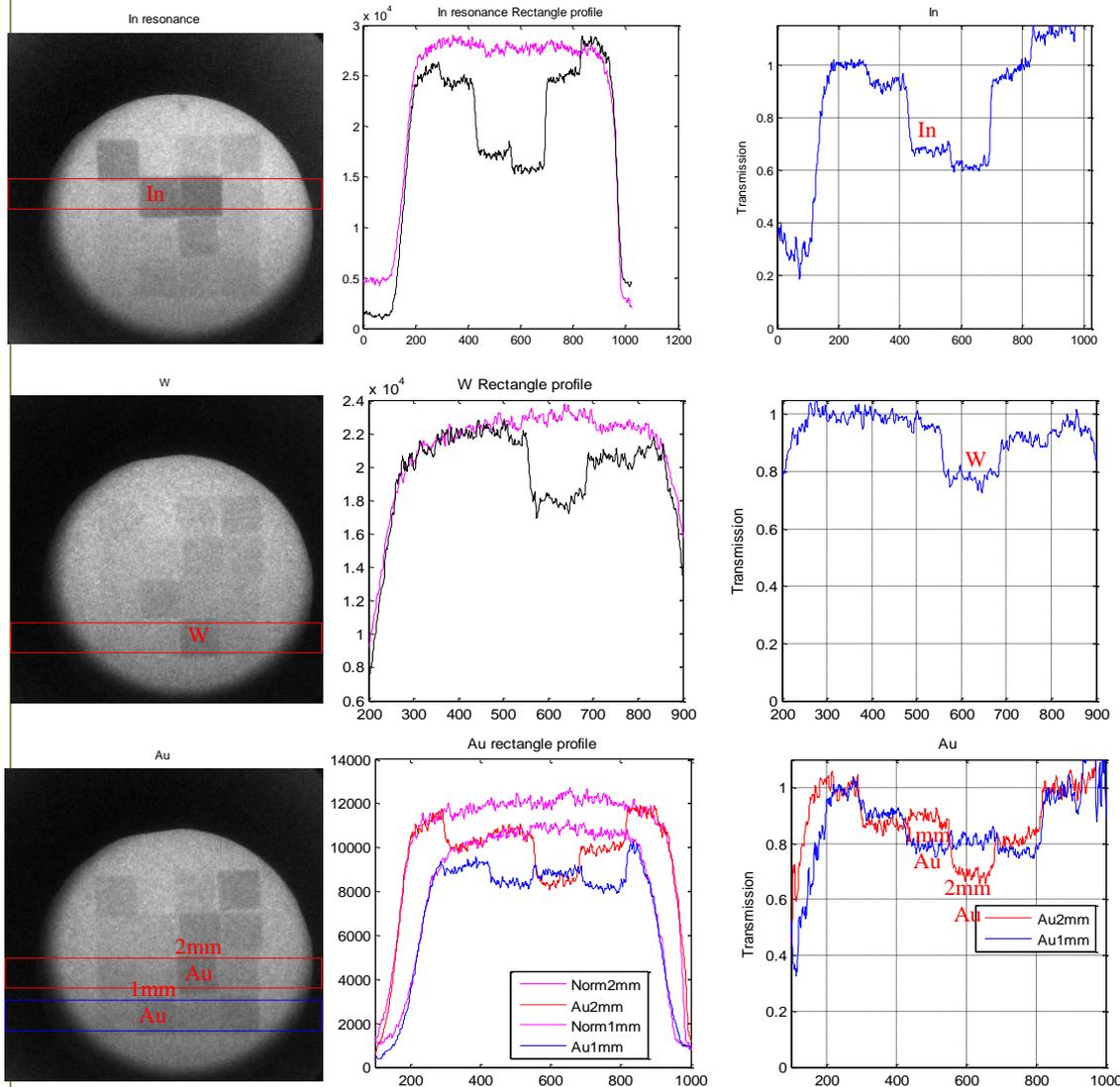
材料	实验透射值	计算透射值
2mm In	0.68	0.3873
2mm W	0.78	0.2320
2mm Au	0.69	0.1803

可能原因

- 本底扣除

CCD噪声、读数据噪声等

- 中子散射
- 统计涨落



五、小结

- 一套系统实现X/伽马射线成像与分能/超热共振中子成像
- X/伽马射线成像
 - 射线强度高，成像速度快，图像信噪比高；
 - 穿透厚低Z材料；
 - 凸显高Z材料；
- 分能/超热共振中子成像
 - 超热中子对工程材料具有较高的穿透能力与较好的空间分辨能力；
 - 分能成像能不同对比度的显示低Z材料，识别无共振峰的同位素；
 - 共振中子成像较好的识别了 ^{115}In 、 ^{197}Au 、W等同位(核)素。

50kW功率80m位置超热共振能区中子强度略低

选择共振峰内的能宽小时，成像时间长，图像信噪比差；

选择共振峰内的能宽大时，图像对比度差，同位素甄别能力差；
导致部分同位素(核素)的识别效果不佳，在后续的实验中

下一步计划

- (1) 数值模拟分析中子散射影响；
- (2) 100kW功率，在56m位置开展实验；
- (2) 优化能量选择、样品选择等实验条件。

谢谢！