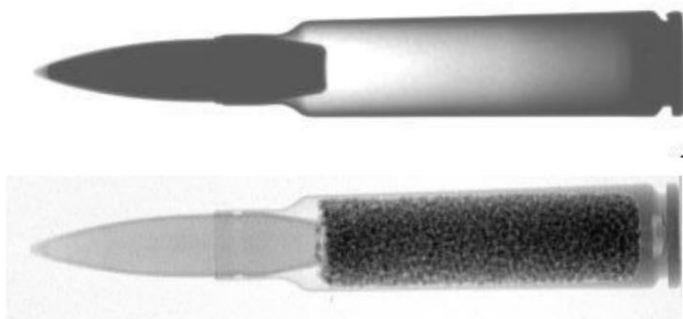
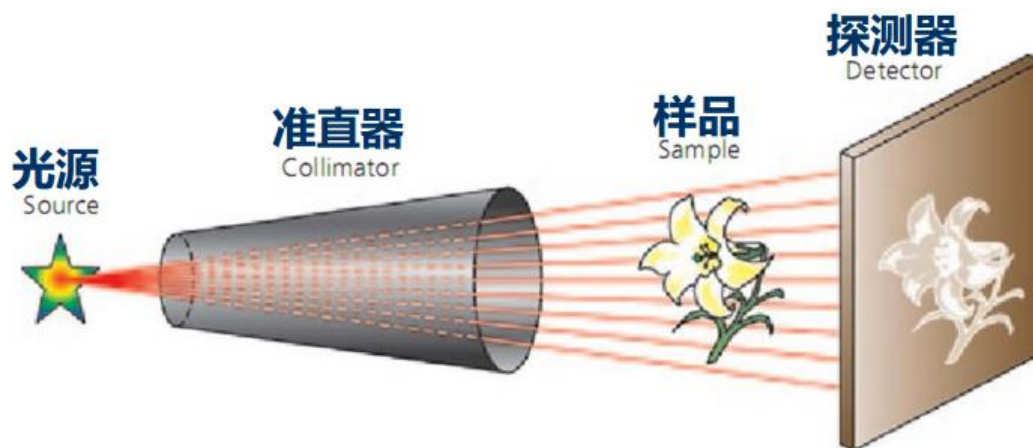


CSNS白光中子源上的共振照相

工作简介

中子照相基本原理

1.基本原理：利用中子束穿过物体时强度上的衰减变化，对被测物体进行透视成相，获取内部结构信息。



2.特点：对轻元素灵敏度高，对重元素穿透性好
核相互作用（X射线与核外电子作用）

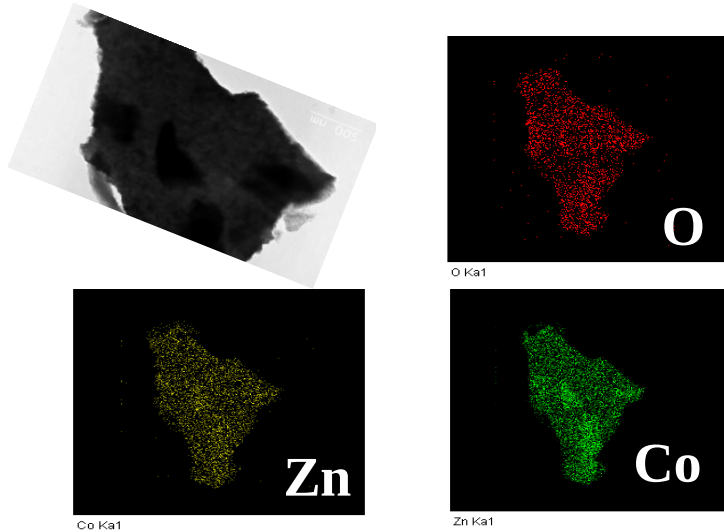
3.应用：含氢材料检测
高密度材料包层内结构或缺陷检测
鉴别原子序数相近或同位素材料

白光中子共振成像简介

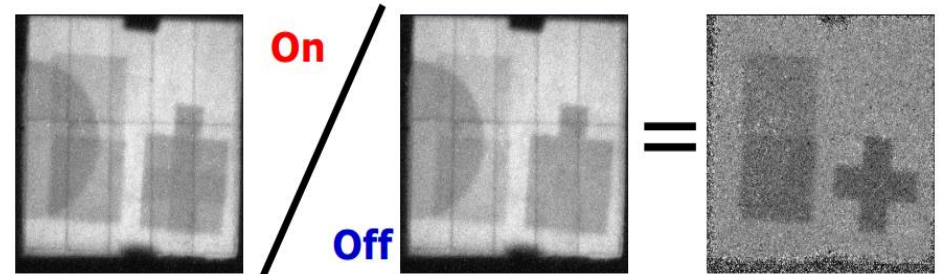
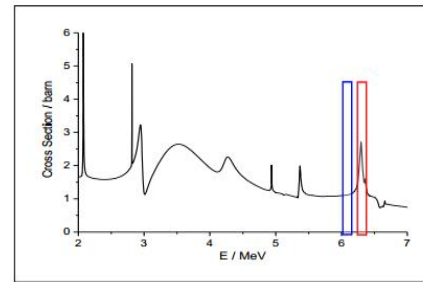
1.白光中子共振成像目标:

技术目标: 在保证一定位置分辨（如小于1mm）基础上获得每个像素点的中子时间谱

物理目标: 获得样品的透射轮廓，由什么元素组成，每种共振元素的分布情况

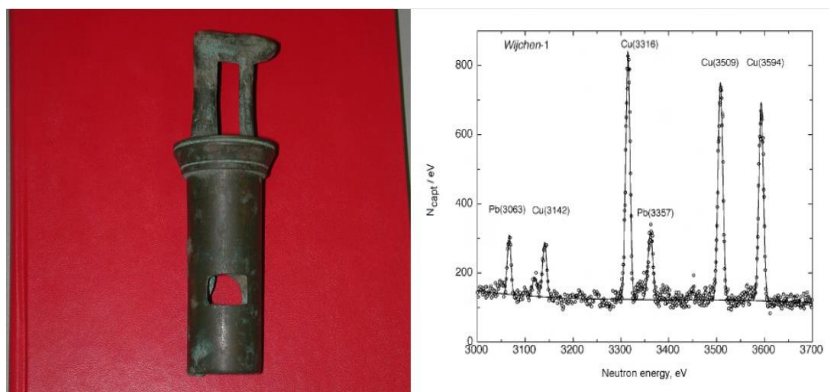


元素Mapping



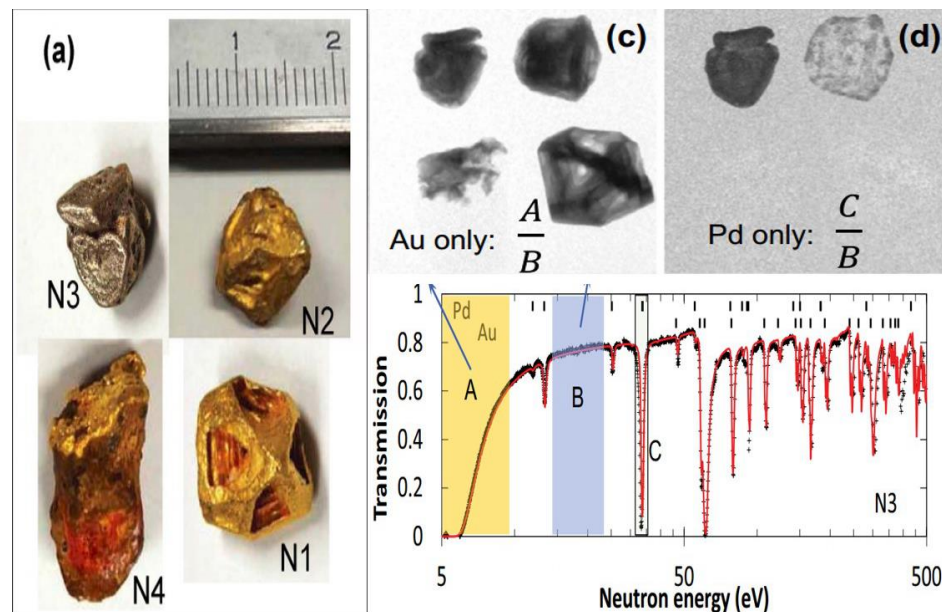
例如: 在C、Al、Cu等混合材料中可以利用C元素的快中子共振峰将其单独检测出来并对C元素分布情况进行单独成像

中子共振成像研究的意义



考古：（上）罗马出土的水龙头（左）及其
中子共振核素分析结果

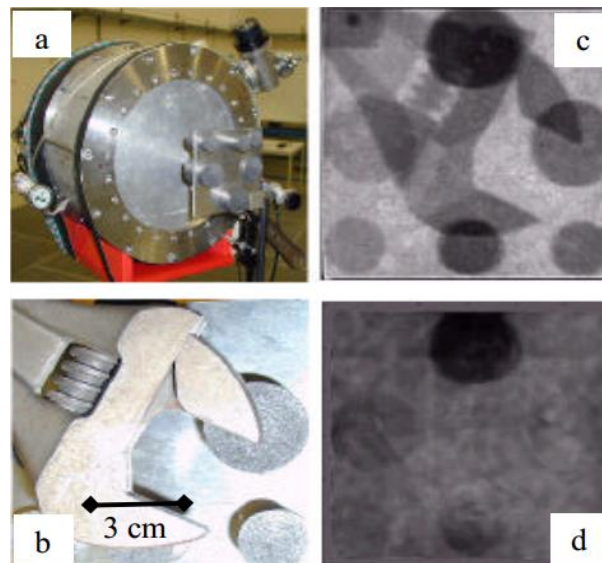
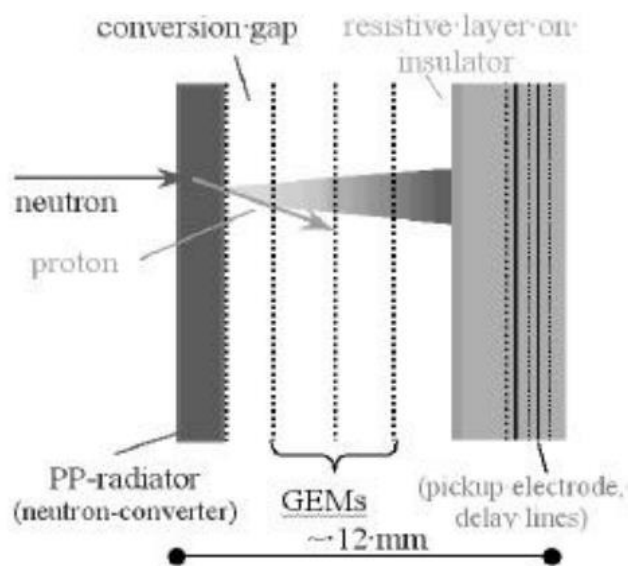
冶金：（右）天然金样品中的Au、Pb元素
含量和位置分析



研究价值和意义：可以给出比透射照相更多的被检测物信息，在材料科学、核工业、新能源、考古、冶金、医疗、安检等工业和社会领域有广阔应用前景，特别是在检测放射性同位素、原子序数相近材料、含氢材料、重金属组件和大尺寸部件等方面独具优势。

中子共振成像发展

1. 利用位置灵敏气体探测器开展带有时间分辨的中子成像研究：



2015年Dangendorf等人利用GEM探测器尝试快中子共振成像，获得了较好的透射图谱，但C元素分布图像表现模糊

关键技术问题： 中子转换层效率太低，单像素点的能谱测量需要时间太长

2. Li玻璃+多阳极光电倍增管用于中子共振成像：

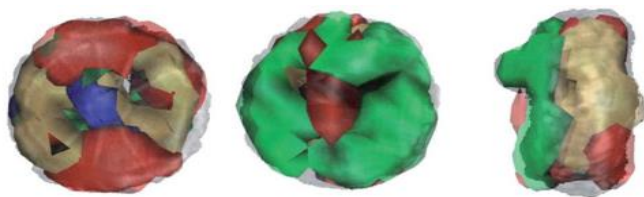


Fig. 6 Top part: Neutron tomography (previous result¹⁷). Bottom part: 3D visualization of the elements in the fibula (isosurface color map: Cu = green, Fe = red, Au = yellow, Ag = blue).

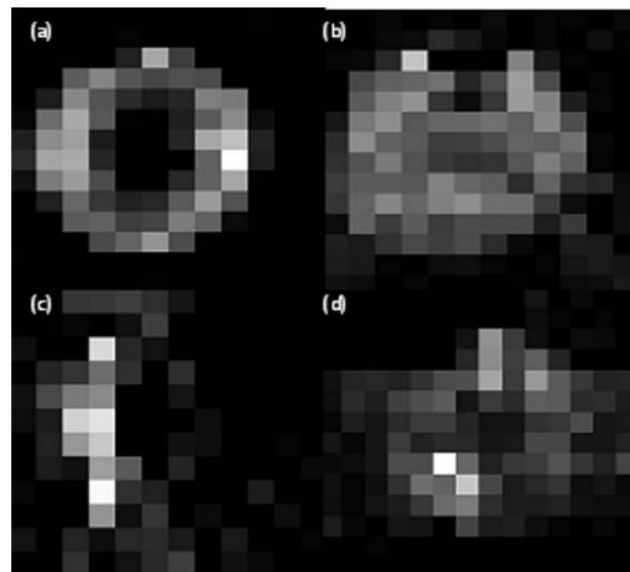
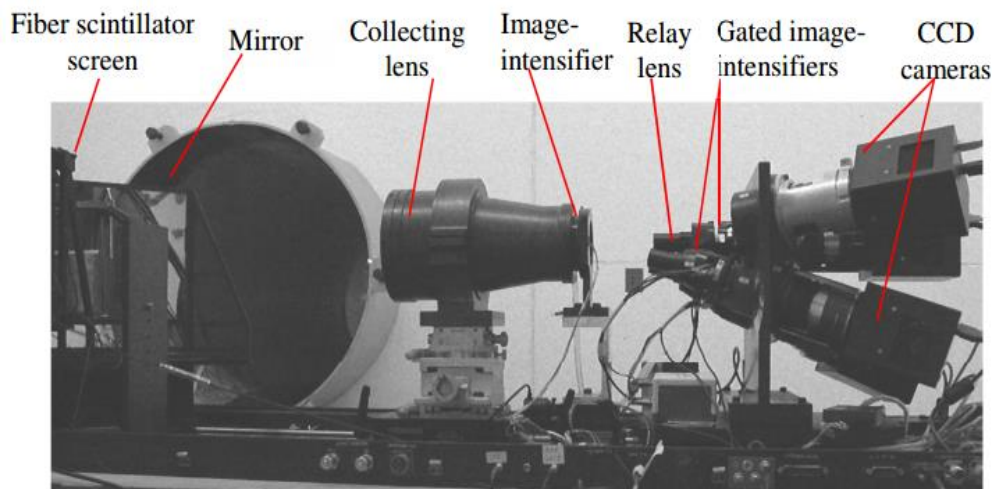


Fig. 5 Slice of copper (a), gold (b), silver (c), iron and (d) data sets obtained from the reconstruction process.

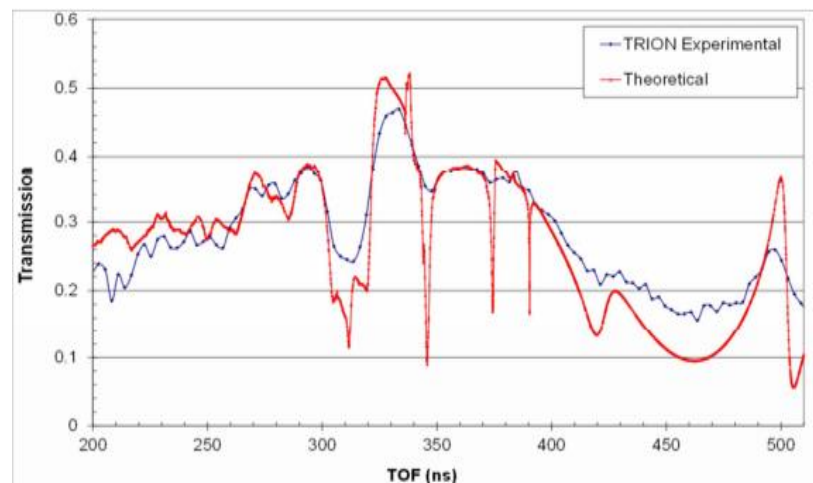
2015年ISIS有人利用Li玻璃+多阳极光电倍增管（16×16路）对合金样品进行元素位置分辨成像，

关键技术问题：位置分辨差（极限~3mm），光纤阵列引出光子的难度和成本较高

3. iCCD(CMOS)相机用于快中子共振成像:



4个相机，爆炸物检测：CNHO



石墨样品的实验和模拟对比

2014年德国PTB有人利用CCD相机快门延迟和门宽选择对石墨样品进行快中子共振成像研究，结合事例型像增强器获得较好效果。

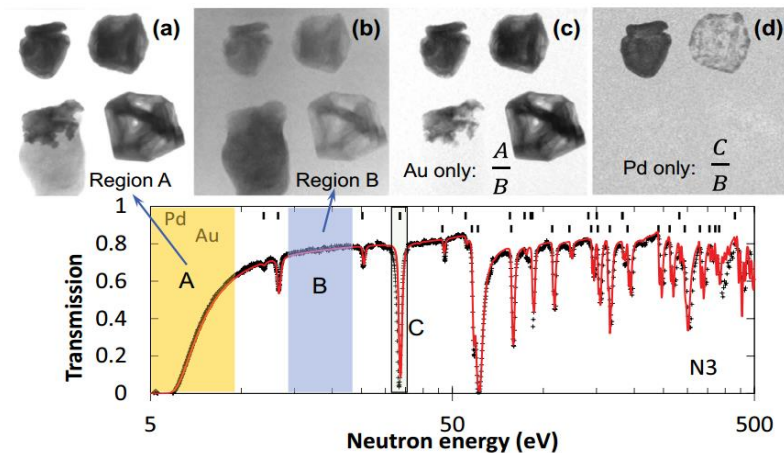
利用CCD相机可以进行选能区中子共振成像，但是

关键技术问题：针对每个核素单独多次成像效率较低，不利于成分复杂样品

4. 中子敏感MCP+Timepix芯片读出用于超热中子区共振成像：



四块来自砂矿床的天然金样品



分别对成分Au、Pb位置分辨成像

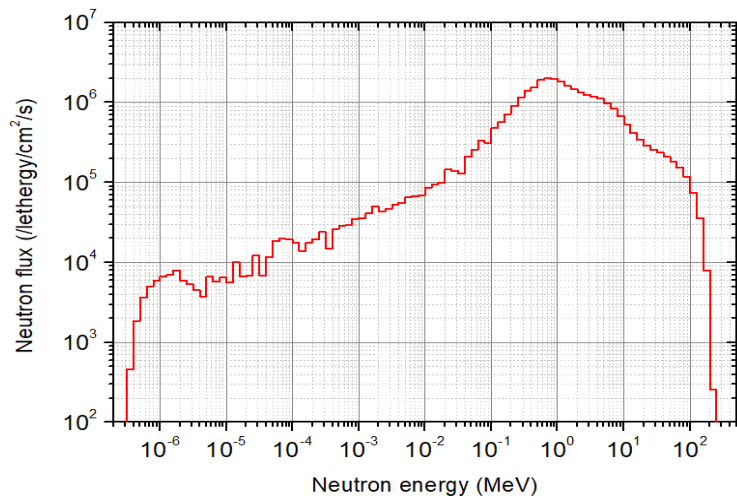
2017年Tremisn等人（J-PARC）利用eV能区共振峰成功实现对含铅金块中的金和铅元素分别成像，位置分辨达到55 μm ，像素数目达到512 $\times$ 512个

MCP+Timepix是目前最前沿的中子共振成像技术，但是其成功案例目前仅限于超热中子能区（<100eV）

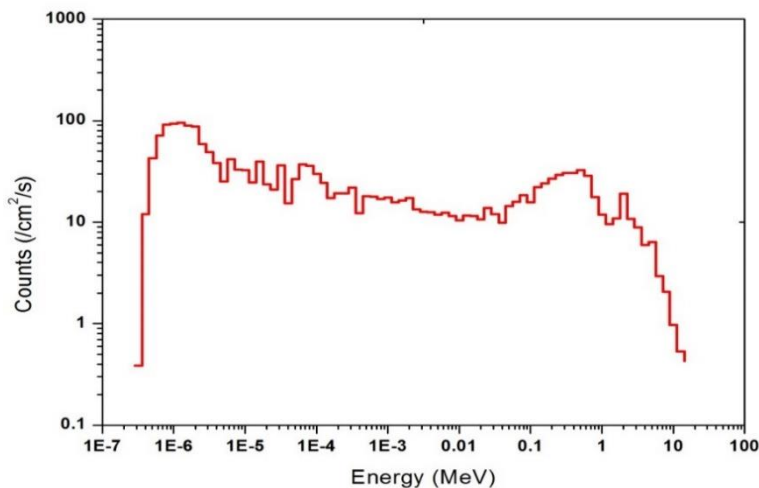
关键技术问题： 受限于中子源在中高能区的流强；Timepix芯片抗辐照问题

CSNS白光中子源上开展中子共振照相的优势

中子共振照相要求获得每个像素点上的能谱信息，对中子源流强的要求非常高，这也是制约Timepix方案向快中子区发展的关键因素之一。由于世界上缺少可用的强流中子源，快中子区共振照相难度很大。



Back-n中子能谱



10B中子探测效率曲线

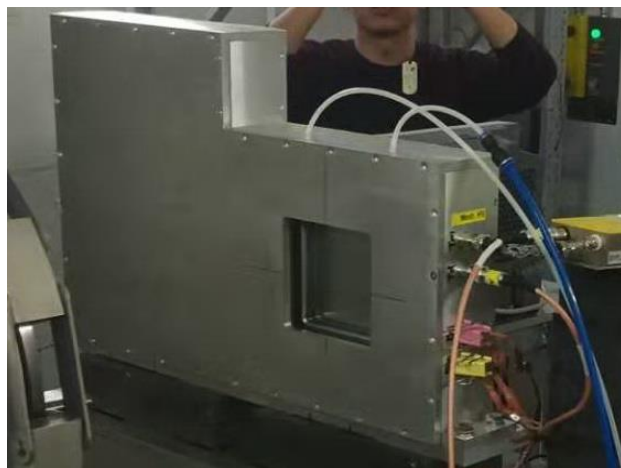
Back-n能谱具有注量率随中子能量指数上升的优点，从而弥补了中子探测效率指数下降的趋势，可以保持足够高的中子探测计数率直到1MeV以上，因而具备开展全能区中子共振成像的实际可行性。

CSNS白光中子源其它优势

1. 可运行在单束团和短束团模式——分辨小于3.5ns，满足几乎全部特征核素测量
2. 足够长的中子飞行距离——达到76m，对提高中子能量分辨十分有利
3. 25Hz的脉冲频率——保证每发中子束团都不会受相邻束团干扰
4. 90×90mm大束斑模式——专门为中子照相需求设计
5. γ -flash定时——精度高于其它方法（不需要做延迟修正）

Back-n上的中子共振照相探索

1. 组内开展的共振成像探索实验：Micromegas探测器用于成像实验研究

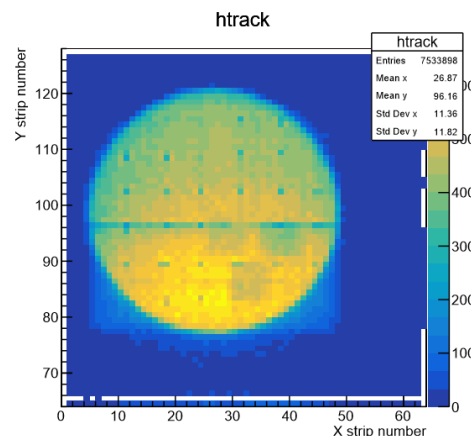


Micromegas探测器布局
位置分辨：~1mm

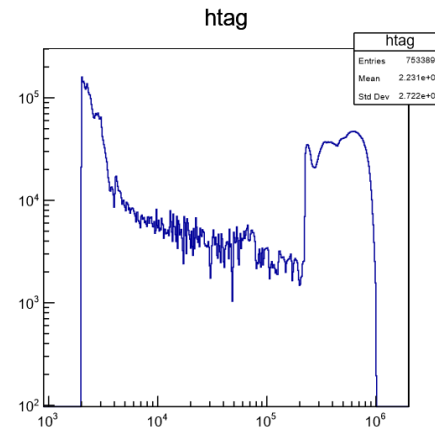
样品：Ag In W

效果：选取共振区可以对元素单独成像

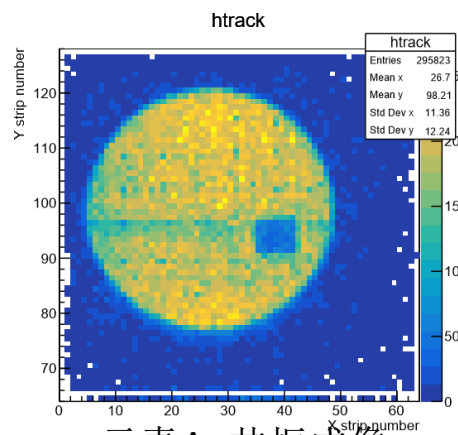
不足：探测效率低



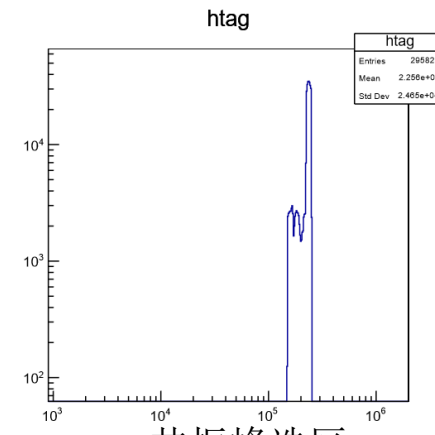
元素透射成像



中子TOF谱

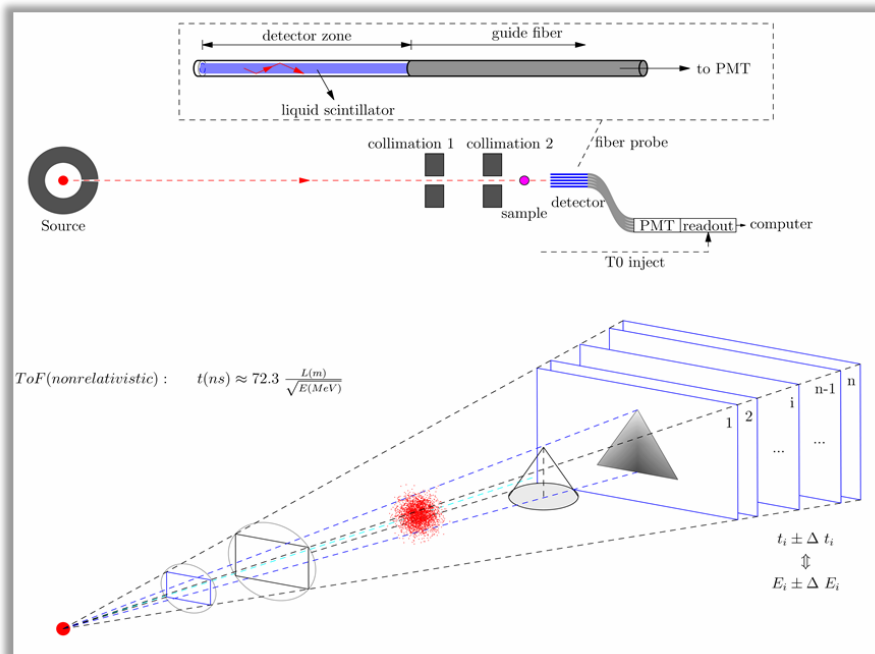


元素Ag共振成像

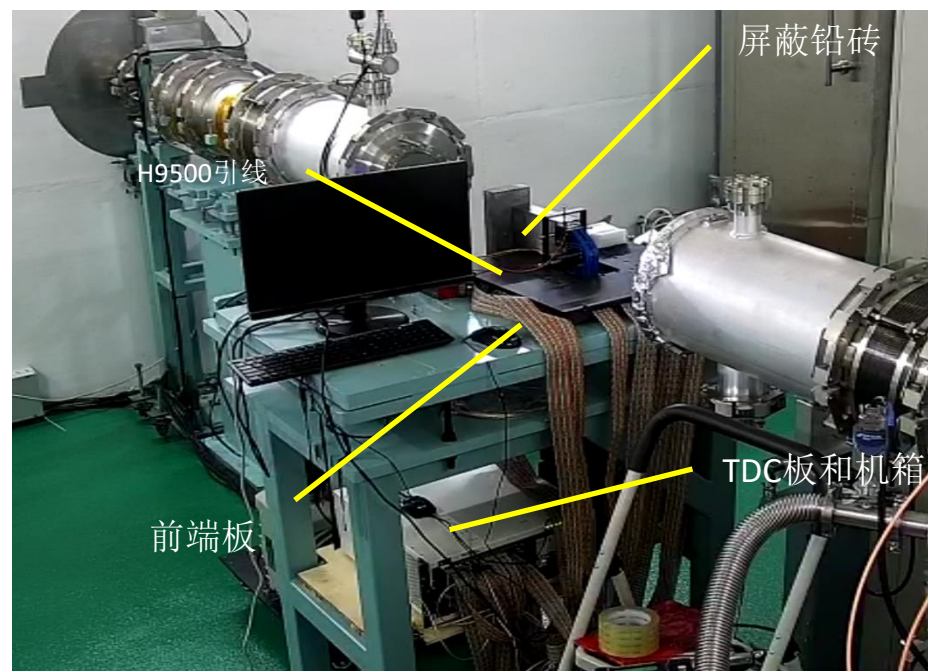


共振峰选区

2. Li玻璃+多阳极光电倍增管（闪烁丝方案的初步实验）

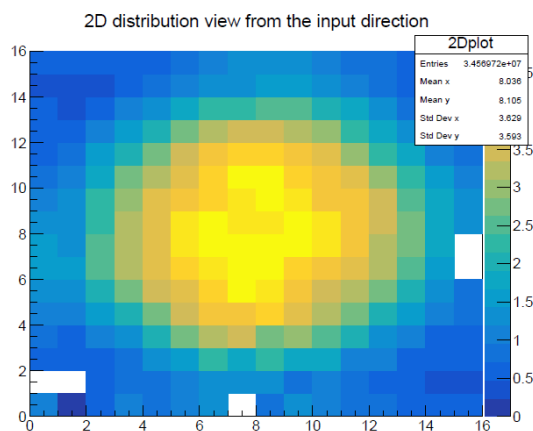


闪烁光纤阵列结构原理

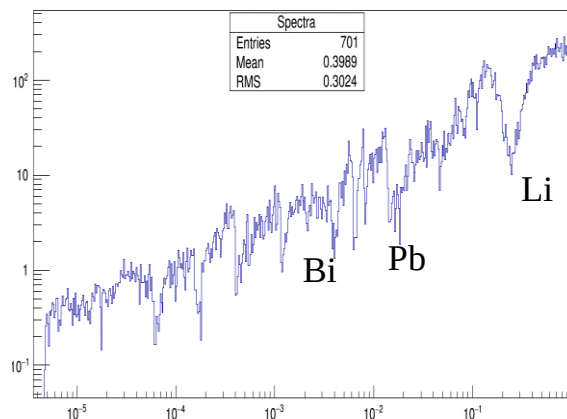


Li玻璃+多阳极光电倍增管实验布局

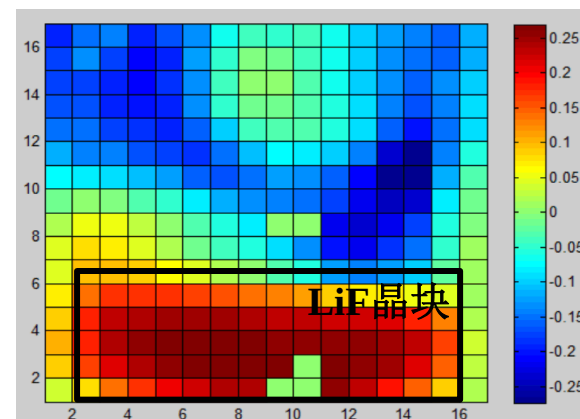
实验结果:



Back-n的 $\Phi 30$ 束斑轮廓



束斑内的核素共振峰



Li样品透射成像轮廓

Li玻璃具有较高的中子探测效率，与多阳极PMT配合直接置于束流中。测到了30束斑轮廓、束线内样品共振峰、方块样品体现出大体轮廓

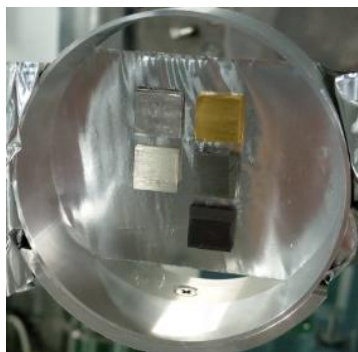
仍存在的问题：位置分辨较差

利用光纤或反射镜可以避免PMT直接被辐照，目前正在实验探索中。

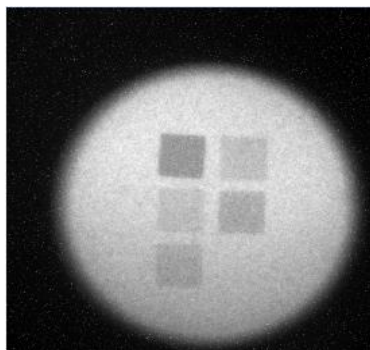
3. iCCD (CMOS) 相机用于中子共振照相实验

样品实物:

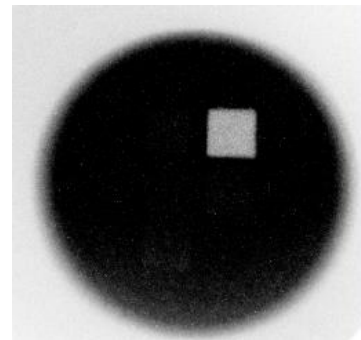
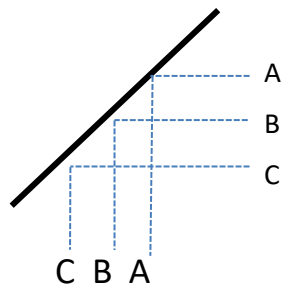
Au、Ag、W、Ta、In



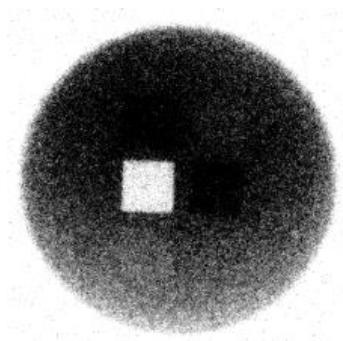
普通透射照相



光路原理:



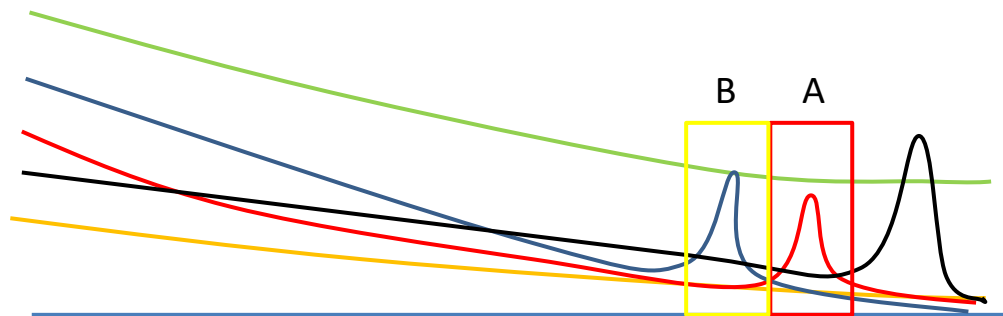
共振核素检出: In



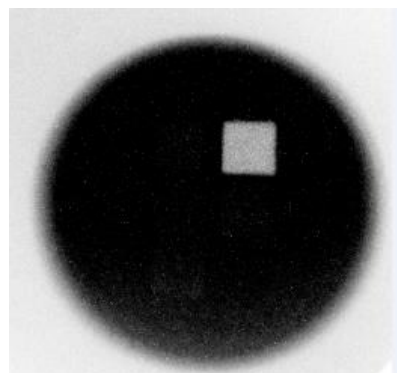
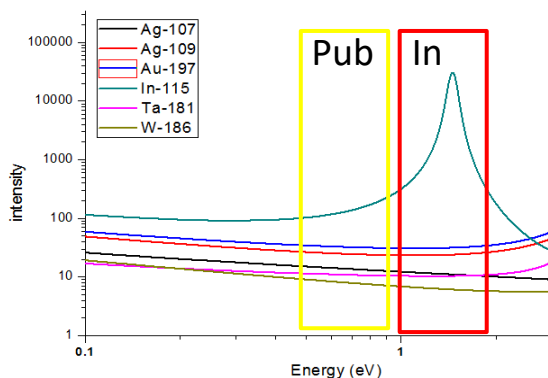
共振核素检出: W

利用CCD相机快门延迟和门宽, 检出W、In、Ag、Au等核素位置分布

核素检出基本思路:



例如:



In核素共振峰检出: [Pub] - [In]

$$-\ln \left(\frac{I_x}{I_{air}} \right) = N_a \cdot \sigma_a(E) \cdot x_a,$$

$$\begin{pmatrix} \sigma_a^1 & \sigma_b^1 & \sigma_c^1 & \sigma_d^1 \\ \sigma_a^2 & \sigma_b^2 & \sigma_c^2 & \sigma_d^2 \\ \sigma_a^3 & \sigma_b^3 & \sigma_c^3 & \sigma_d^3 \\ \sigma_a^4 & \sigma_b^4 & \sigma_c^4 & \sigma_d^4 \\ \sigma_a^5 & \sigma_b^5 & \sigma_c^5 & \sigma_d^5 \\ \sigma_a^6 & \sigma_b^6 & \sigma_c^6 & \sigma_d^6 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \chi_a \\ \chi_b \\ \chi_c \\ \chi_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b^1 \\ b^2 \\ b^3 \\ b^4 \\ b^5 \\ b^6 \end{pmatrix}.$$

为什么一定要扣减相邻区域:

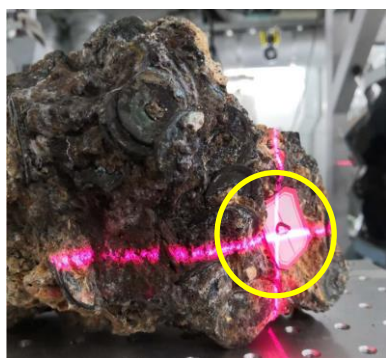
相邻区域的中子通量、截面值、单位事例光产额基本接近, 微修正不会造成结果偏差。不相邻区域中子数量级不匹配会带来本底处理困难

共振照相应用于文物考古-基金重点项目

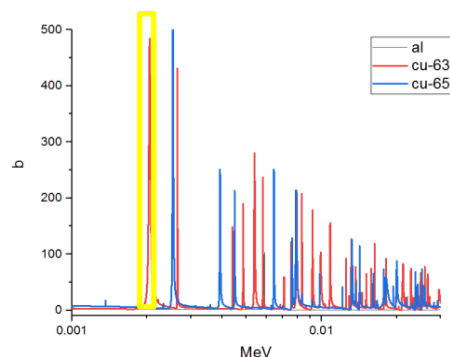
1. 南海文物照相实验

(注：即中科大科技考古系提供的南海出土的铜钱、泥沙形成的海洋凝结物)

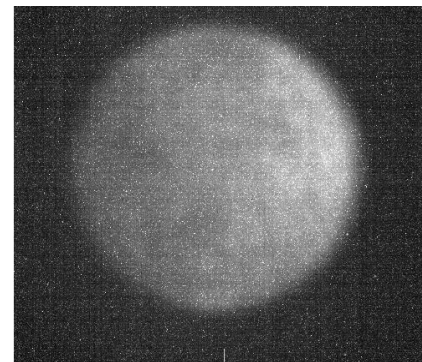
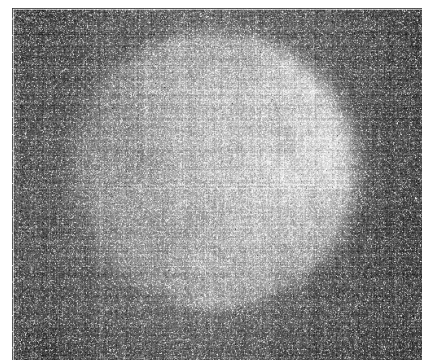
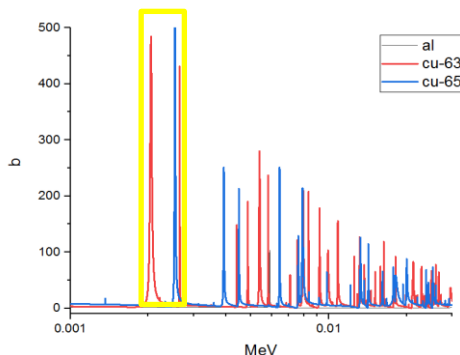
实验目标：选特定位置，古铜钱共振成像效果



一半区域覆铜



铜共振峰：信号本底比约0.1:1，与测量时间长短无关



结论：共振峰能区高，峰宽小，信噪比太差； γ 影响不大；实验未达到预期效果

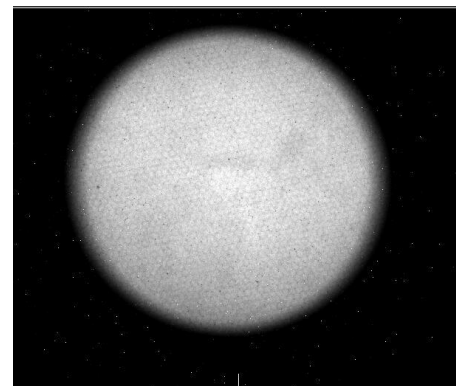
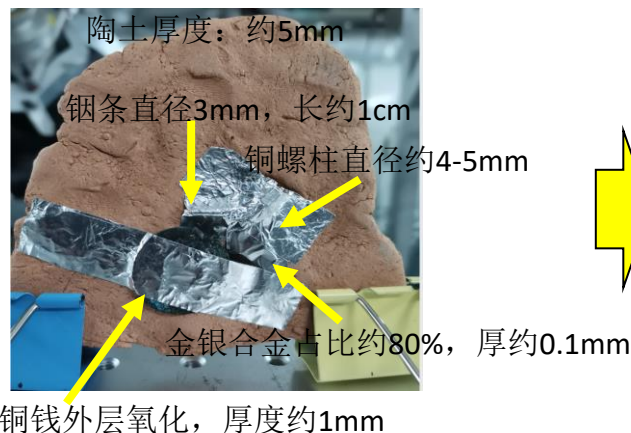
2. 陶土包裹物&模拟简单文物共振照相实验

(为探索共振成像原理和方法, 我们简化了样品)

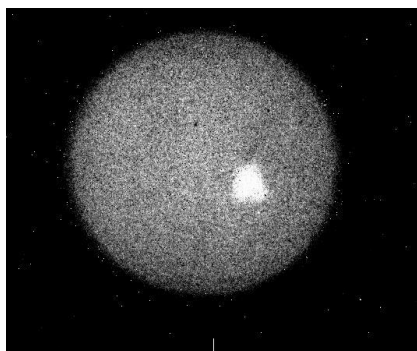
考古中的常见金属:

金、银、铜

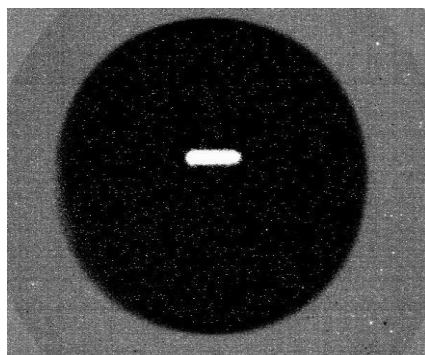
钼仅作为标定和对比



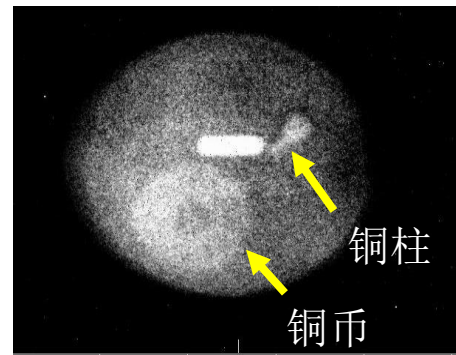
透射照相: 图像模糊不清



2-5eV 金银合金共振成像



0.5-2eV 钼共振成像



eV-keV 区铜样品共振成像

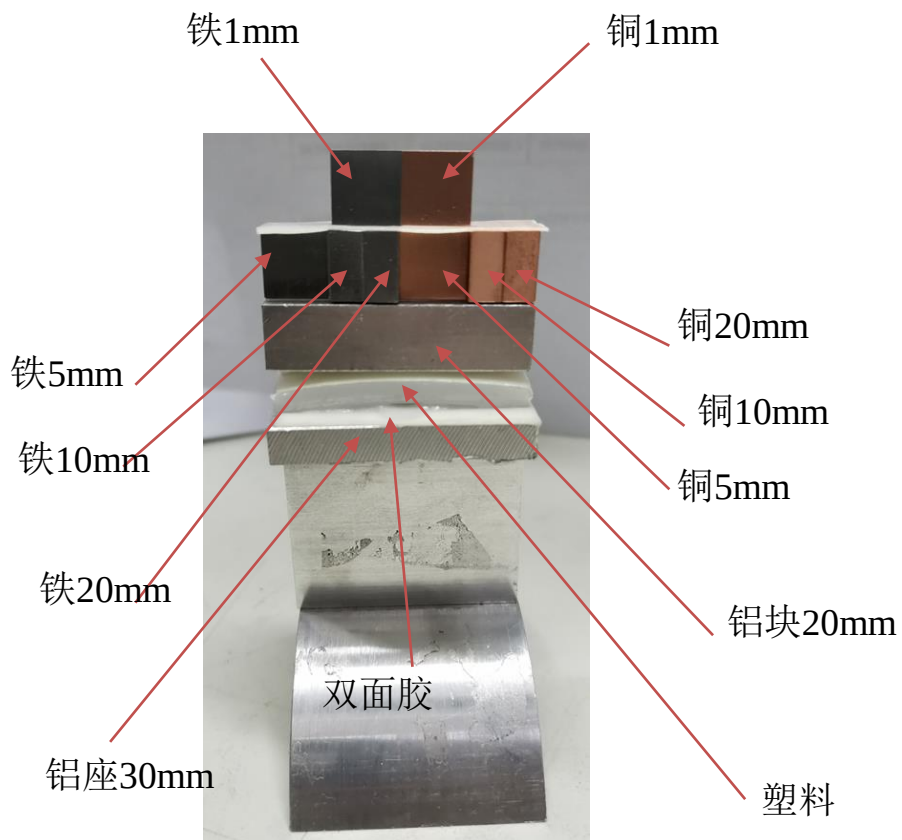
金银(易)检出下限做到了**0.1mm**

首次看到铜样品(难)轮廓被清晰检出

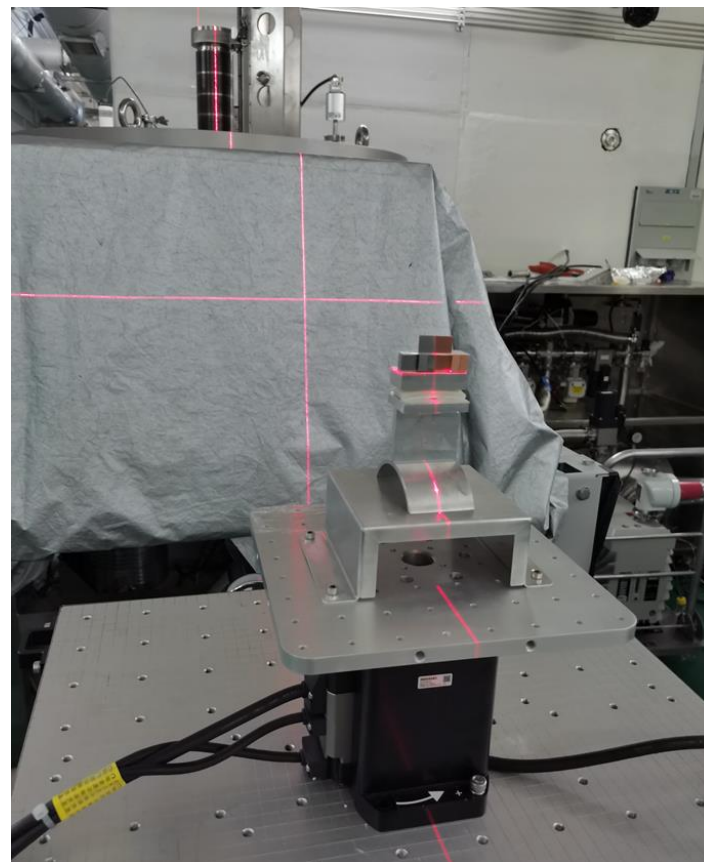
Cu元素检出利用了eV区超热中子图像与全能谱中子图像线性扣减

3. Cu、Fe、Al样品的共振区分实验

践行思路：抛弃细小的共振峰，利用范围更宽的不同样品的截面数据谱差异成像

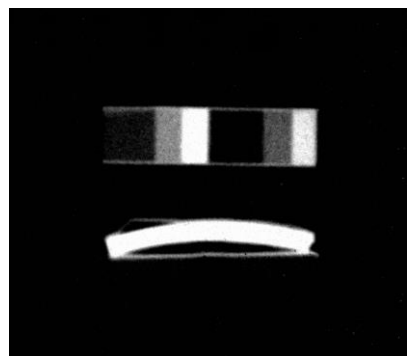


样品分布

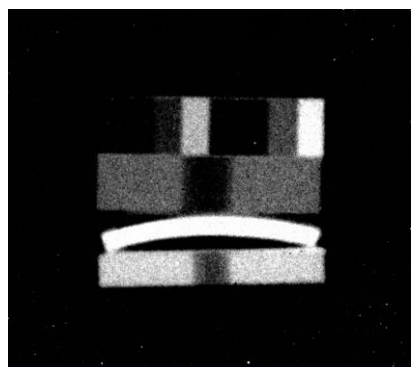


实验布局

(1) Cu、Fe共振区分



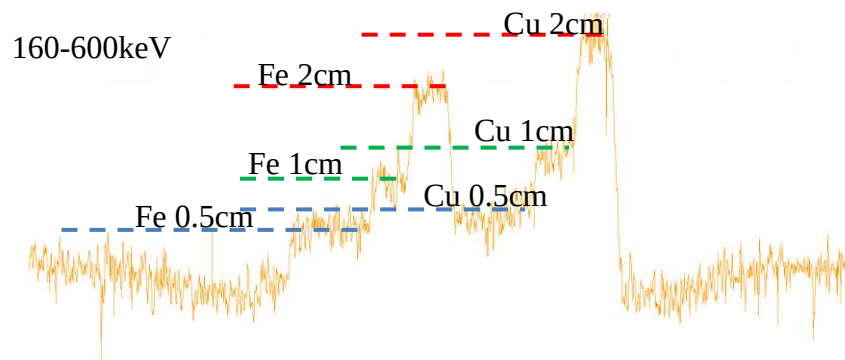
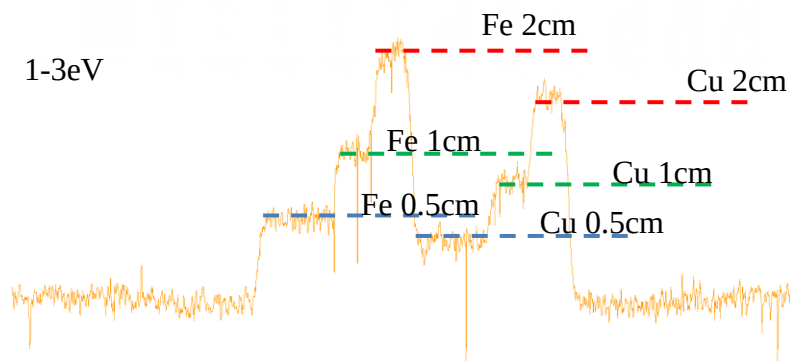
1-3eV: Fe区域较亮



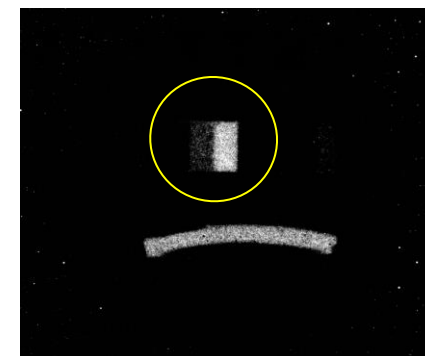
600keV: Cu区域较亮



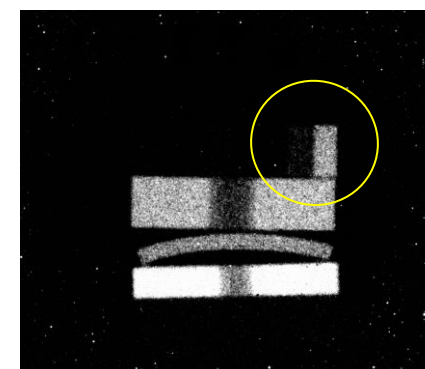
两图有明显反差



数据对比反差更明显



归一扣减: 有Fe无Cu

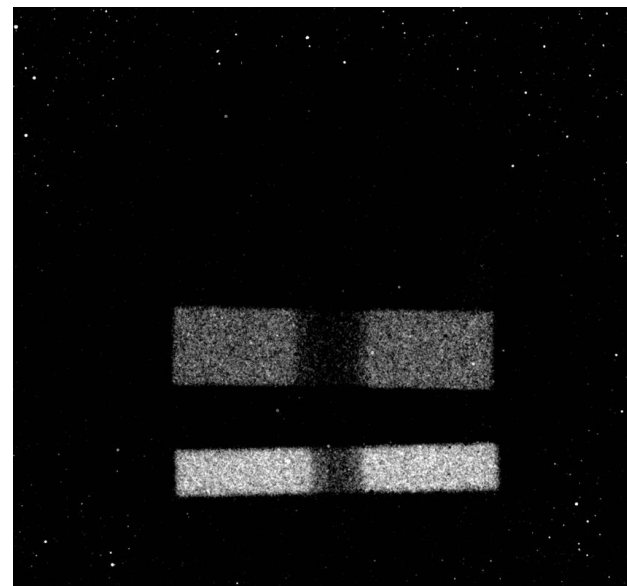
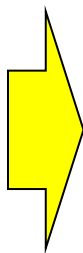
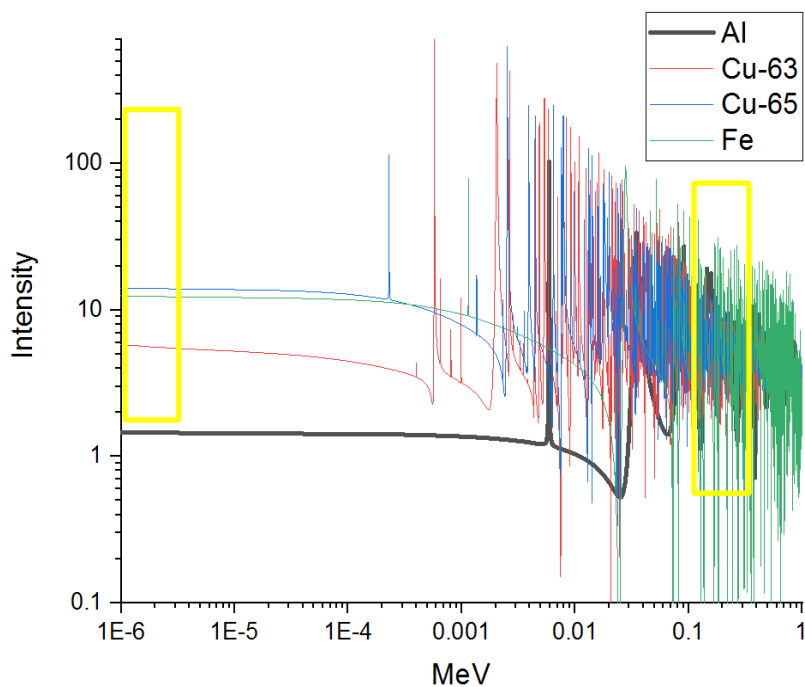


归一扣减: 有Cu无Fe



不同处理, Fe、Cu得到很好的区分

(2) Al元素单独成像



归一扣减：仅有Al

采用相同方法，其它区域归一后处理数据，Al元素单独成像效果远好于共振峰检出

4. 模拟考古套箱中子透射成像（用户合作实验）

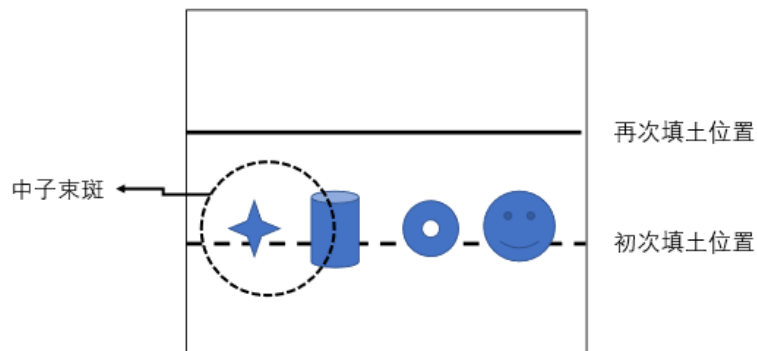
意义：考古套箱是文物出土时常用的保护手段，清理文物前预知套箱内文物状态和分布十分重要。考古学家曾使用X射线透视但效果不佳。

样品：

古铜币

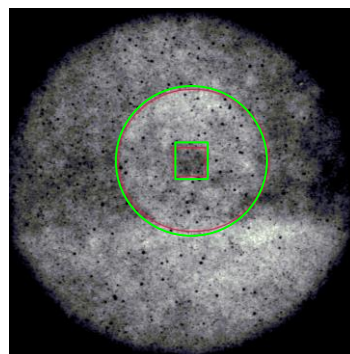
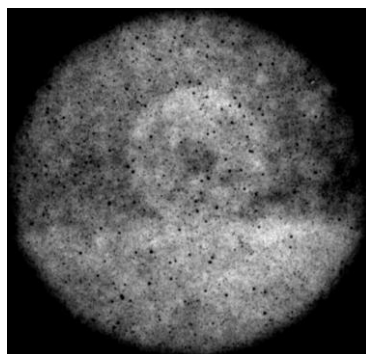
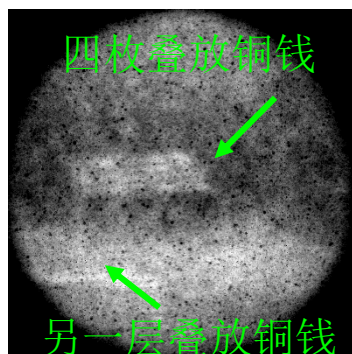
商墟羊骨、牙齿

陶片



考古常用中型尺寸套箱：0.5m

古铜币透视成像效果：

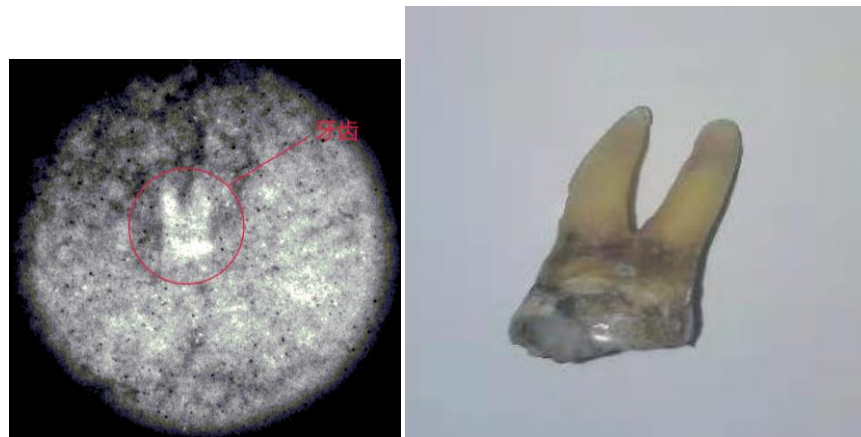


透过0.5m土层，铜钱轮廓和分布形态清晰可见

羊骨样品透视成像效果：



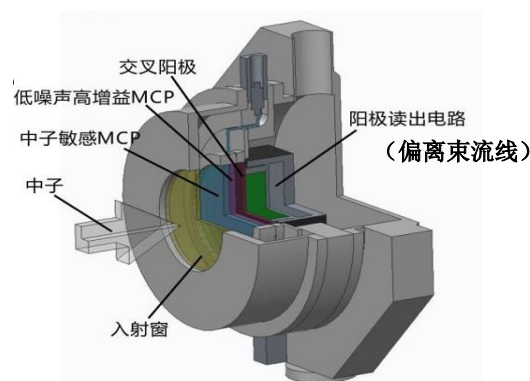
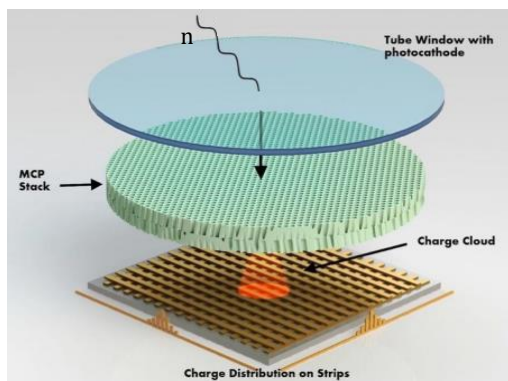
羊骨牙根细节清晰可见



透过10cm土层，人类牙齿可见致密性差异

快中子十分适合大部件的透射成像，小型移动中子源可应用在考古现场

1. 白光中子源的能谱宽、注量率高、时间结构好，是一个非常适合用于中子照相方面研究的中子源。
2. 我们在白光中子源上开展了基于CMOS相机的透射和共振照相探索实验，取得了部分成功。但是CMOS共振照相仍存在困难和不足：例如高能区共振图像信噪比太差、成像时间太长等。
3. 展望白光源上共振成像各种技术路线，我们认为切实可行的新方案即：——掺硼中子MCP探测技术



优势：

1. 中子探测效率高
2. 位置分辨好（极限可达到 $10\mu\text{m}$ 以下）
3. 中子事例型读出
4. 耐辐照（不怕中子束直接照射）
5. 成本、体积、功耗都在可控范围（电子学路数远小于像素读出）

1. 掺硼中子MCP研制方面

高能所课题编号:

E	0	1	1	2	0	1		
---	---	---	---	---	---	---	--	--

密级:

国家自然科学基金 项目合（协）作任务书

项目名称: 白光中子共振成像方法及在文物考古研究中的应用

项目批准号: 12035017

项目委托方（甲方）: 中国科学院高能物理研究所

项目负责人: 唐靖宇

项目受托方（乙方）: 北方夜视技术股份有限公司南京分公司

受托方负责人:

合（协）作起止年限: 2021 年 03 月 至 2023 年 12 月



与北方夜视签署了研发含硼MCP合作协议

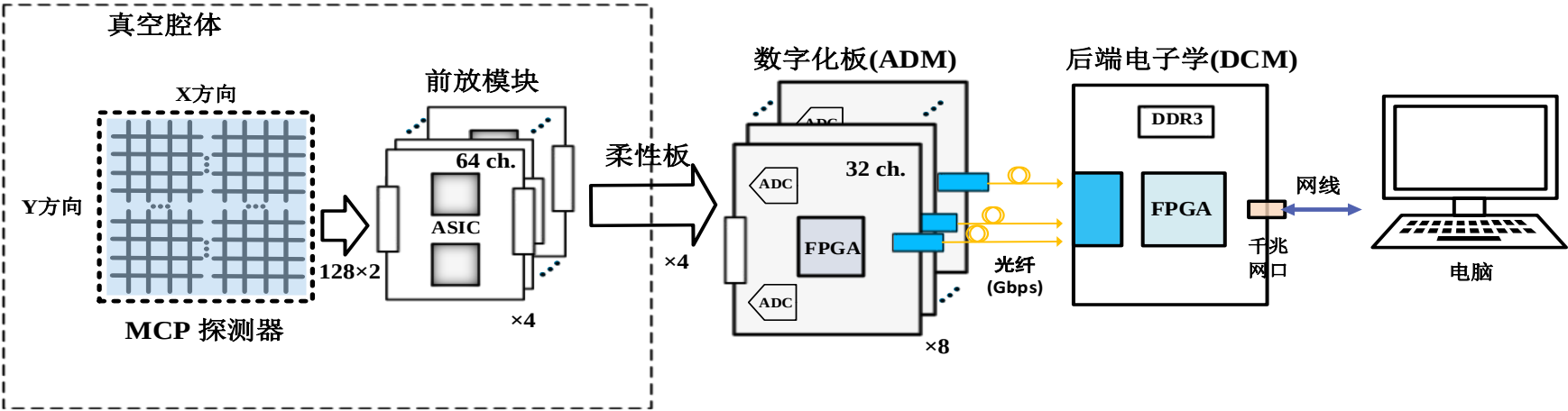
收到了北方夜视多版含硼MCP的样片:
掺杂浓度10、15mol%

2. 读出电子学方面

由中科大核探测与核电子学国家重点实验室封常青老师课题组承担

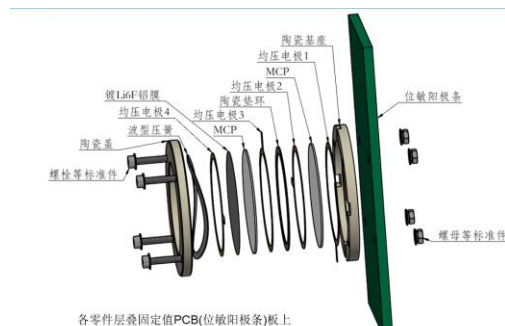
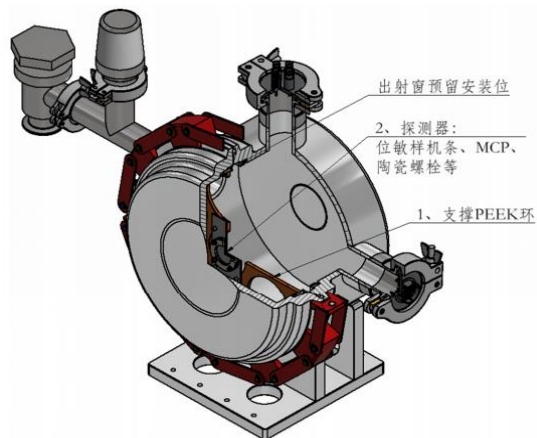
探测器读出需求	电子学需求
X、Y维度各128路阳极信号	真空腔内X、Y方向各128通道
MCP增益 10^5	动态范围 100fC
20MeV能区中子精确共振测量	时间分辨好于10ns（RMS）

采取的方案：



电荷灵敏ASIC + 多通道ADC波形采样+ FPGA实时事例分析处理
(高集成度) (高触发率)

3. 机械设计与加工方面

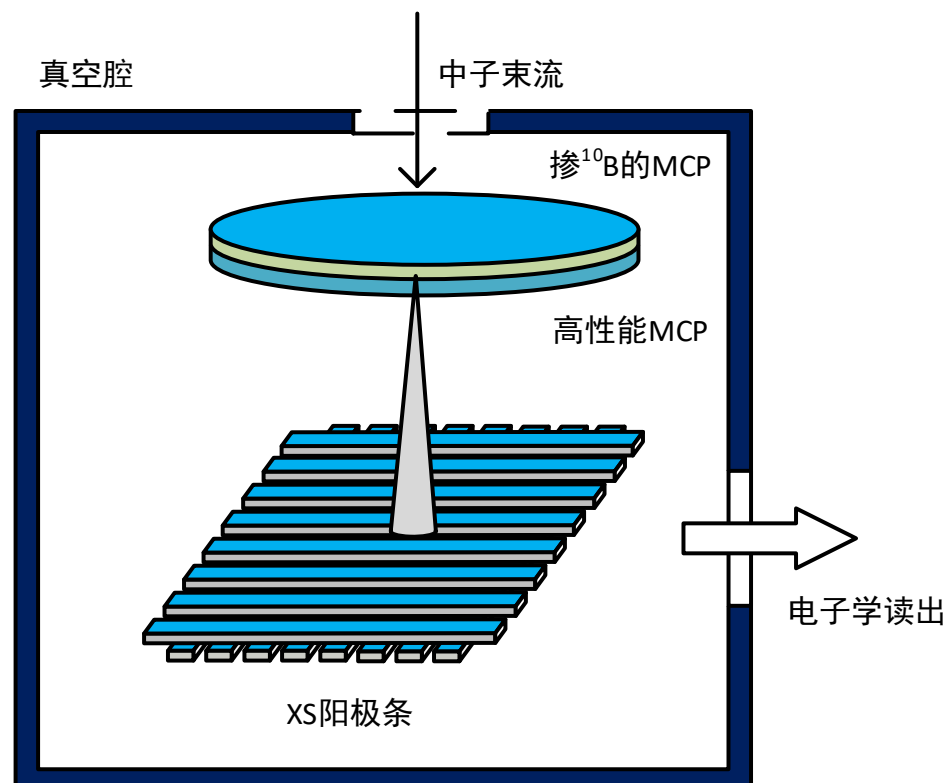


完成了机械腔体、MCP组装结构的设计、加工和抽真空测试

1. 根据科大电子学方案和MCP尺寸设计加工一套真空靶室
2. 目前由科焊加工的真空靶室完成真空度测试 $1.4 \times 10^{-5} \text{pa}$

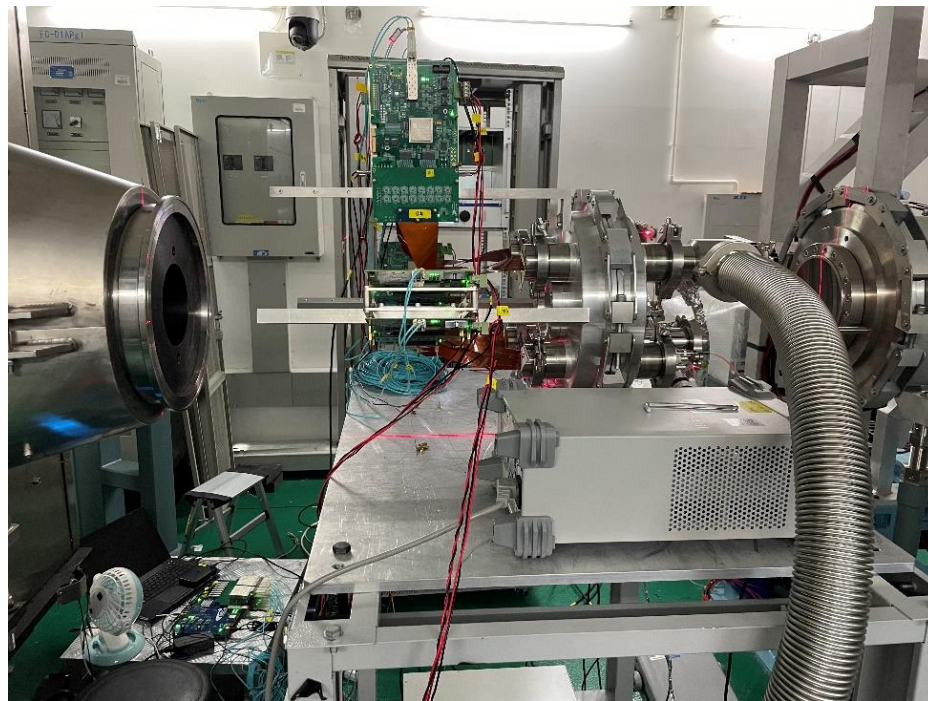
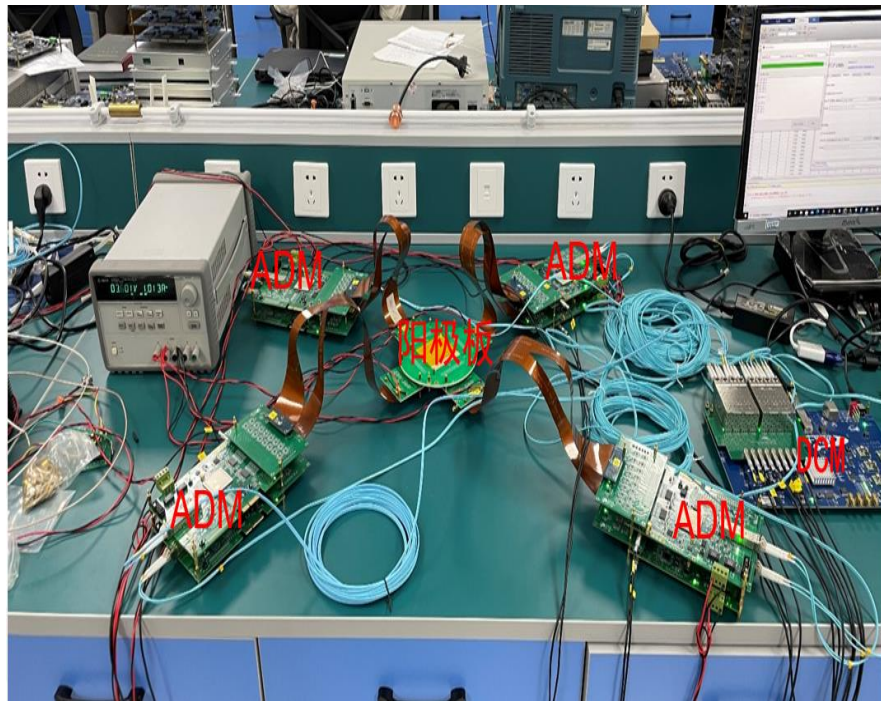
中子敏感MCP成像探测器和电子学联合测试

——2022年2月首次测试；6月第二次测试；2023年6月第三次测试

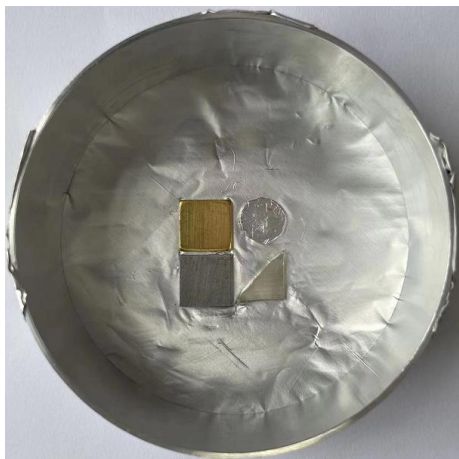


中子敏感MCP+交叉阳极条

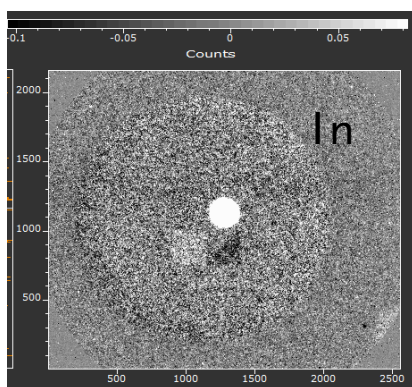
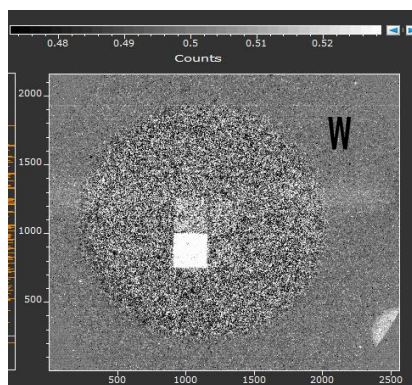
电子学整体照片和测试现场



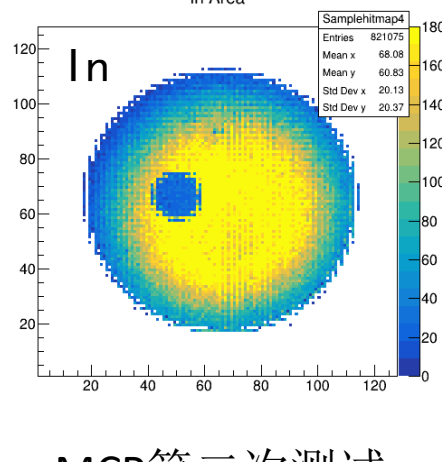
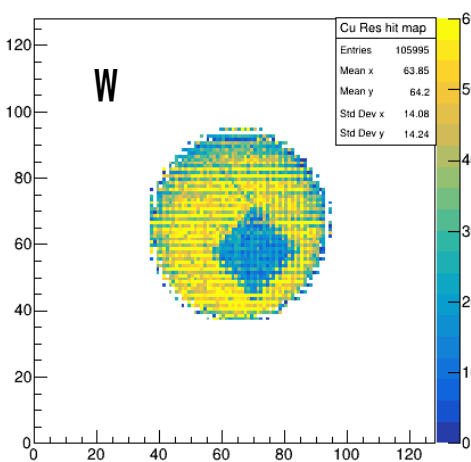
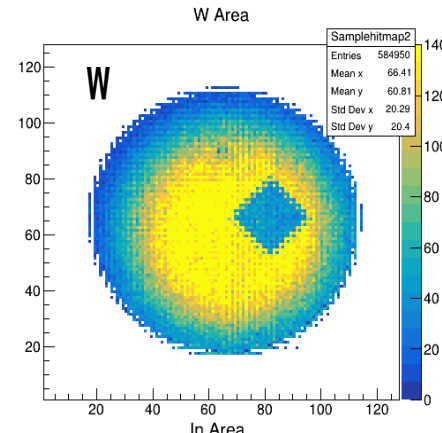
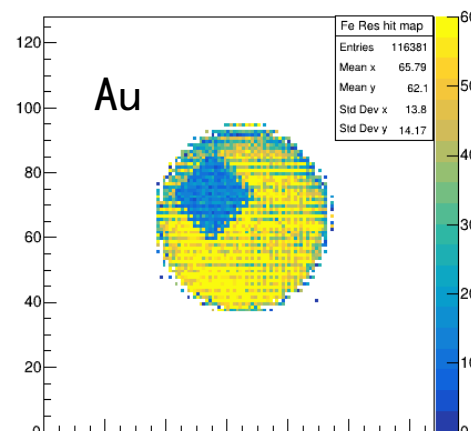
束斑与成像测试：eV共振核素Au、Ag、W等的成像



样品照片



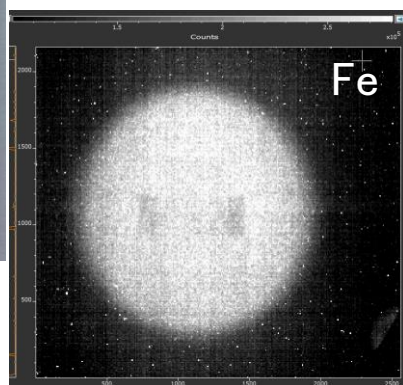
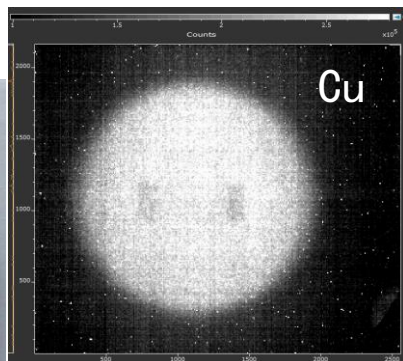
CMOS



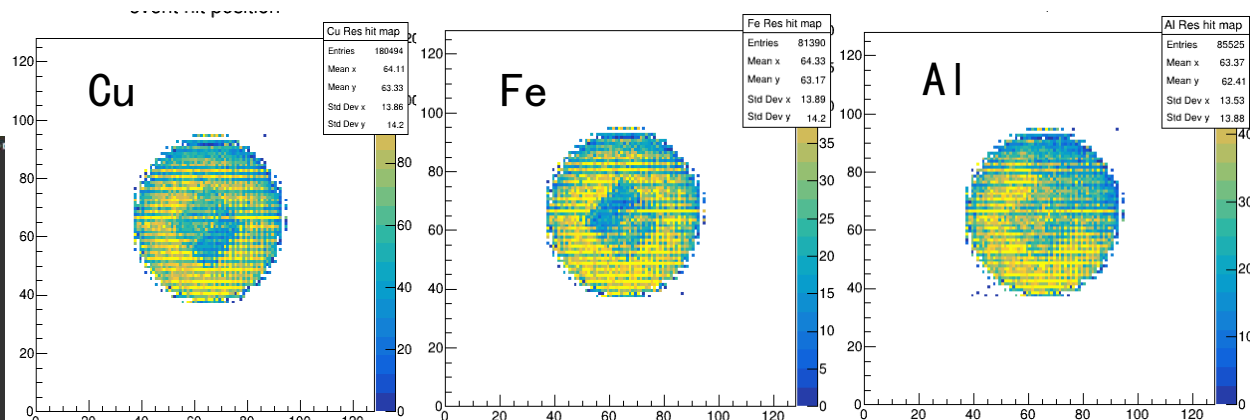
MCP第一次测试

MCP第二次测试

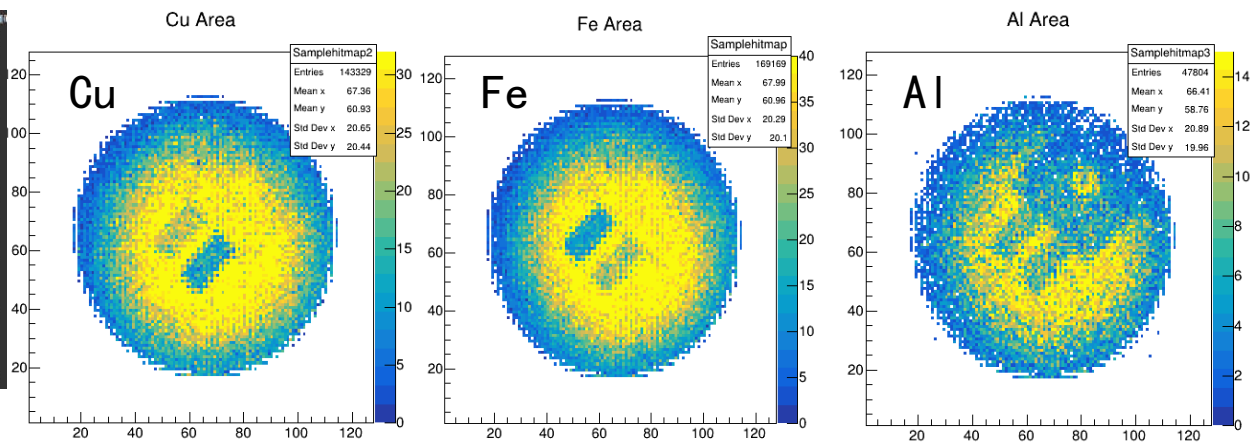
束斑与成像测试：KeV共振核素Cu、Fe、Al等的成像



CMOS



MCP第一次测试



MCP第二次测试

用MCP初步实现了CMOS难以做到的Cu、Fe、Al共振峰识别成像