



南京工业大学
NANJING TECH
UNIVERSITY



第九届CSNS反角白光中子源用户研讨会

基于单像素探测技术的瞬发伽马 活化元素成像研究

程 璨¹ 贾文宝²

1. 南京工业大学 电气工程与控制科学学院
2. 南京航空航天大学 核分析技术研究所

2025. 07 .24 安徽 六安



基于单像素探测技术的瞬发伽 马活化元素成像研究



1

研究背景

2

研究内容

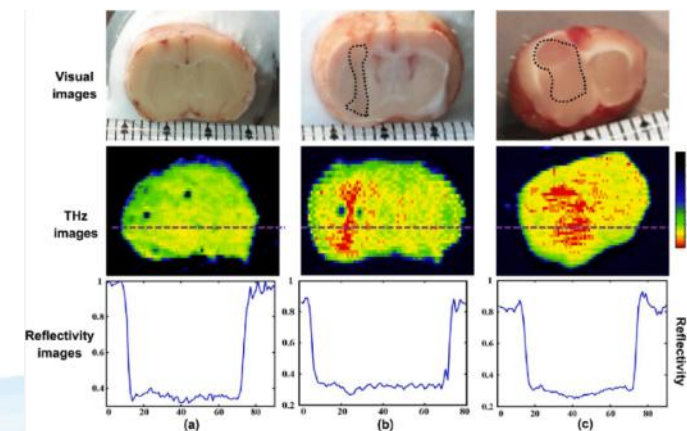
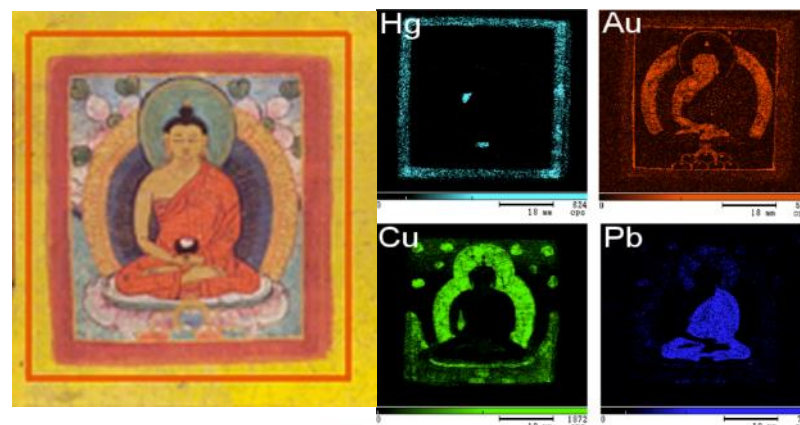
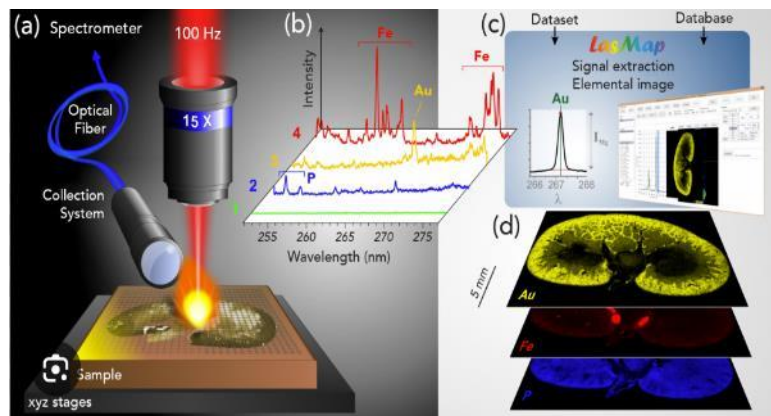
3

结果分析

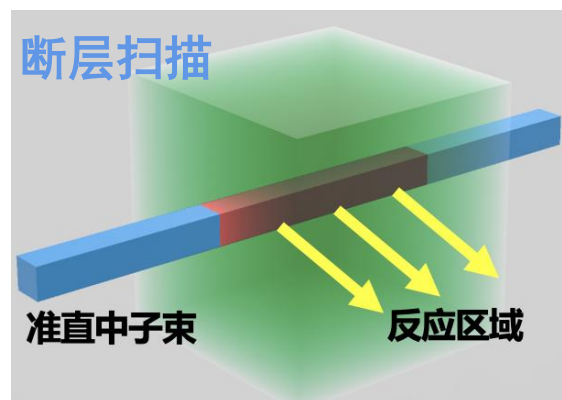
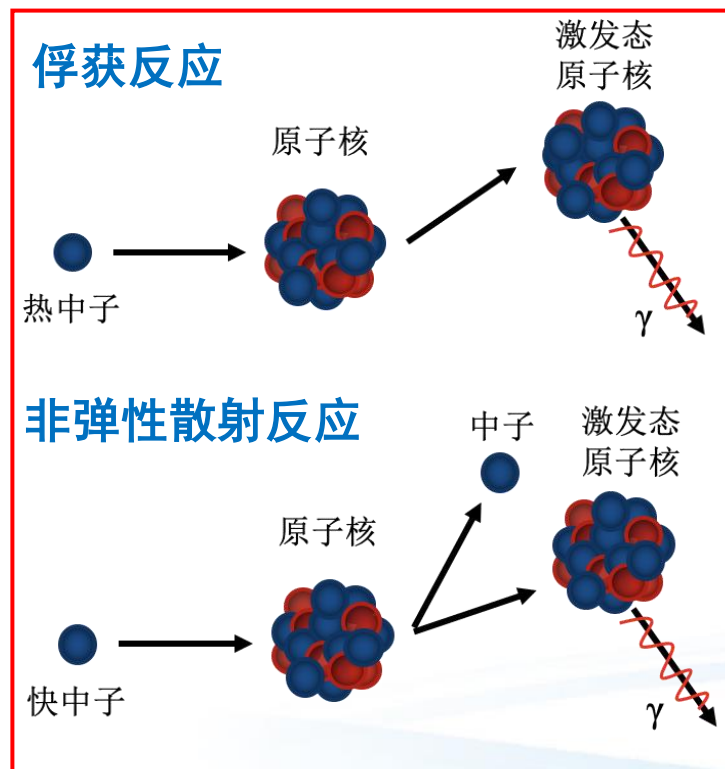
4

总结展望

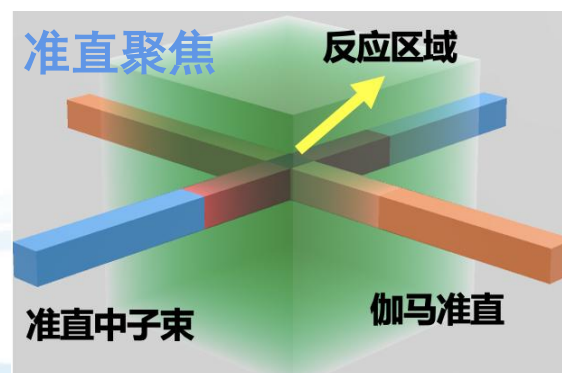
先进的无损检测技术在科学研究和工业领域具有重要的意义，射线检测是一种十分有效的手段，可以对样品的**结构进行成像分析**。随着测量要求的提升，有时不仅需要知道样品的结构信息，同时要获取样品中不同部位的元素成分即**元素分布的信息**，从而为样品性能的评价提供更多的参数。



元素分布检测又称为**元素成像**。中子是一种探索样品元素成分及成像分析的理想探针，基于中子技术的元素成像主要利用**瞬发伽马中子活化分析**（Prompt Gamma Neutron Activation Analysis, PGNAA）结合**扫描测量**实现的，该技术也被称为**瞬发伽马活化成像**（Prompt gamma activation imaging, PGAI）技术。

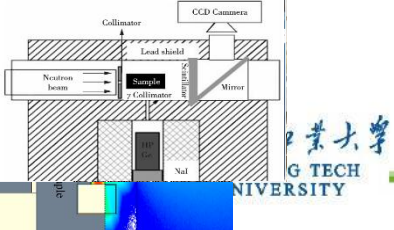


断层扫描：只对中子束准直，旋转样品并采集一定数量不同角度下的测量结果，利用数学算法进行结果分析。



准直聚焦：同时对中子束和探测系统进行准直，被检测区域为中子束与探测器准直的点，通过移动样品对区域中的核素进行检测。

元素分布检测技术	优势	局限	应用领域
X射线荧光光谱 XRF	检测限低，空间分辨率高	穿透性差，受限于样品表面分析	石油化工、土壤环境监测、玻璃陶瓷材料
激光诱导击穿光谱 LIBS	准直性强，空间分辨率高	对样品存在破坏性，基体效应严重，样品体积小	地质矿物、土壤元素、生物样品、考古
太赫兹光谱技术 THz	辐射能量低、高信噪比、宽频带	空间分辨率受波长限制，难以检测导电物体	安全检测、生物检测、雷达通讯
瞬发伽马中子活化成像 PGAI	穿透性强，内部分析，非破坏性	空间分辨率较低，测量时间长	文物、核材料、矿物识别

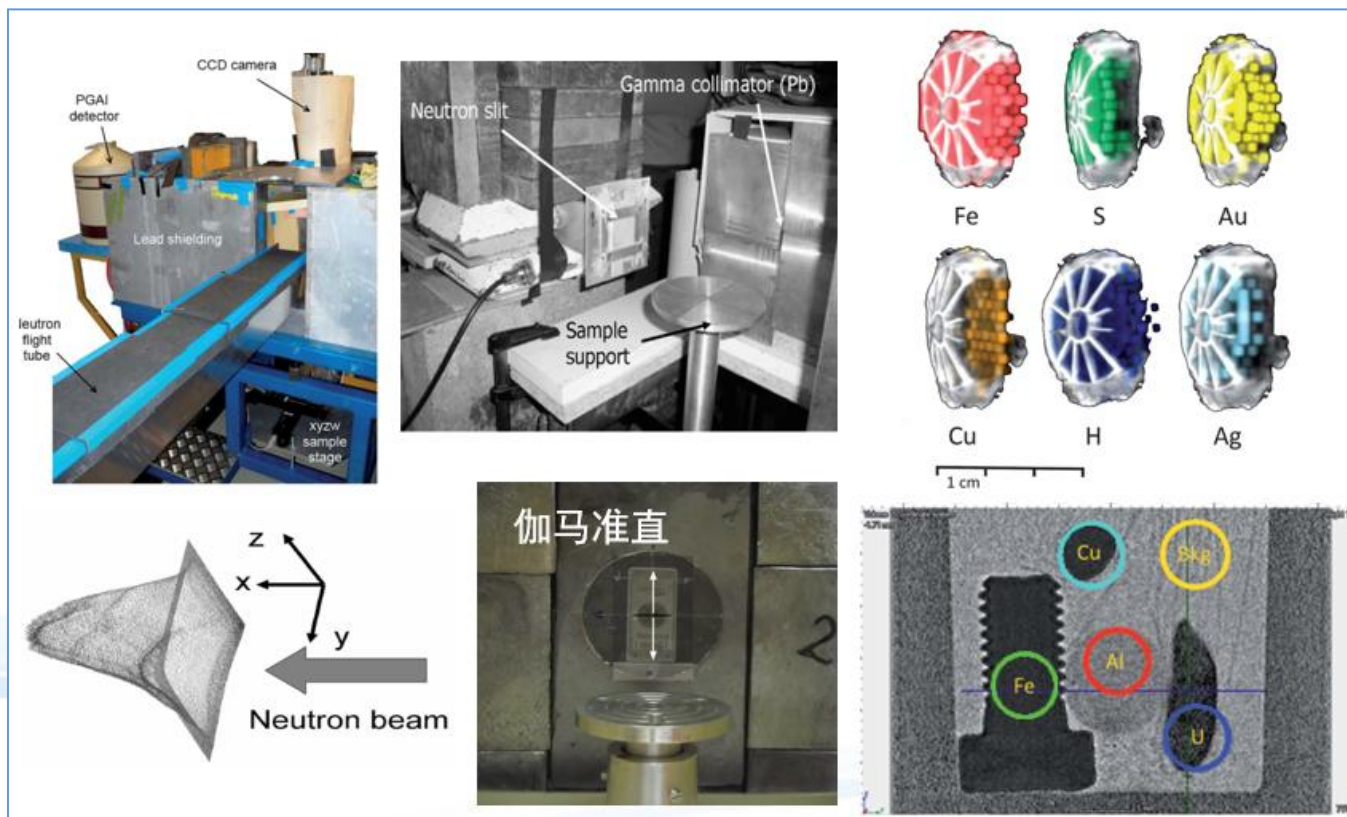


研究背景 国内外研究

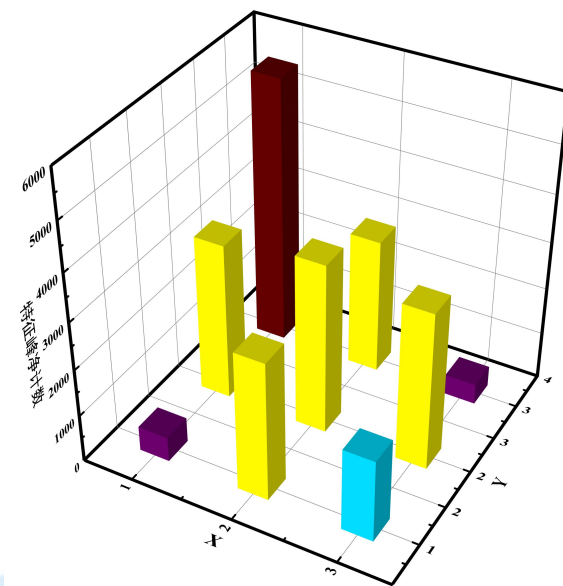
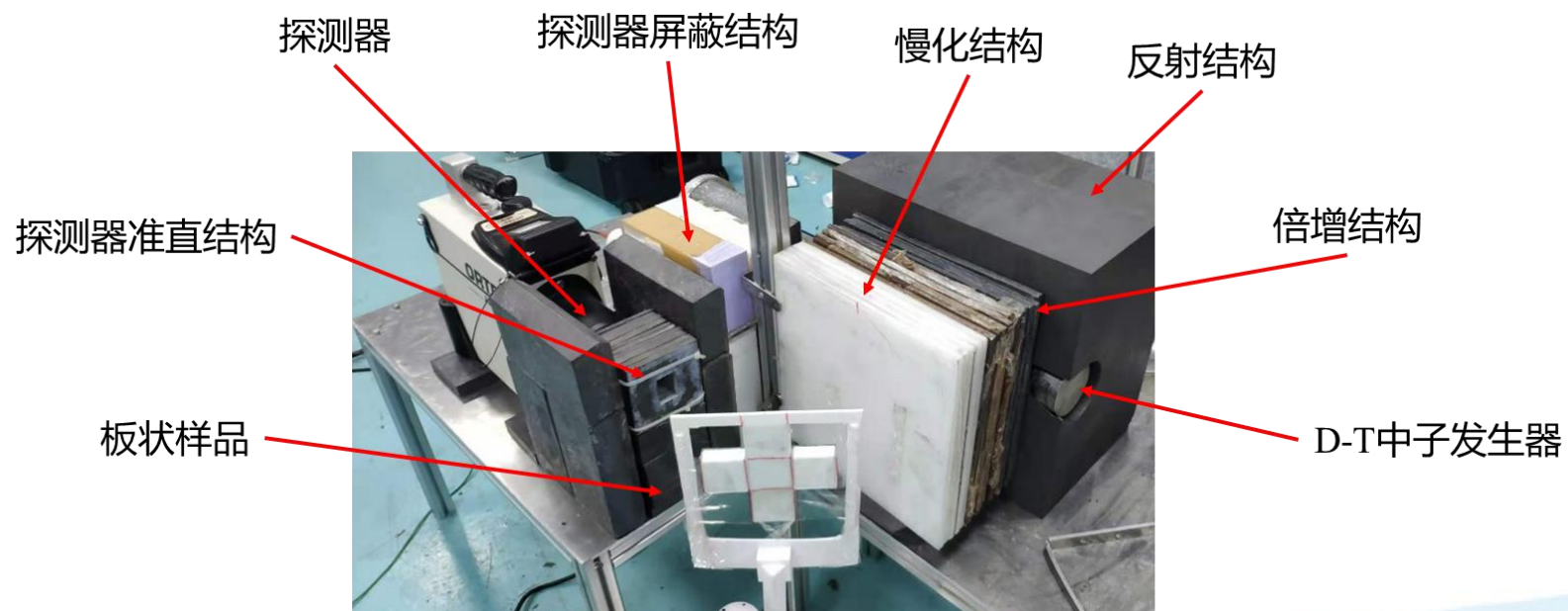
目前的PGAI设备都是基于反应堆中子源搭建的，主要通过准直测量实现元素成像检测。

反应堆	PGAI 装置	准直类型	热中子通量/cm ² s ⁻¹	空间分辨率	测量时间
匈牙利 BNC		双准直扫描	~10 ⁷	三维 2 mm	~180 min/像素
德国 FRM-II		双准直扫描	~10 ¹⁰	三维 1 mm	~10000 s/像素
美国 NIST		康普顿相机	~10 ⁹	二维 5 mm	24 h
中国 CARR		双准直扫描	~10 ⁸	三维 10 mm	1000 s/像素
中国 CMRR		双准直扫描	~10 ⁸	三维 10 mm	1000 s/像素

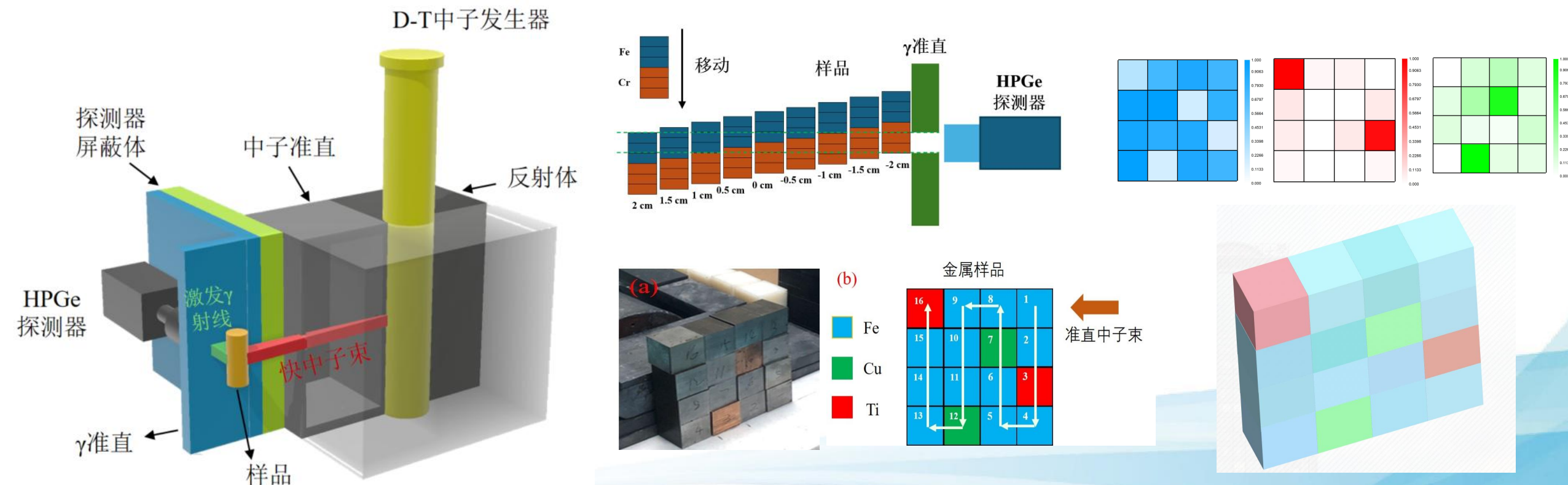
- 热中子通量能够达到~10⁷~10⁹ cm⁻²s⁻¹量级，空间分辨率最低能接近1 mm。
- 在核材料、文物、矿物和化石分析等领域开展了工作。



基于可移动中子源开展PGAI技术可以拓展其应用场景。前期工作中基于D-T中子发生器，慢化后热中子通量在 $10^2 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 量级，采用准直扫描测量只能实现 $5 \times 5 \text{ cm}^2$ 的分辨率。

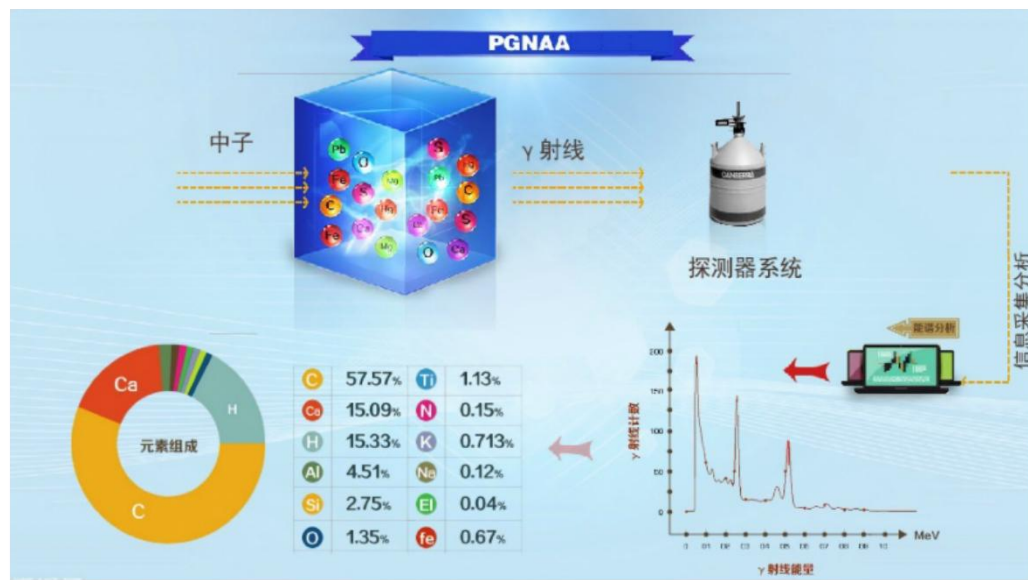


利用D-T中子发生器开展了快中子的PGAI实验，样品处的14 MeV快中子通量在 $10^3 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 量级，对金属样品的二维分布检测分辨率能够达到 $4 \times 4 \text{ cm}^2$ 。



- Hei D, Jia W, Cheng C, et al. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2021, 492: 7-14.
- 单卿,陈庆博,程伟,等. *西北师范大学学报(自然科学版)*, 2024, 60(05): 38-44. DOI: 10.16783/j.cnki.nwnuz.2024.05.006.

在低中子产额条件下，需要增大像素体积使得测量的伽马射线信息能够被甄别，空间分辨率通常在几厘米，难以满足应用，而在大型中子源下测量，空间分辨和测量时间的平衡也是重要难题。



主要问题与挑战:

- 高通量中子源
- 测量时间过长
- 设备仪器成本高

目标

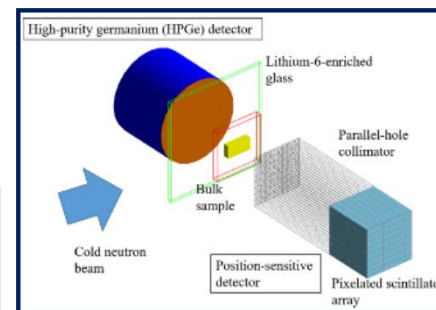
基于低通量中子源实现样品中的元素分布检测

阵列探测器价格高，能谱信息量有限

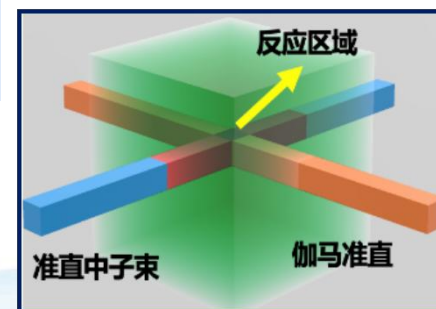
逐点扫描信号信噪比低，测量时间长

传统方法

阵列探测器测量



准直逐点扫描测量



基于单像素探测技术的瞬发伽 马活化元素成像研究



1

研究背景

2

研究内容

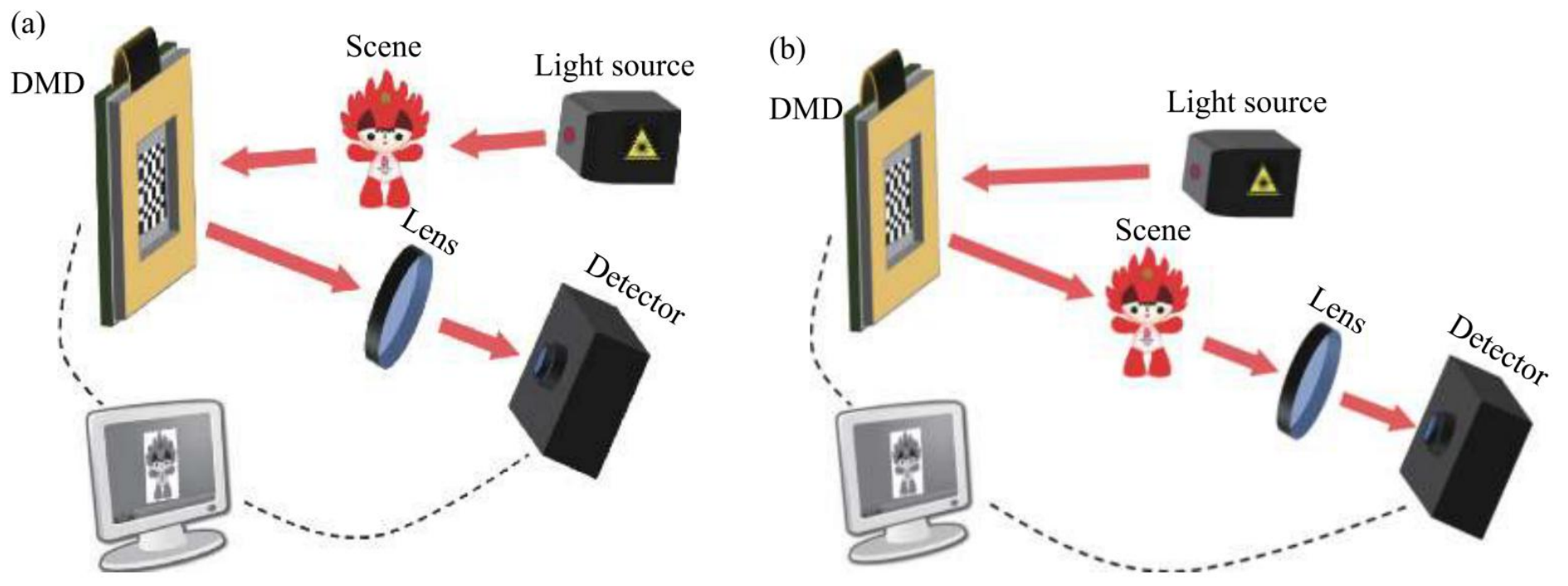
3

结果分析

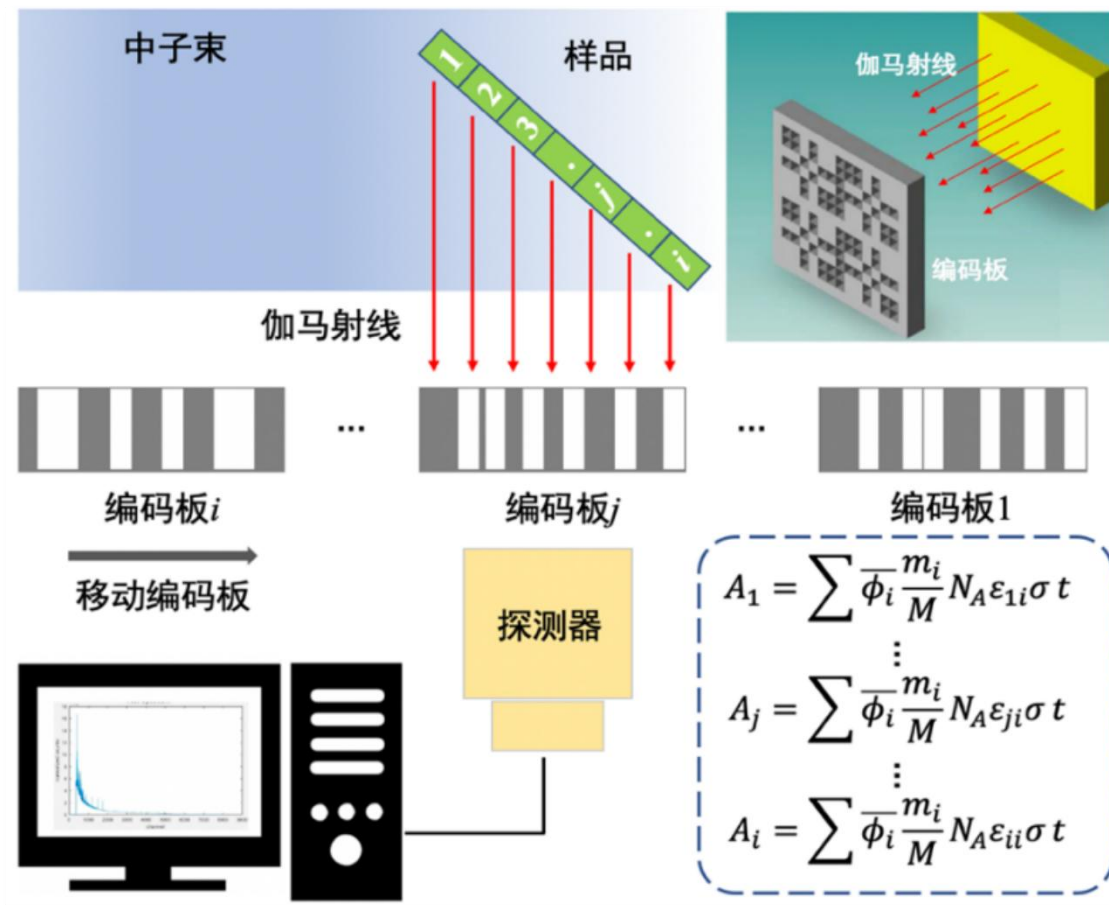
4

总结展望

单像素成像技术是一种采用没有空间分辨能力的大尺寸探测器和空间调制设备获得图像的新型成像方法。通过一系列掩膜图案**调制目标**，并用一个探测器记录其总信号强度，最后将一系列总信号与对应的掩膜图案做**关联运算**，就可以重建出目标图像。



利用**单像素探测器**结合**编码板伽马射线准直器**，实现在低通量中子源下PGAI元素成像分析。



考虑变化的参数，可以得到如下方程组

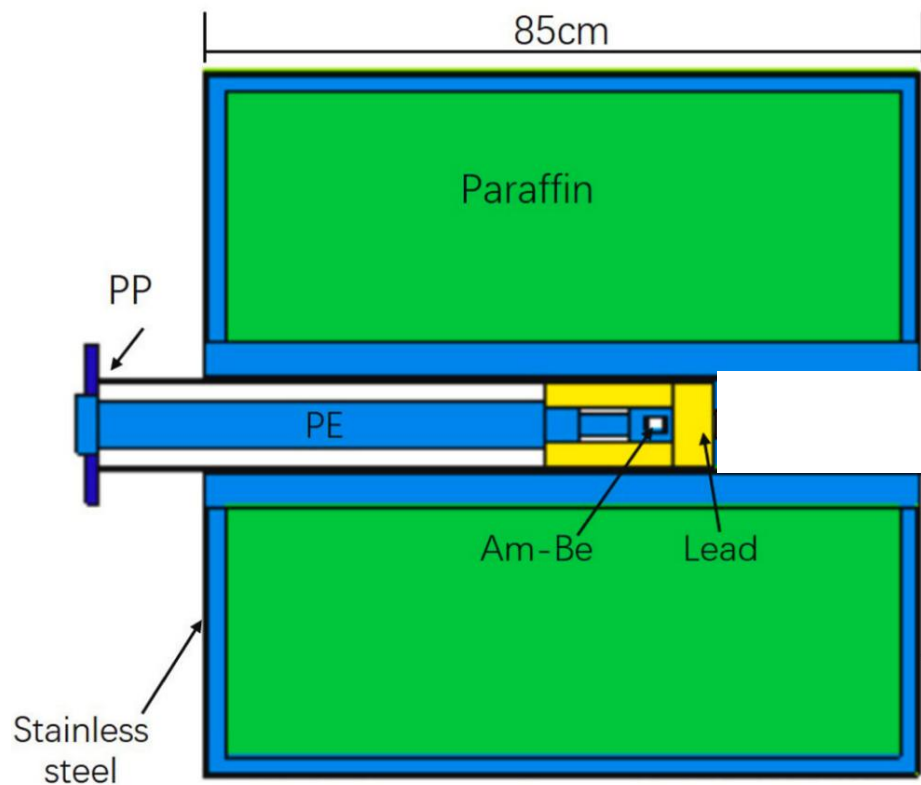
$$[A] = [m] \times [\epsilon]$$

- $[A]$ 为实验测量的伽马射线强度结果，
- $[m]$ 即为某一核素的质量分布，
- $[\epsilon]$ 为编码矩阵，其与编码板的开孔方式以及探测器的探测效率相关。

- 大体积探测器适合高能伽马射线分析
- 测量信号信噪比高，缩短了测量时间

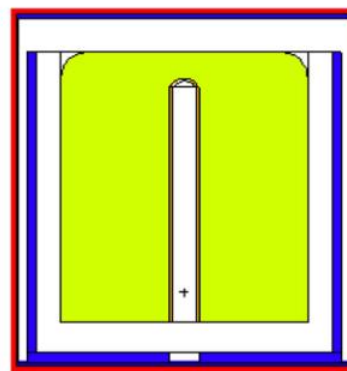
中子源

利用Am-Be中子源进行测量，其活度为300mCi，中子源储存在石蜡中，通过孔道引出中子束，同时使用聚乙烯塞子控制开关，中子源距离出口处约为18 cm，出口处的热中子通量 $\sim 40 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。

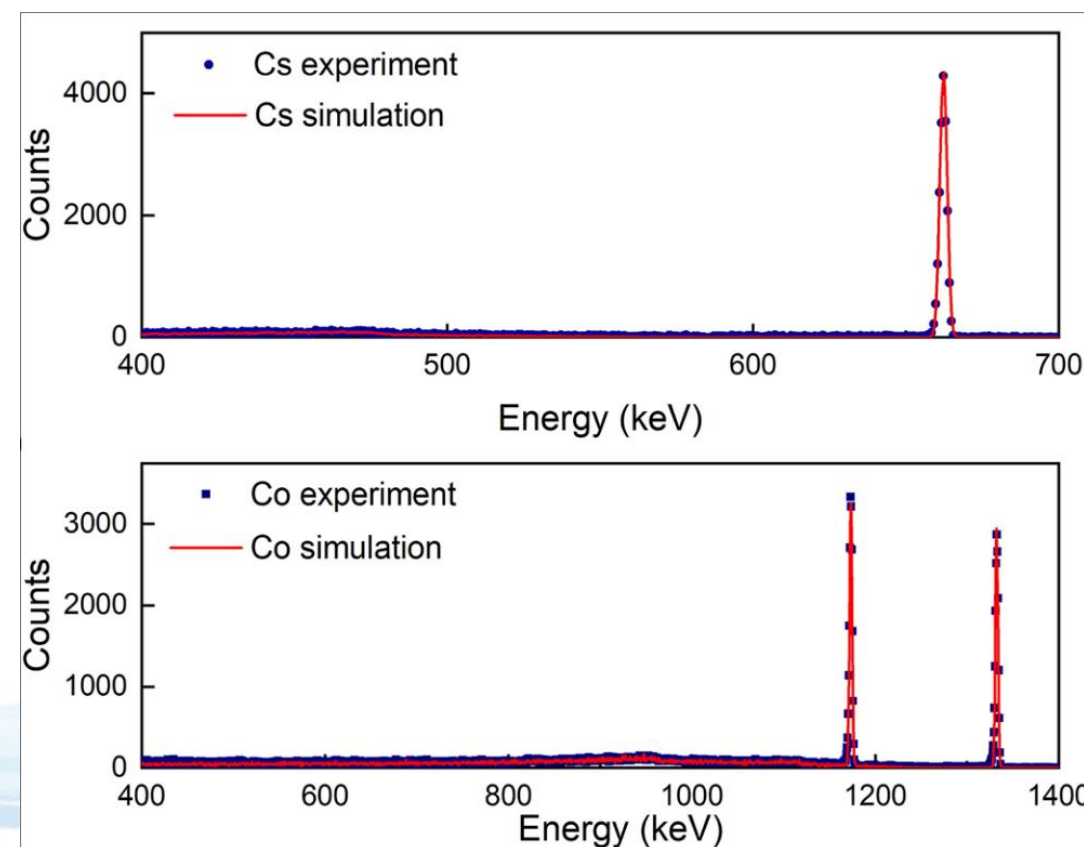


探测器

HPGe探测器是ORTEC公司生产的同轴型N型（TRANS-SPEC-N-KT型）HPGe探测器，探测器的相对探测效率约为55%。



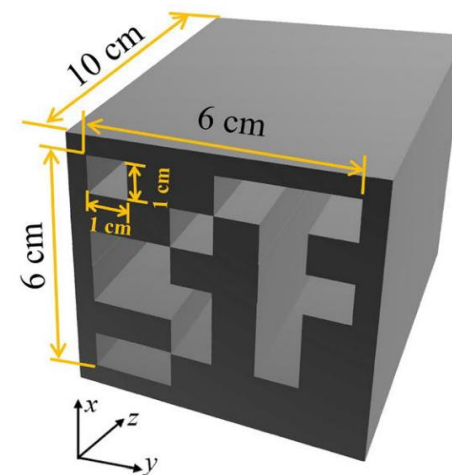
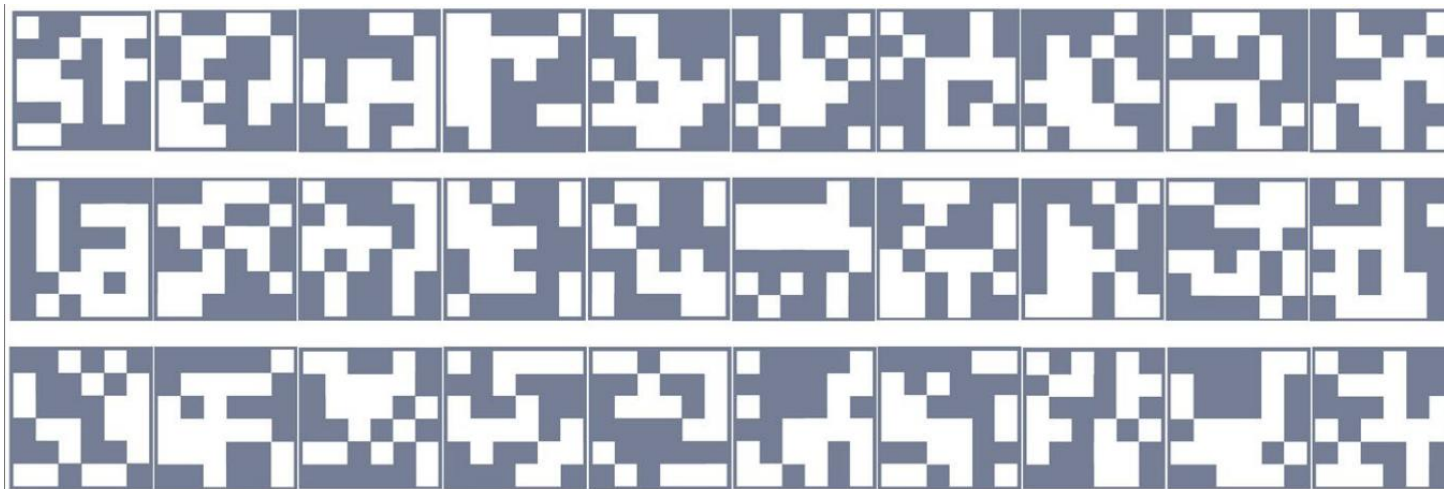
Ge Al Li





研究内容 实验装置

随机开孔方式：随机生成30个图案，保证开孔率为50%，利用Fe作为材料。



基于单像素探测技术的瞬发伽 马活化元素成像研究



1

研究背景

2

研究内容

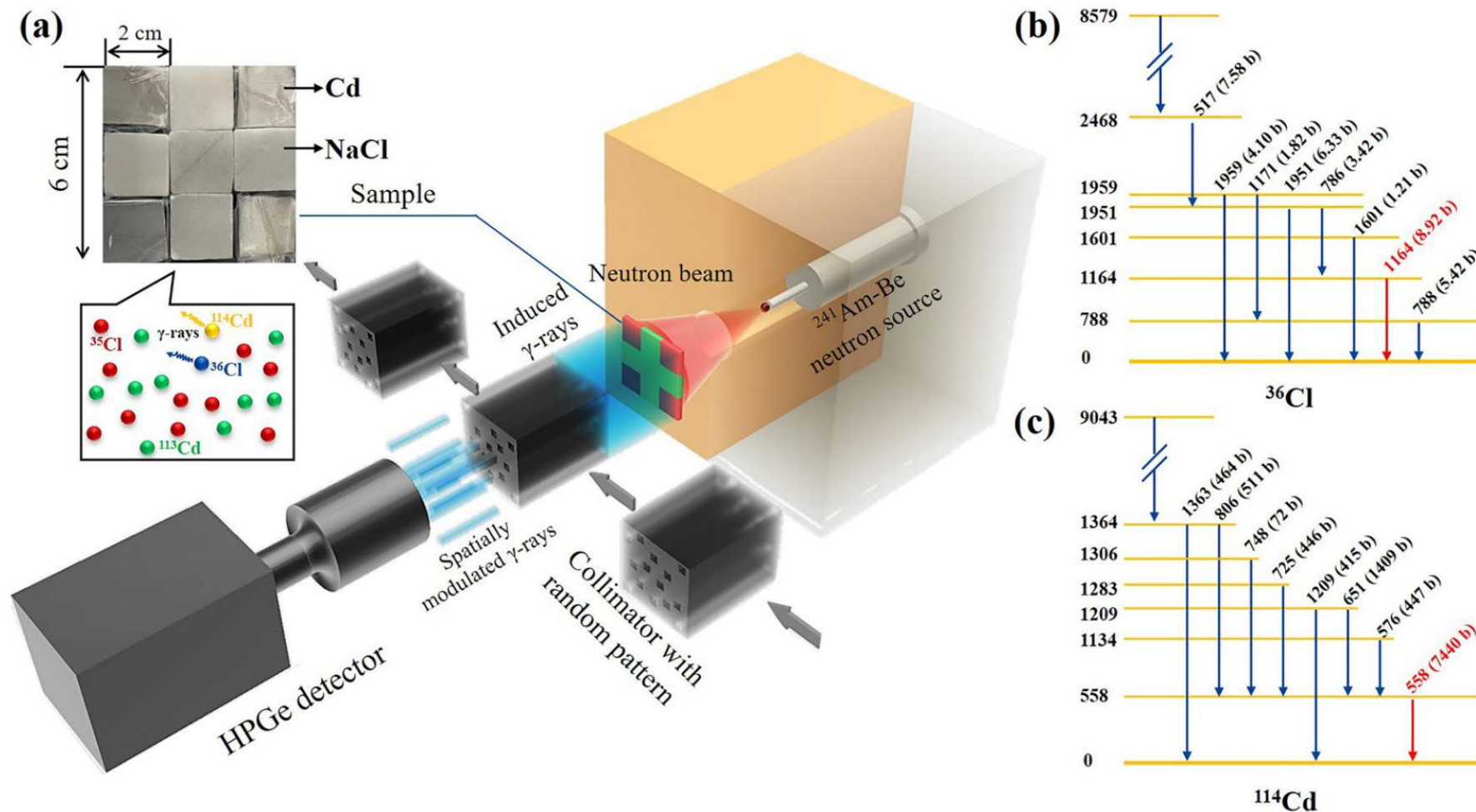
3

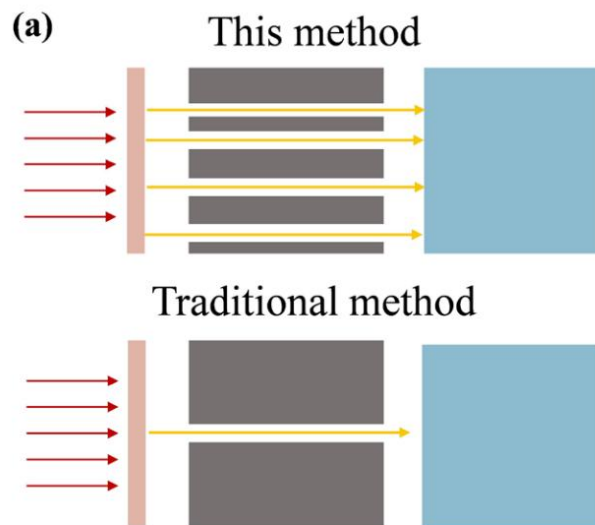
结果分析

4

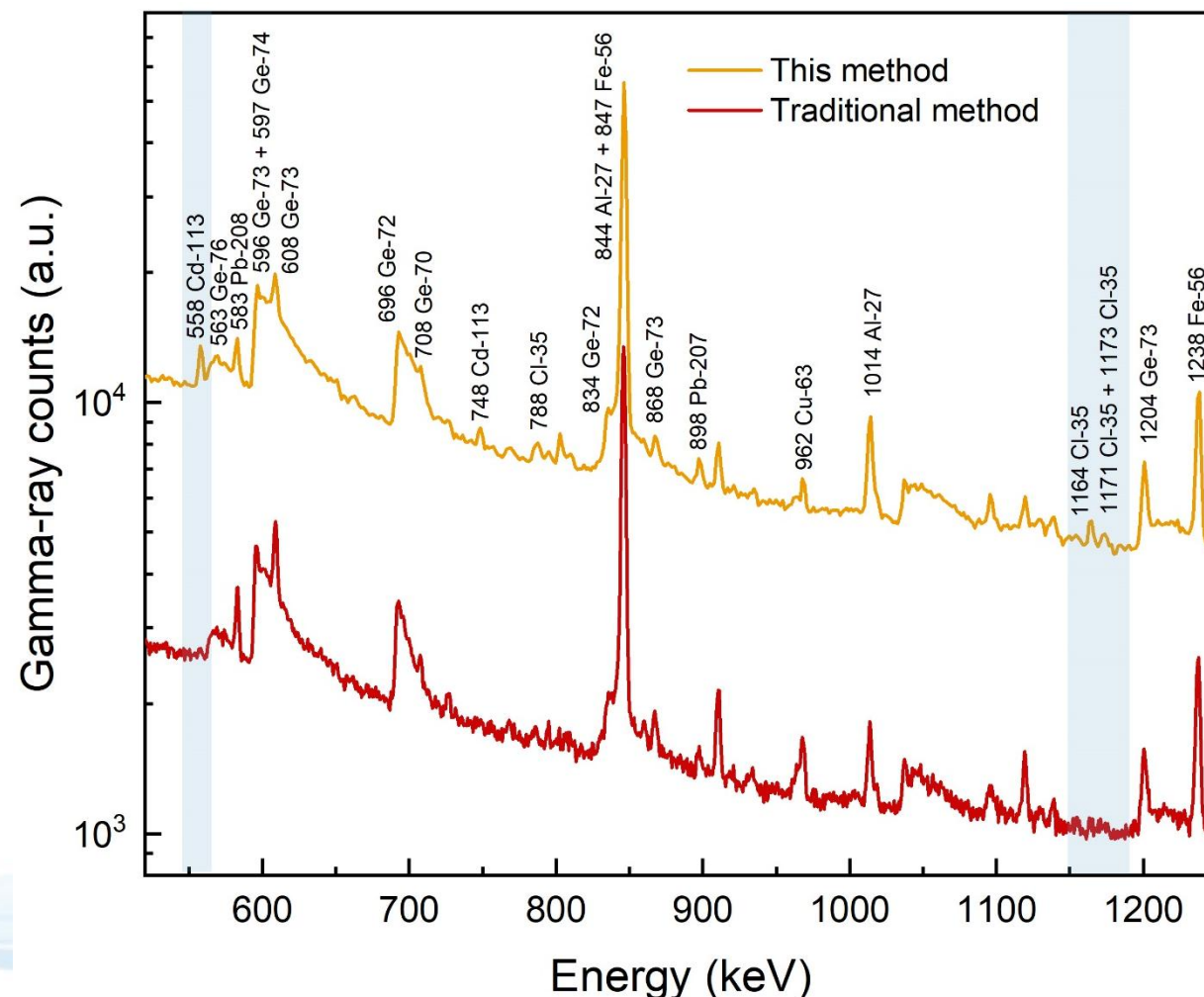
总结展望

样品由Cd片和NaCl粉末压制的块状材料组成，每个小样品大小为 $2 \times 2 \text{ cm}^2$ 。Cd的特征峰选取0.558 MeV，Cl的特征峰为1.164 MeV。每个编码板下测量一次，测量时间为2h，得到30个测量结果。

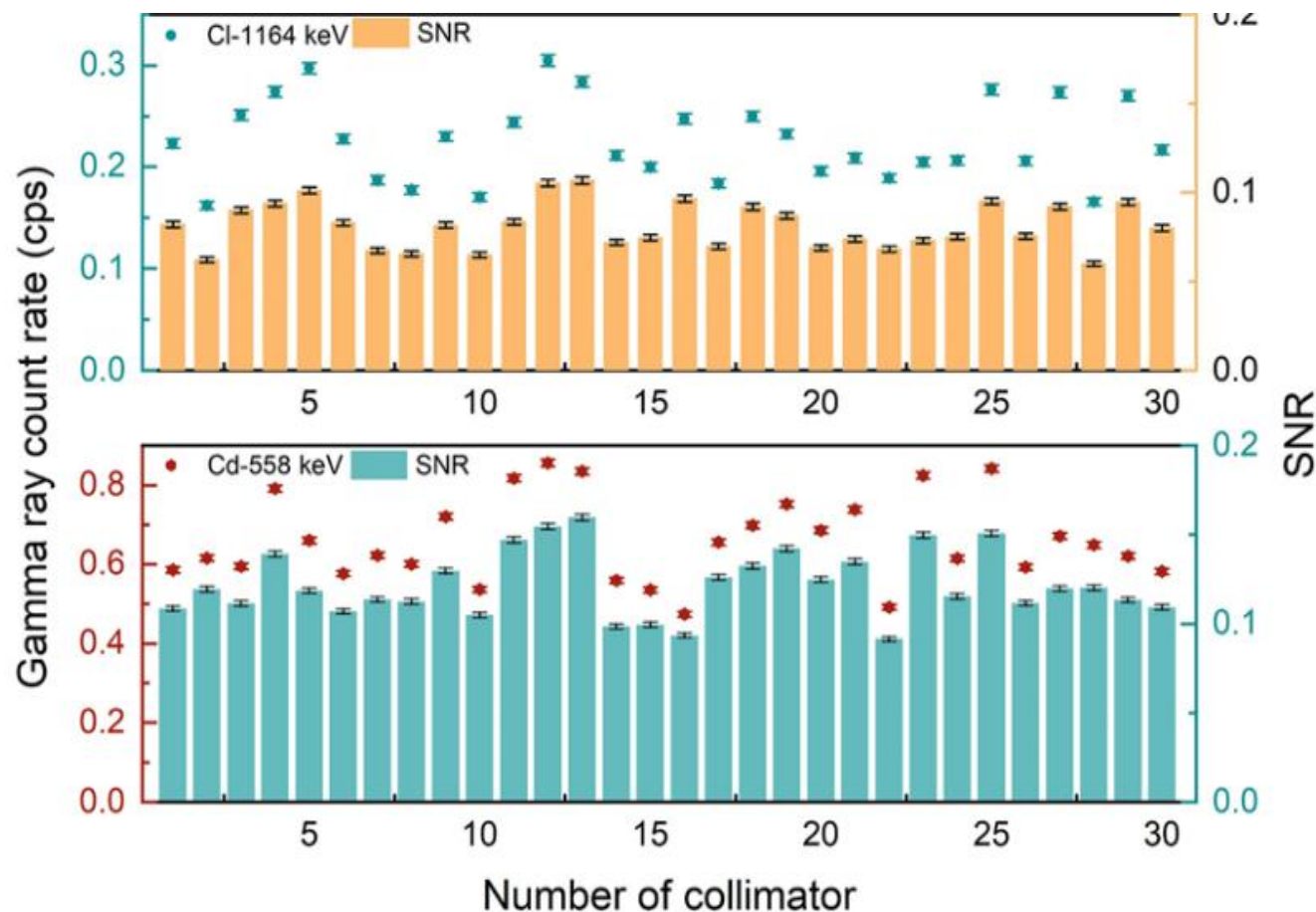
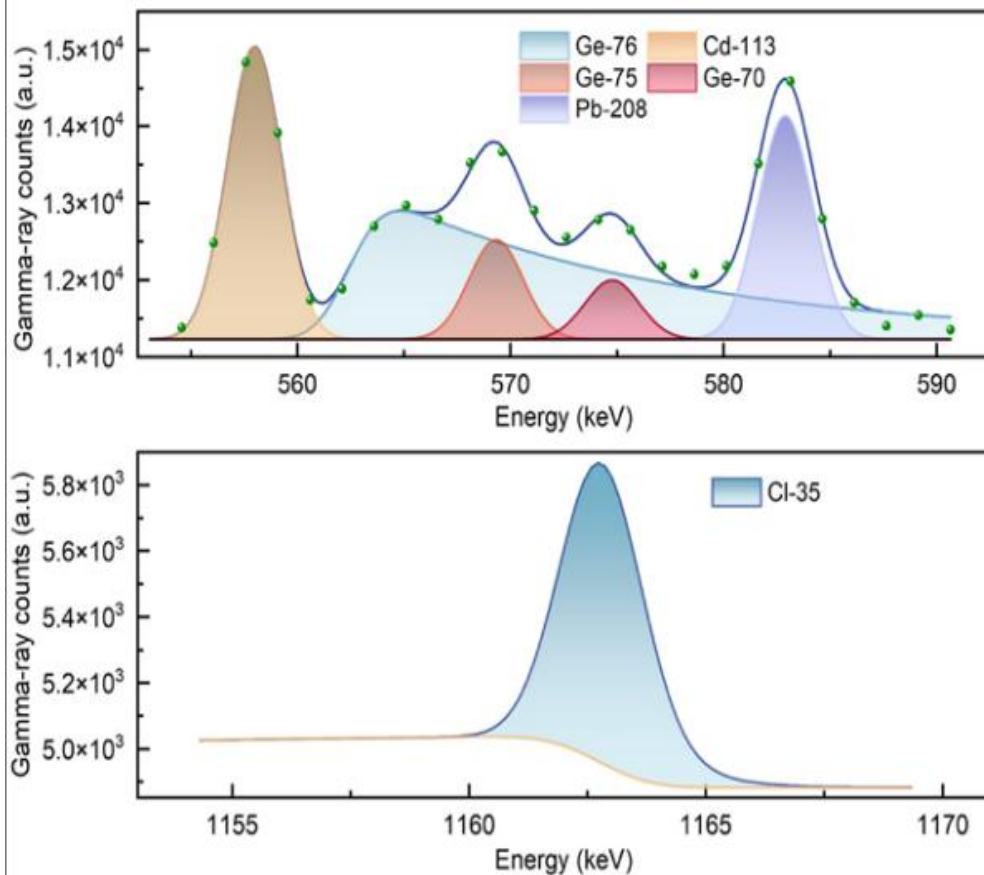




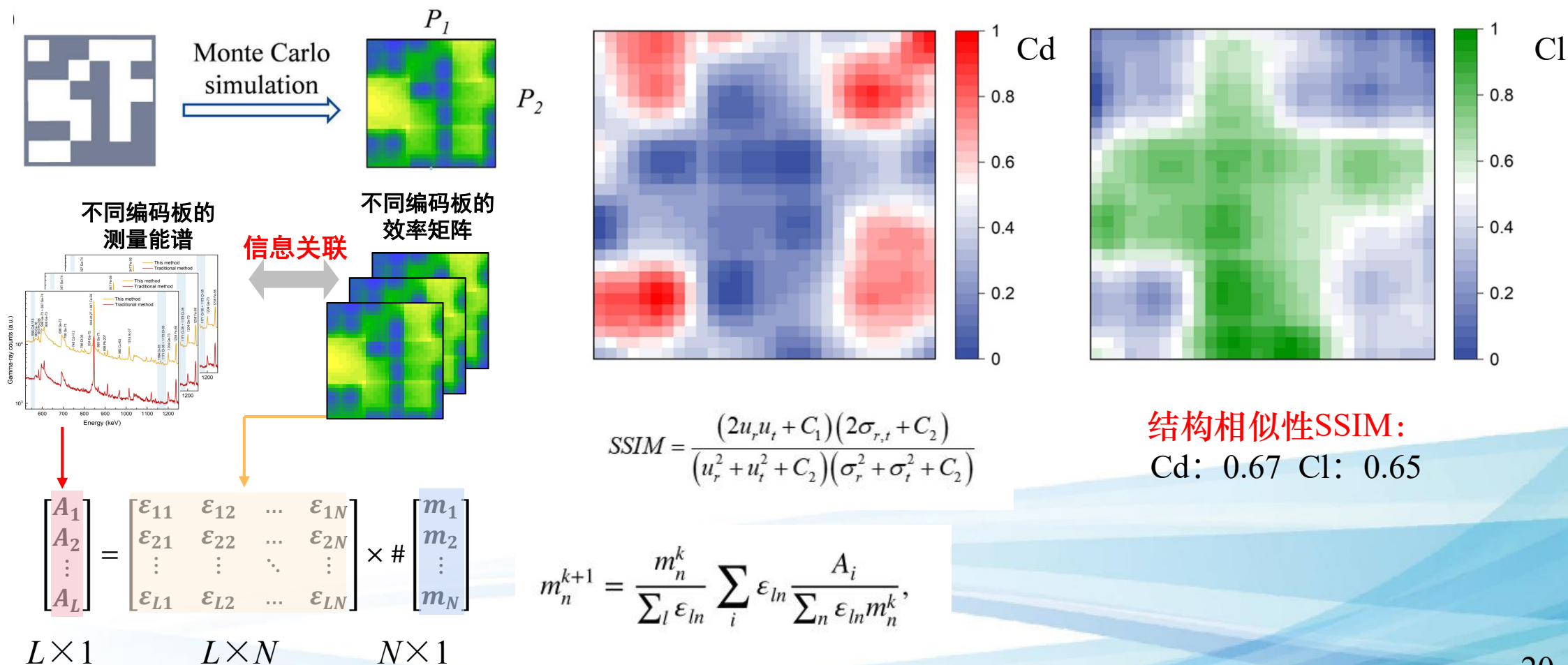
与传统的由于编码准直体具有多个孔道，并且并未对中子束进行准直，相较于双准直测量探测器可以获取更多信息，因此可以在远低于反应堆等高通量中子束流的条件下，进行测量分析。



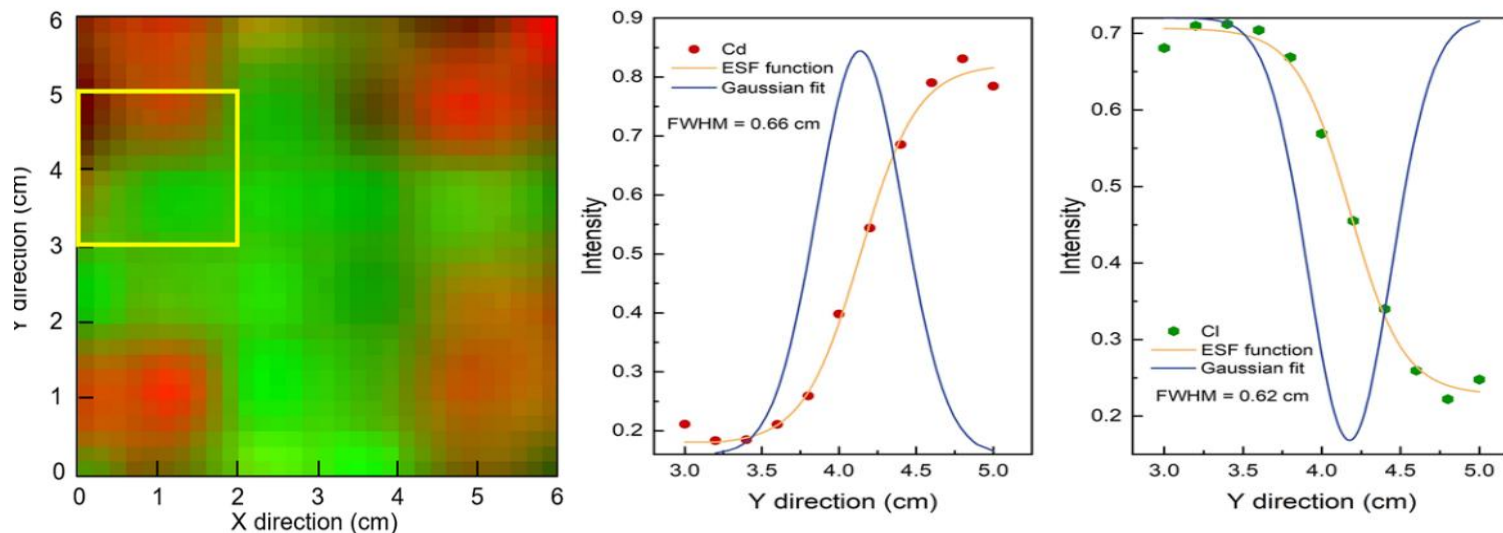
利用伽马能谱分析软件GAMMAFIT对测量得到的特征峰进行拟合分析，得到不同编码板下0.558 MeV和1.164 MeV特征峰的强度。



将样品共分为 30×30 个像素点，每一个像素点设置为放射源，利用MCNP计算得到每个编码板对0.558 MeV和1.164 MeV的效率。利用极大似然期望最大化算法（MLEM）对图像进行重建。



对测量结果的空间分辨率采用边缘扩散函数（Edge spread function）进行计算，选取Cd和Cl分布的边界区域，对像素点的变化速率进行高斯拟合，得到的半高宽作为空间分辨率，结果显示Cd为0.66 cm，Cl为0.62 cm。



	测量方式	中子通量 ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)	测量时间 (h)	空间分辨率 (mm)
BNC 反应堆	逐点扫描	10^6	96	~2
NIST 反应堆	阵列探测器	10^7	24	~5
本工作	编码成像	10^3	60	~7

- Cheng C, Xie Y J, Xia X R, et al. A single - pixel elemental imaging method using neutron - induced gamma - ray activation. *Nuclear Science and Techniques*, 2025, 36(1): 1-12.

基于单像素探测技术的瞬发伽 马活化元素成像研究



1

研究背景

2

研究内容

3

结果分析

4

总结展望

总结

- 利用PGAI与单像素测量方法相结合，能够在低产额中子源下实现元素成像测量。
- 通过Am-Be中子源和HPGe探测器，结合随机编码的伽马射线准直体，实现了对Cl和Cd元素的测量，空间分辨率~7mm，验证了该方法的可行性。

展望

- ◆ 以信扰比和成像质量作为评价指标，对编码板等关键部件进一步进行优化；
- ◆ 选对样品的三维元素分布进行成像分析，在测量过程中需要考虑中子自屏蔽的干扰等情况；
- ◆ 利用深度学习结合迭代计算开展图像重建工作；
- ◆ 在高通量中子源上开展相关实验工作。



**谢谢！
请各位专家批评指正！**