



用于中子共振俘获分析的康普顿成像 探测系统研制

王金成，任杰，阮锡超，王维宇，孙振宇，曹平

内蒙古工业大学，理学院

中国原子能科学研究院，核数据重点实验室

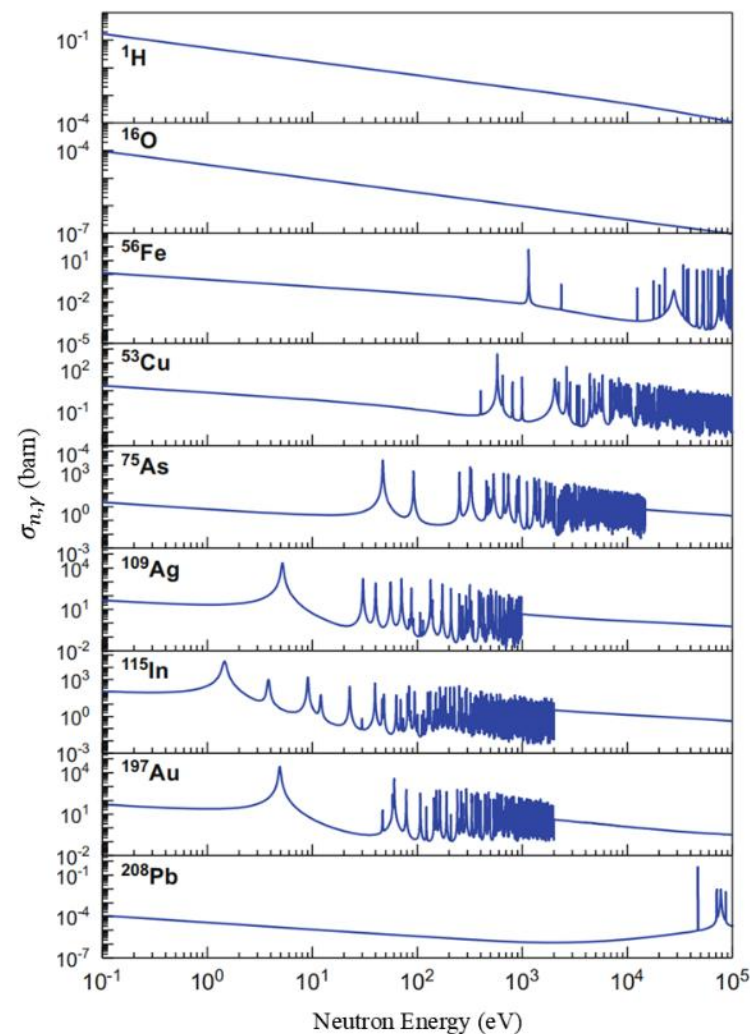
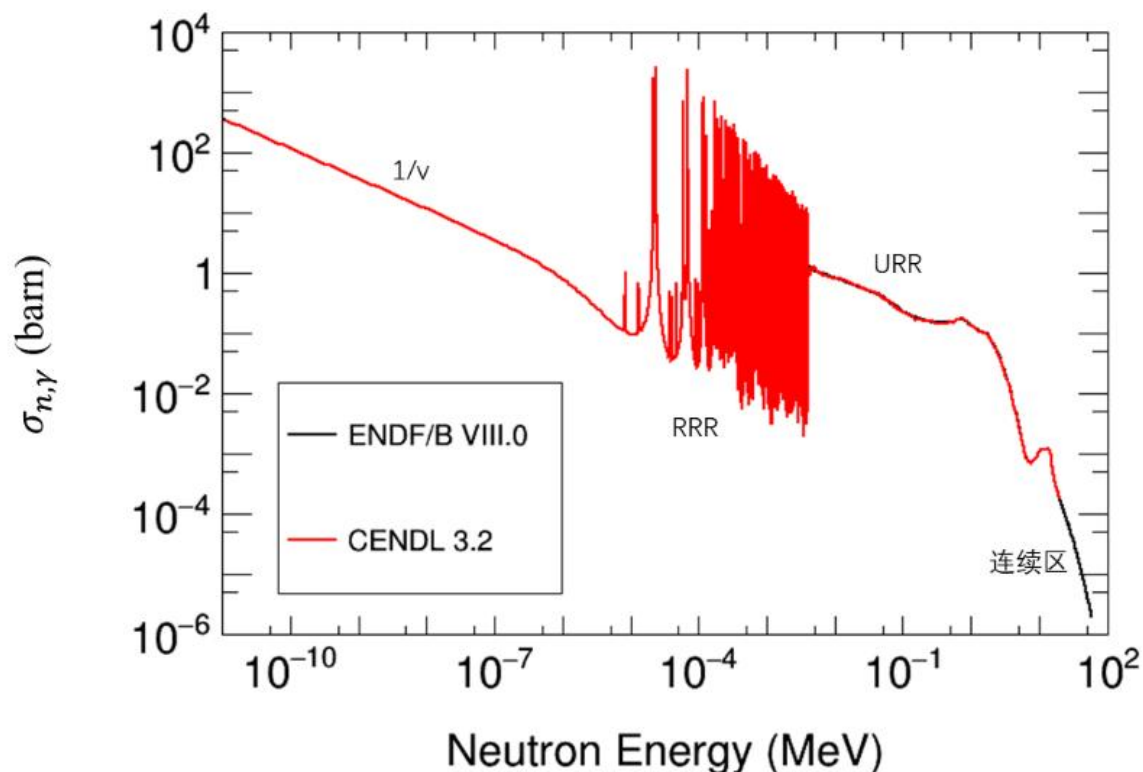
E-mail: wangjincheng@imut.edu.cn



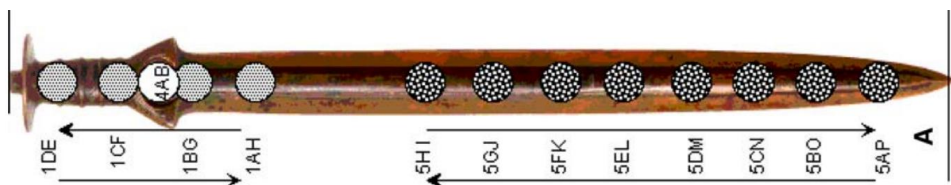
报告内容

- 1 研究背景
- 2 方法介绍
- 3 探测器测试
- 4 Back-n测试实验
- 5 总结与展望

中子共振俘获分析 (Neutron resonance capture analysis, NRCA)



考古： 主要涉及元素为Cu与Sn、Ag、In。



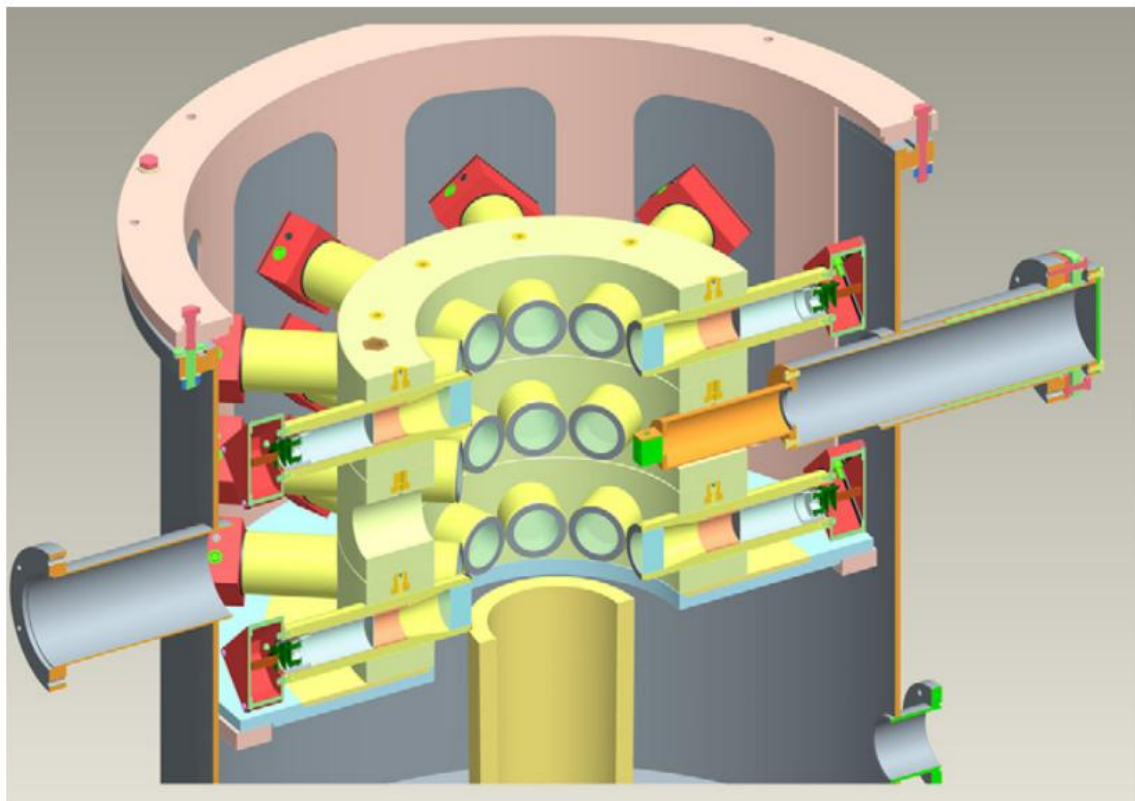
材料科学： 例如，稀土材料分析，主要涉及元素为Y、Pr、La、Ce、Nd和Sm等。



相较于传统分析方法（中子活化分析），NRCA技术具有以下不可替代性：

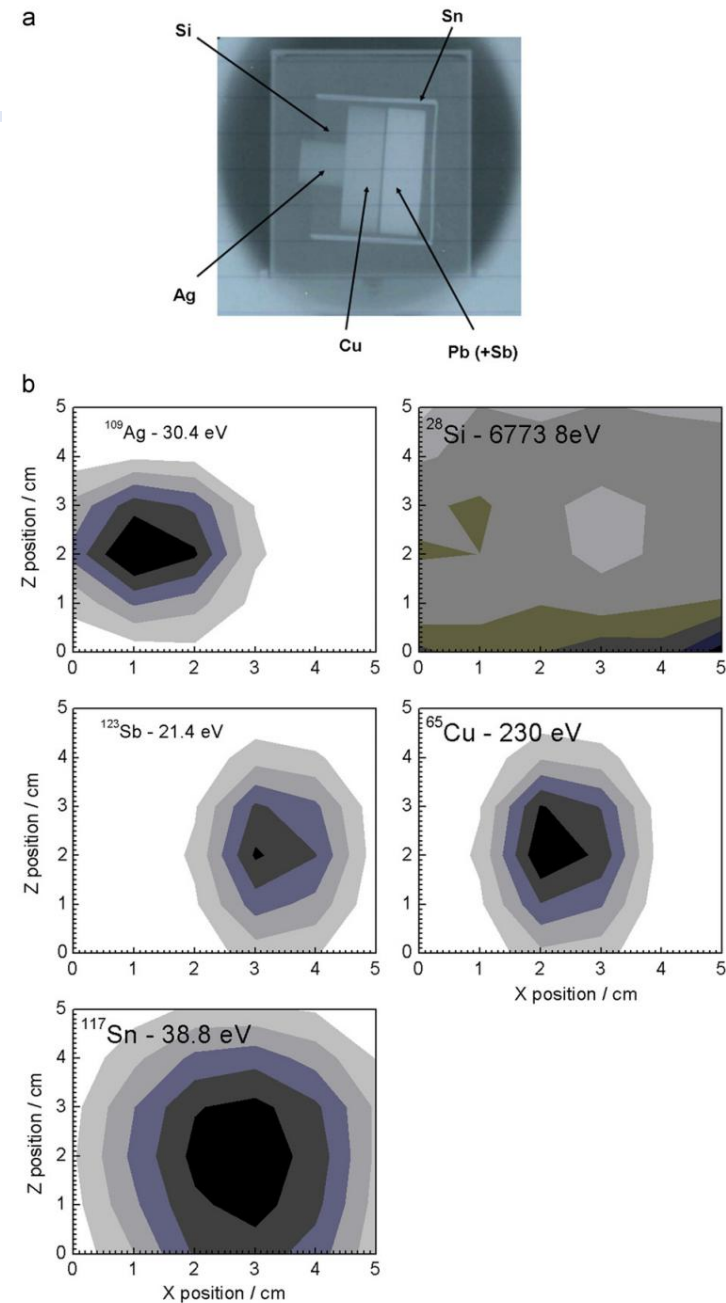
- 无损检测：无需样品制备，避免对文物或稀有材料的二次破坏；
- 同位素分辨能力：通过共振峰能量差异区分同位素（如 ^{63}Cu 与 ^{65}Cu ），为材料溯源提供更精细数据；
- 多元素同步分析：单次实验可覆盖轻、中、重核素，适用于复杂样品。

在NRCA测量过程中，增加成像能力---中子共振俘获成像（NRCI）

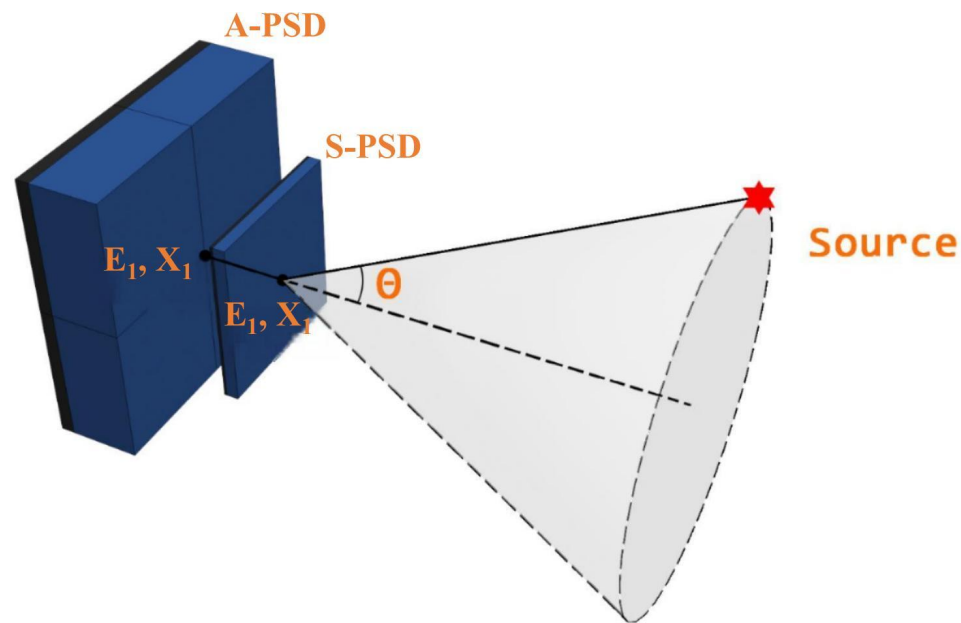
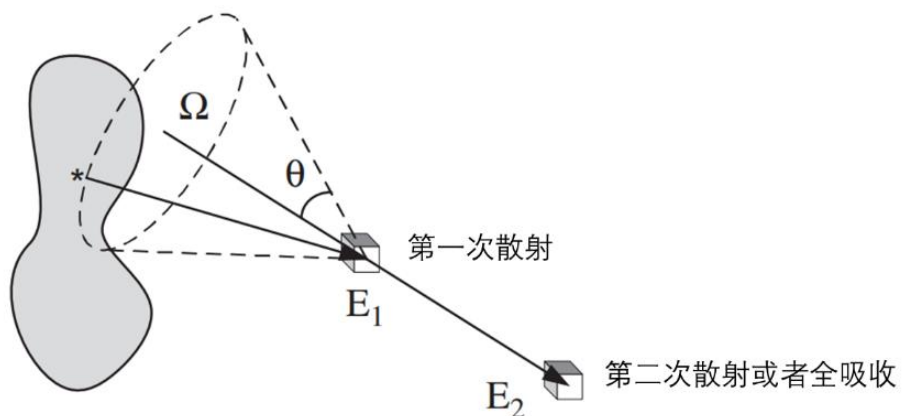


通过层析成像技术将NRCA发展为NRCI

References: E. Perelli Cippo, et al. A detector system for neutron resonance capture imaging



康普顿成像原理



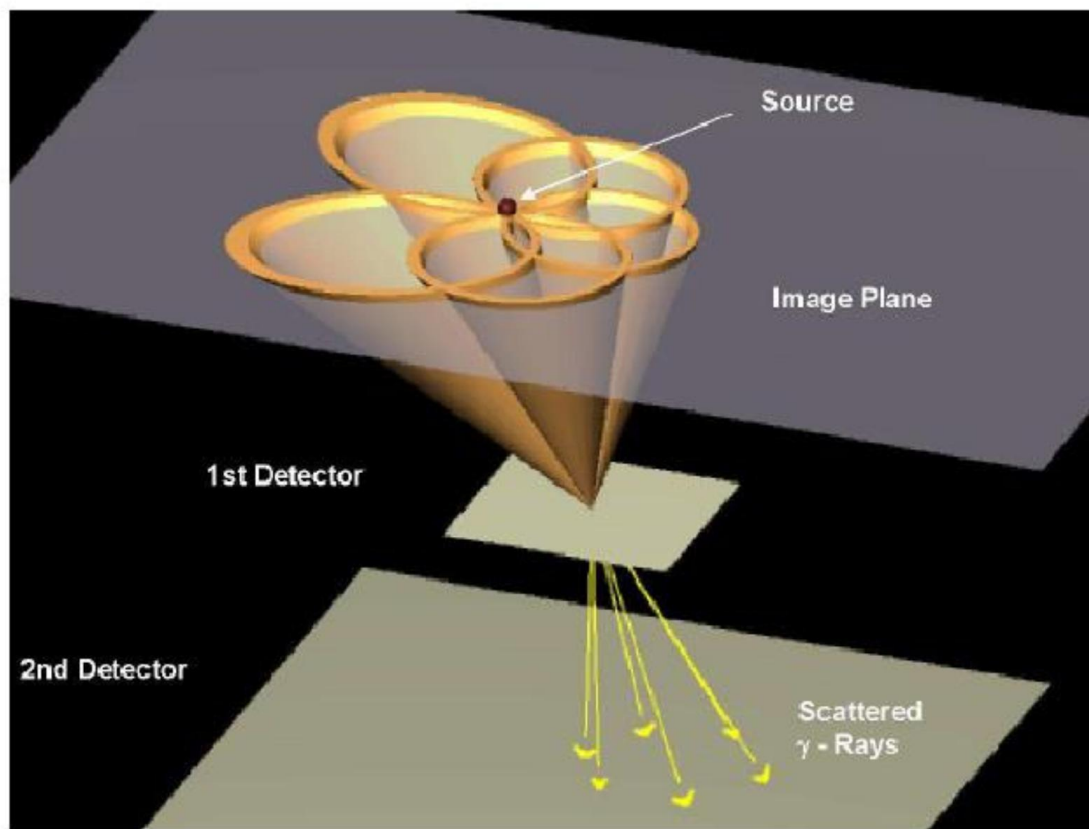
由康普顿散射原理，康普顿角表示为

$$\cos\theta = 1 - m_e c^2 \left(\frac{1}{E_g} - \frac{1}{E_2} \right)$$

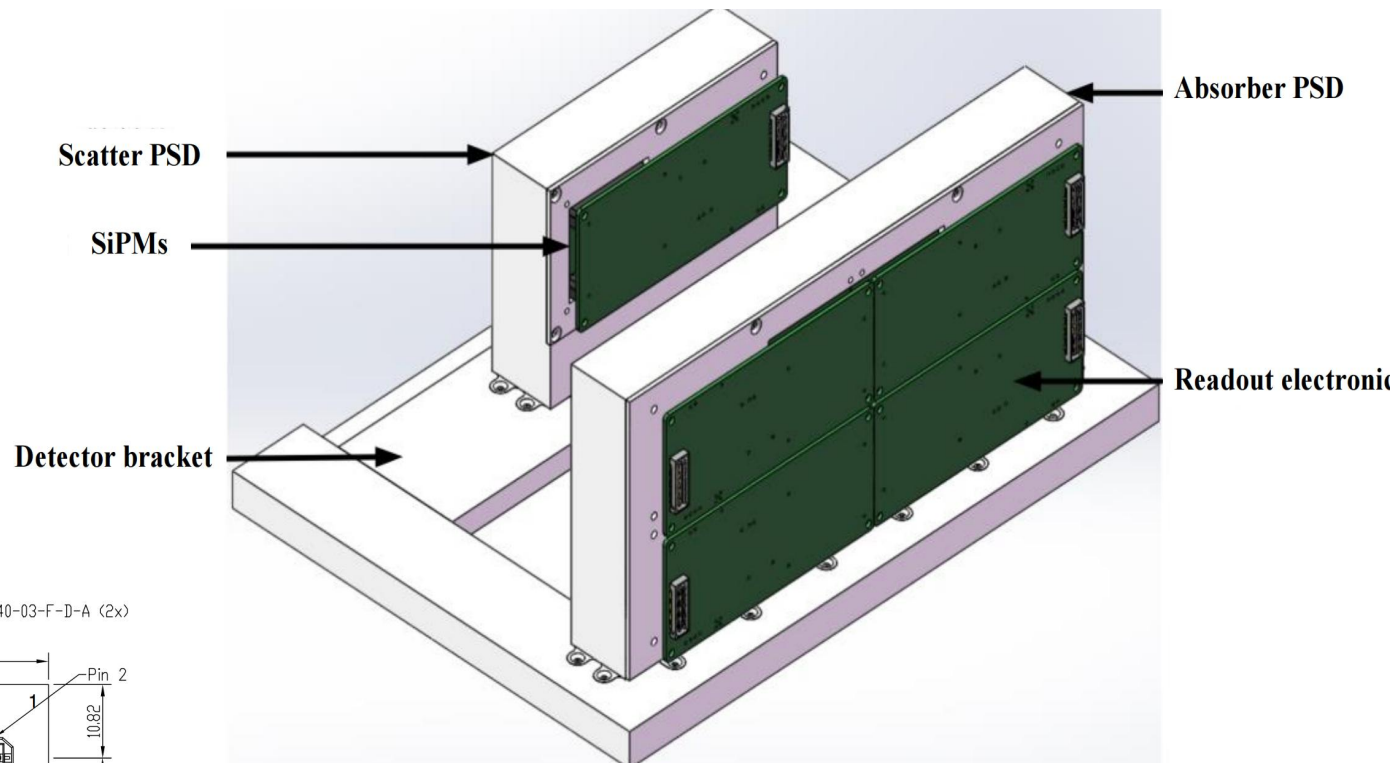
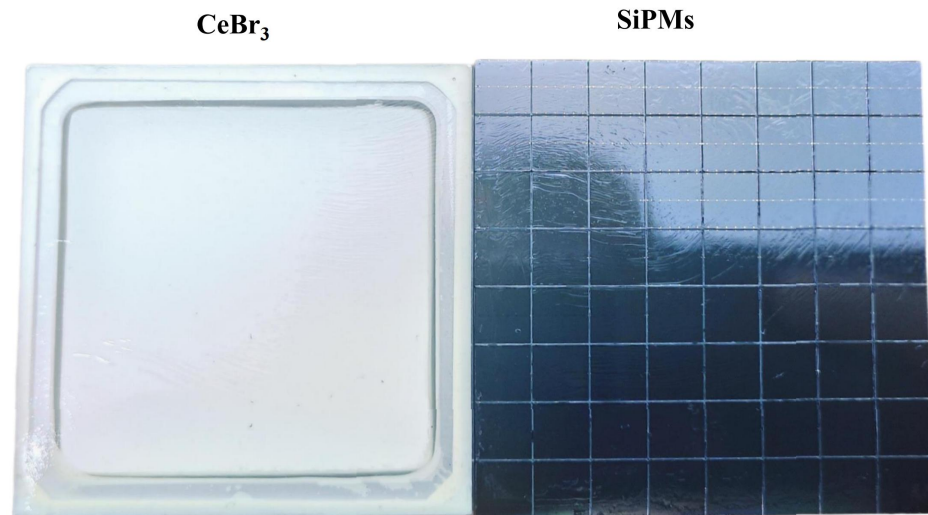
根据能量和位置信息计算康普顿锥，康普顿锥与样品所在平面交点的方程表示为：

$$[n_x(x - x_1) + n_y(y - y_1) + n_z(z - z_1)]^2 = \cos^2\theta [(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2]$$

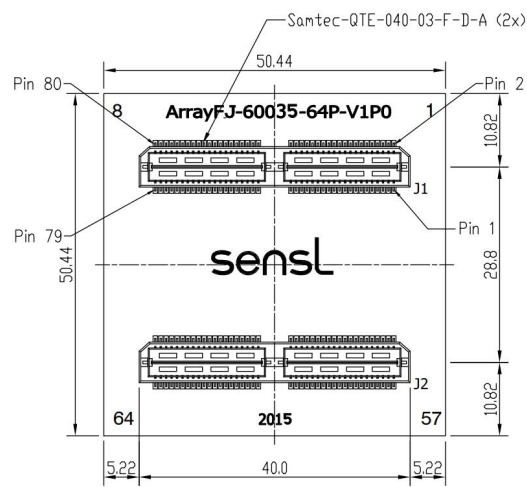
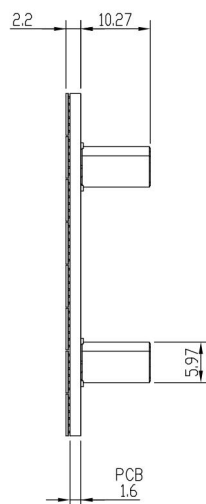
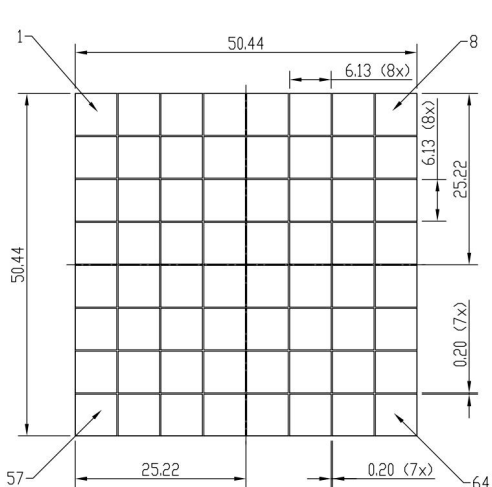
其中, n_x 、 n_y 和 n_z 是沿圆锥轴的单位向量的分量, x_1 、 y_1 和 z_1 是散射探测器相互作用的坐标, x 、 y 和 z 是像素点的位置, θ 是康普顿散射角。



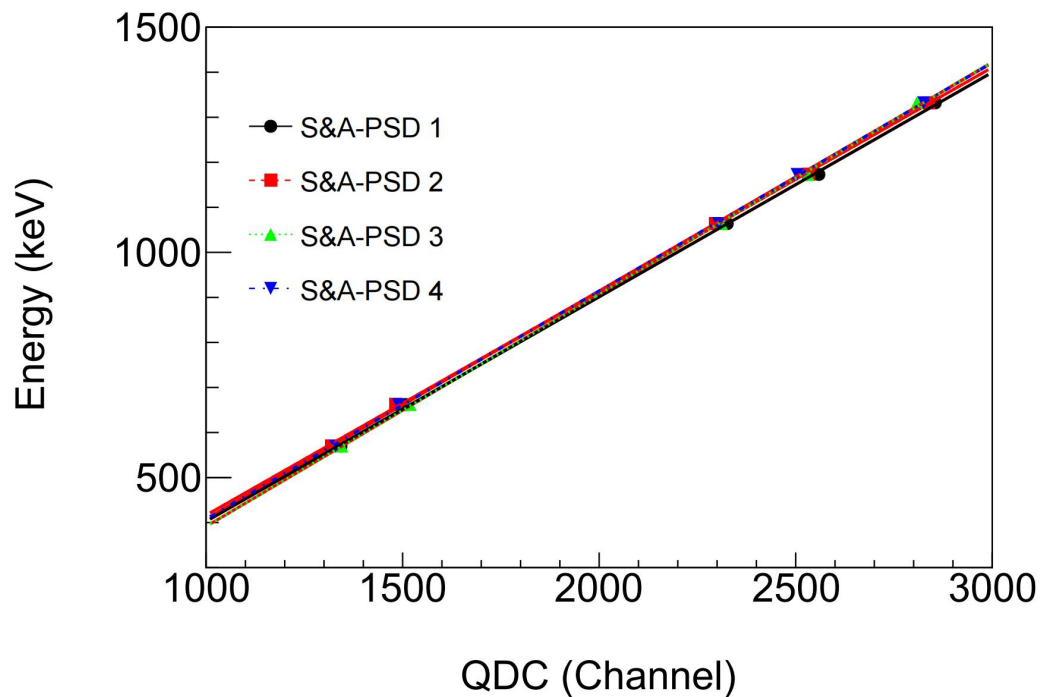
探测系统结构



数据获取系统由中科采象
@王维宇, 孙振宇



(1) 能量刻度



(2) 能量分辨

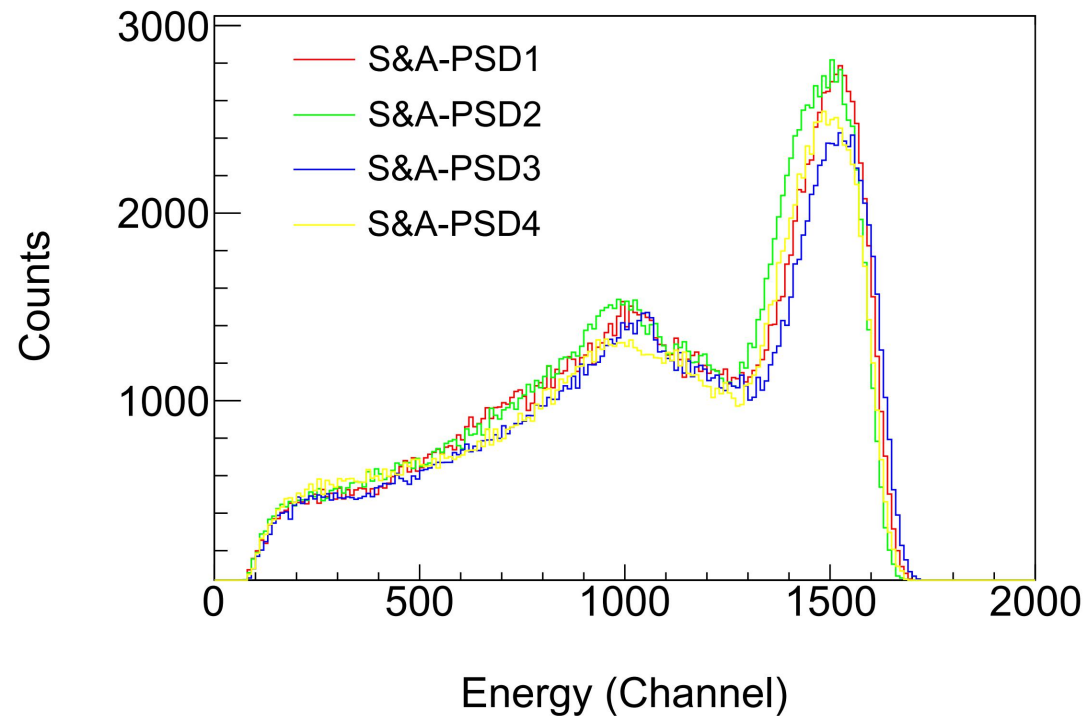
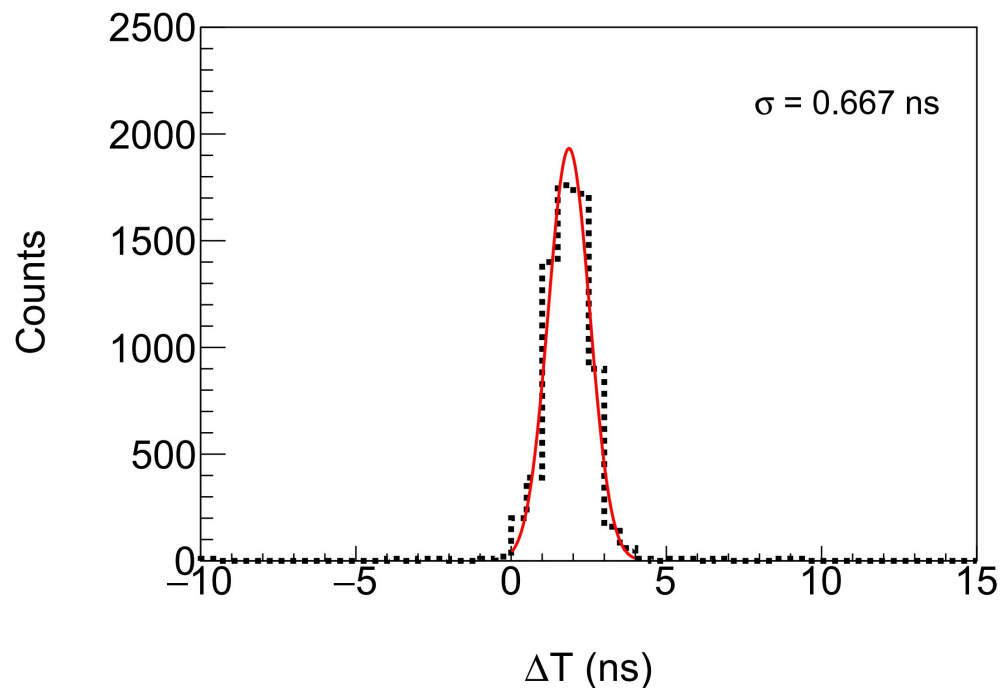


TABLE 1. The energy resolution of the S-PSD and A-PSD.

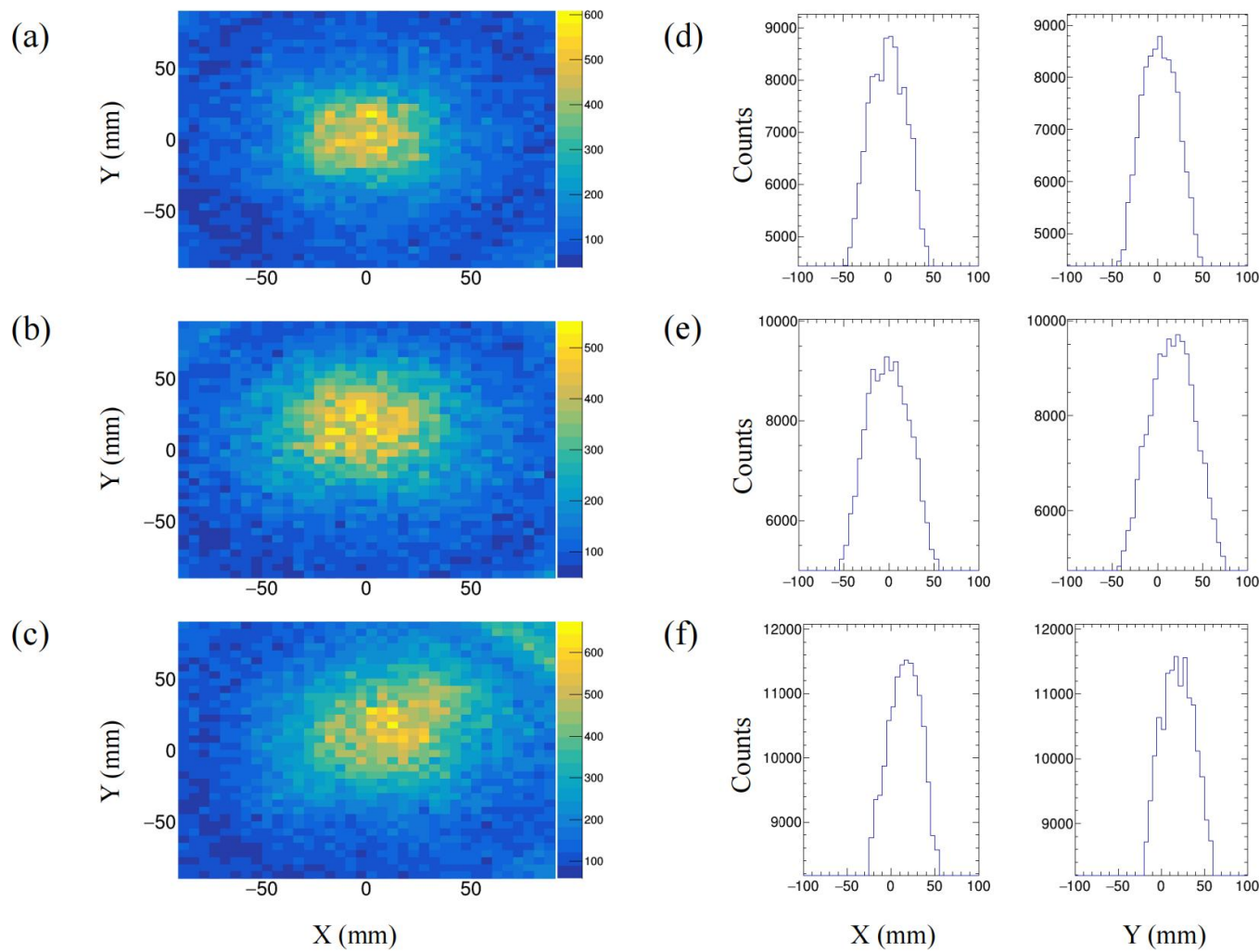
Energy (keV)	S-PSD	A-PSD1	A-PSD2	A-PSD3	A-PSD4
570	6.25	4.87	5.56	5.66	5.43
1064	6.05	3.83	4.26	4.25	4.50
662	5.83	5.22	5.08	5.05	4.99
1173	6.24	4.19	4.35	4.18	4.46
1332	6.14	3.64	3.86	3.81	3.96

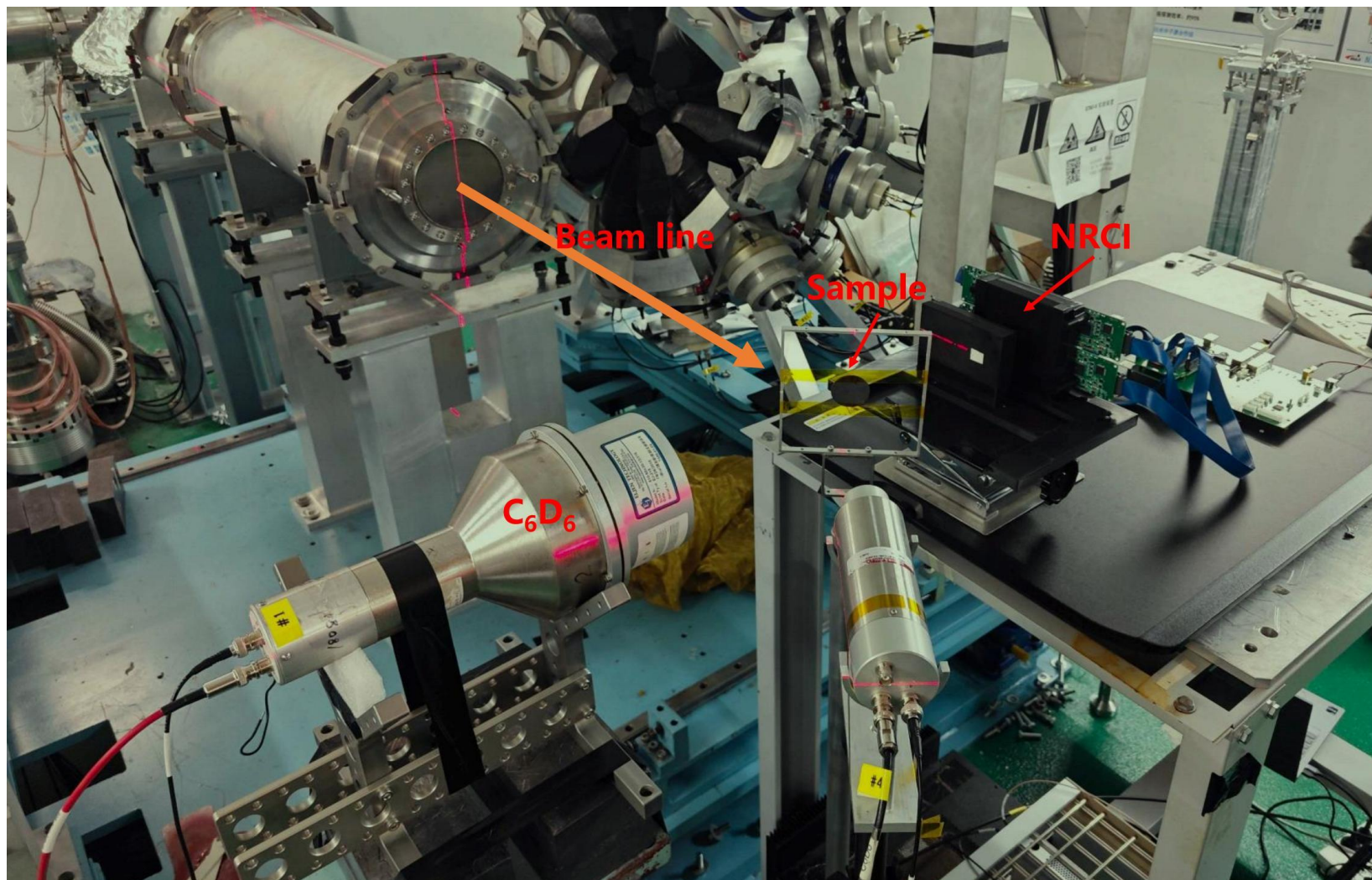
(3) 时间分辨



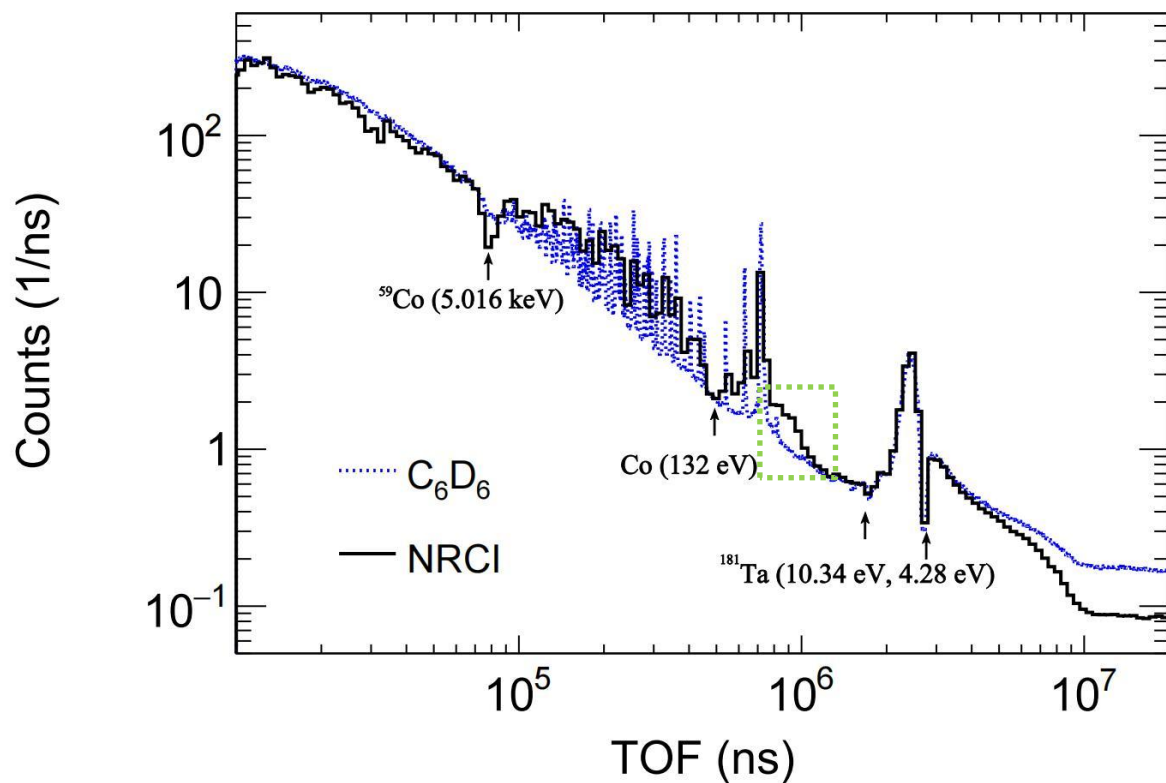
时间分辨为1.57 ns

(4) 成像测试

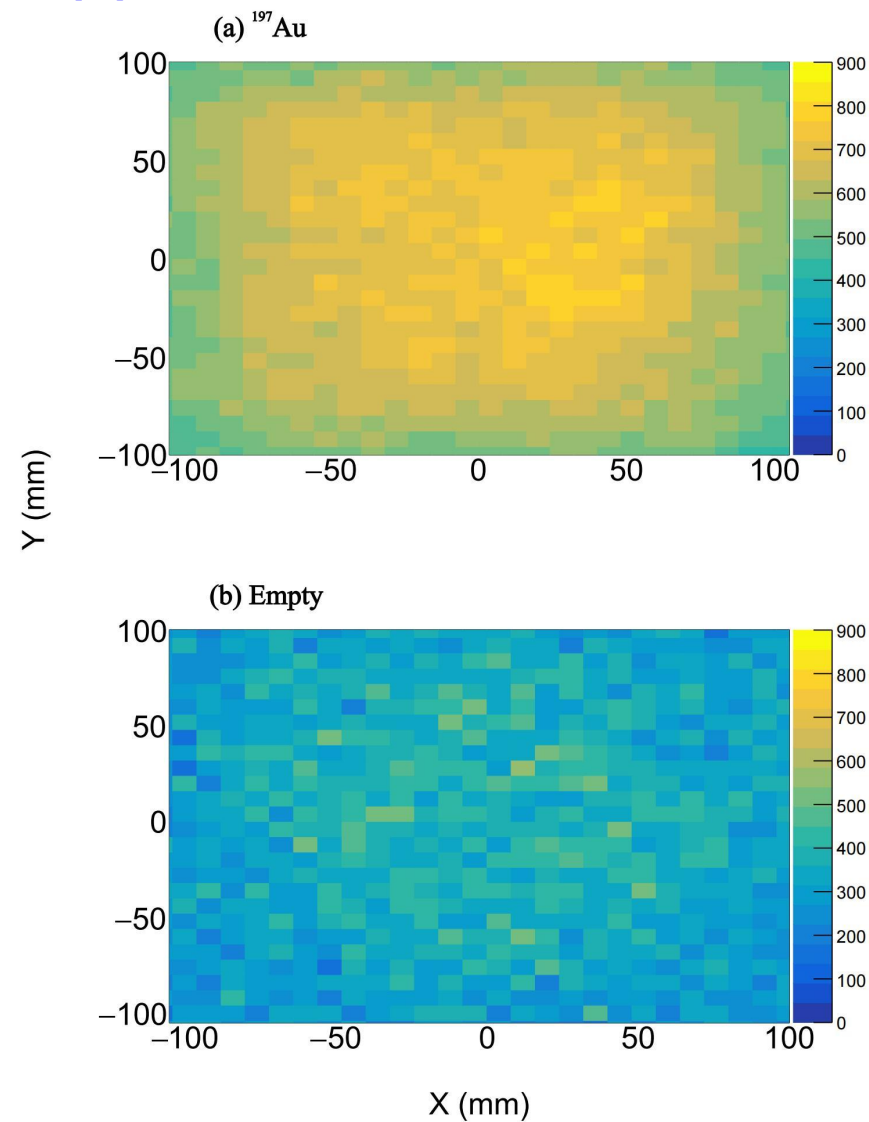
X 方向 $\sigma_x = 3.83$ cm, Y 方向 $\sigma_y = 3.75$ cm



(1) 飞行时间谱



(2) 康普顿成像

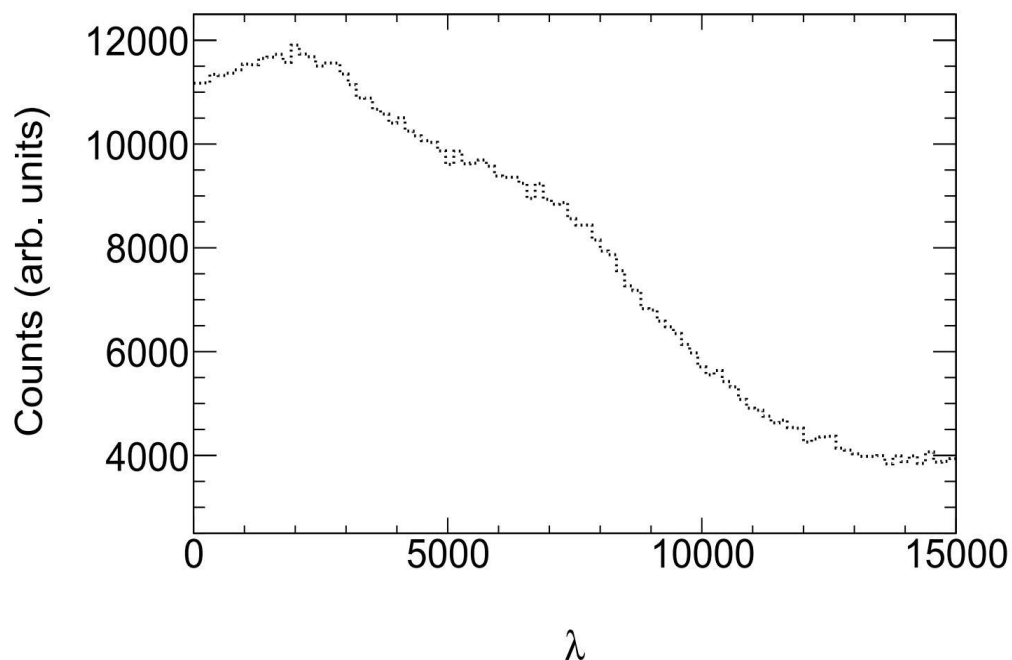


(3) 参数 λ

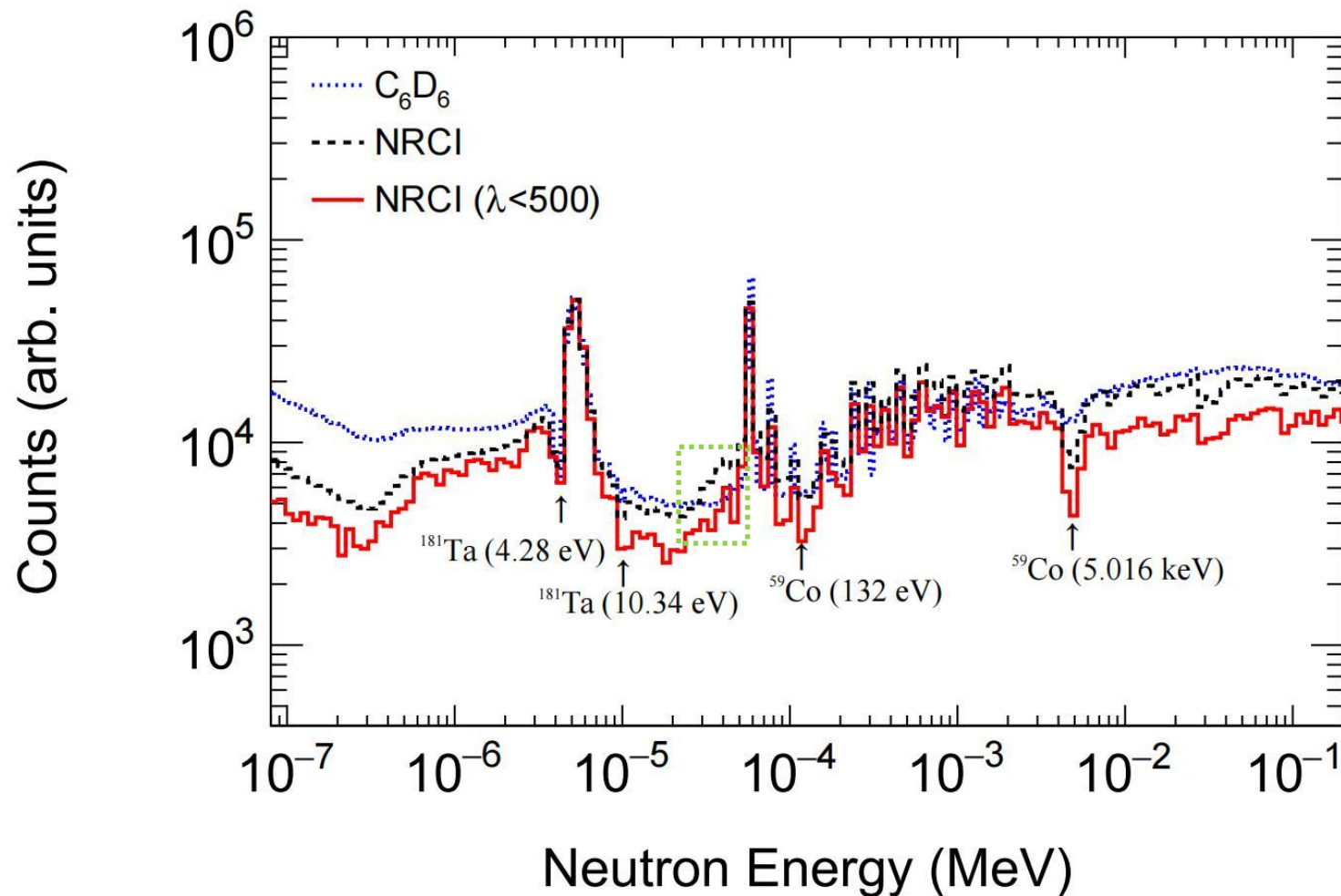
利用康普顿公式和上述几何约束，当源的位置在 (0, 0, 0) 时，可用本底抑制参数

$$\lambda = (n_x a_x + n_y a_y + n_z a_z)^2 - \left(1 + \frac{511}{(E_1 + E_2)} - \frac{511}{E_2}\right)^2 (a_x^2 + a_y^2 + a_z^2) \#$$

其中 λ 值为本底抑制参数，对于较小的 λ 值，更可能是中子辐射俘获反应产生的（真实的俘获事件），而大的 λ 值可能由周围材料俘获中子引起的本底事件。通过限定小 λ 值可以抑制本底，提高实验的效应本底比。



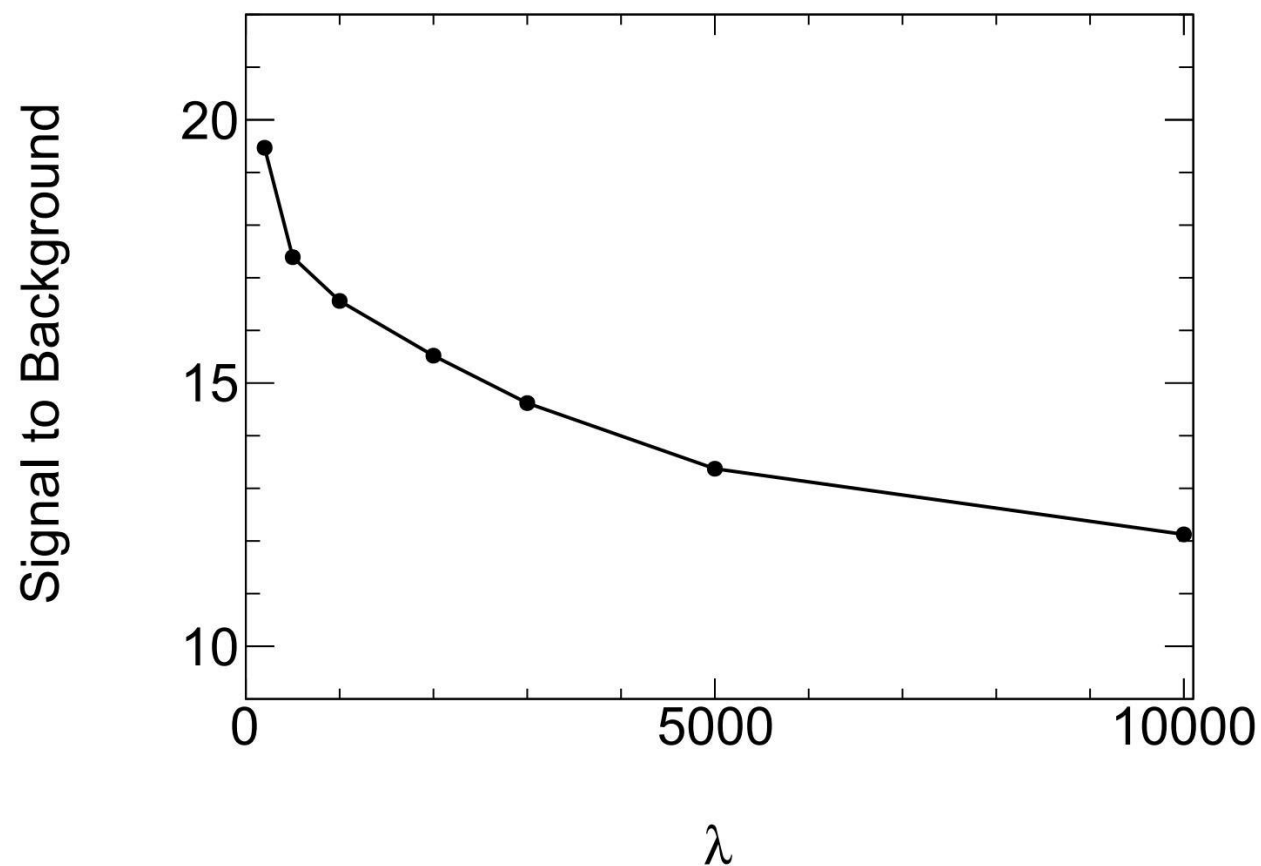
(4) 中子能谱



- 图中绿色方框内为Br元素引起的本底，通过康普顿筛选后，本底明显降低。
- 在同一次测量中，在进行康普顿处理后，NRCI探测器效应本底变好。



(5) 效应本底比 vs. λ



使用 ^{197}Au 4.9eV的共振峰和 ^{181}Ta 10.34 eV的吸收谷, 评估了不同 λ 值对应的本底



总结:

- 开发了一套康普顿成像探测器。经过完整性能测试, 该系统的时间分辨率为1.6 ns, 同时S-PSD和A-PSD在662 keV能量分辨率低于6%。成像结果显示x轴分辨率为3.83 cm, y轴分辨率为3.75 cm。
- 证明了方法的可行性, 通过成像能力提高效应本底比。
- 该探测器具有NRCI和测量中子俘获截面的潜力。

展望:

- 优化中子灵敏度与算法性能。采用中子灵敏度较低的无机晶体 (如 LaCl_3 、YAP和YSO闪烁体), 增加中子吸收体。
- 验证gamma入射位置重建结果与真实结果之间的差距, 并改进算法。
- 采用先进的成像算法来提升探测器性能。
- 未来期望能在中子俘获截面测量中应用。



内蒙古工业大学



中国原子能科学研究院

CHINA INSTITUTE OF ATOMIC ENERGY



中国散裂中子源
China Spallation Neutron Source



中科采象
EVERACQ TECHNOLOGIES

谢谢!
请批评指正