



中子技术在文物和考古方面的应用

唐靖宇 中国科大

2025年07月23-25日，安徽六安

第9届Back-n用户研讨会暨文物考古应用会



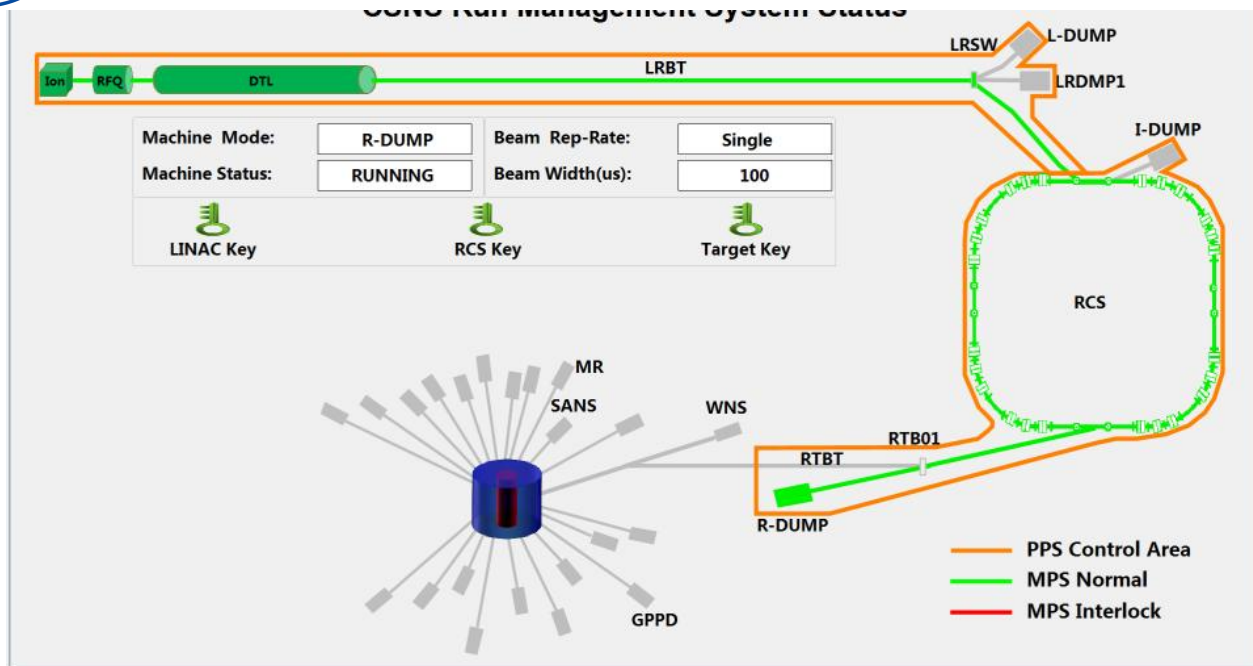
报告提纲



- 中国散裂中子源和反角白光中子源简介
- 中子技术在文物考古研究中的应用
- Back-n开展文物研究现状和前景
- 总结



中国散裂中子源 (CSNS)

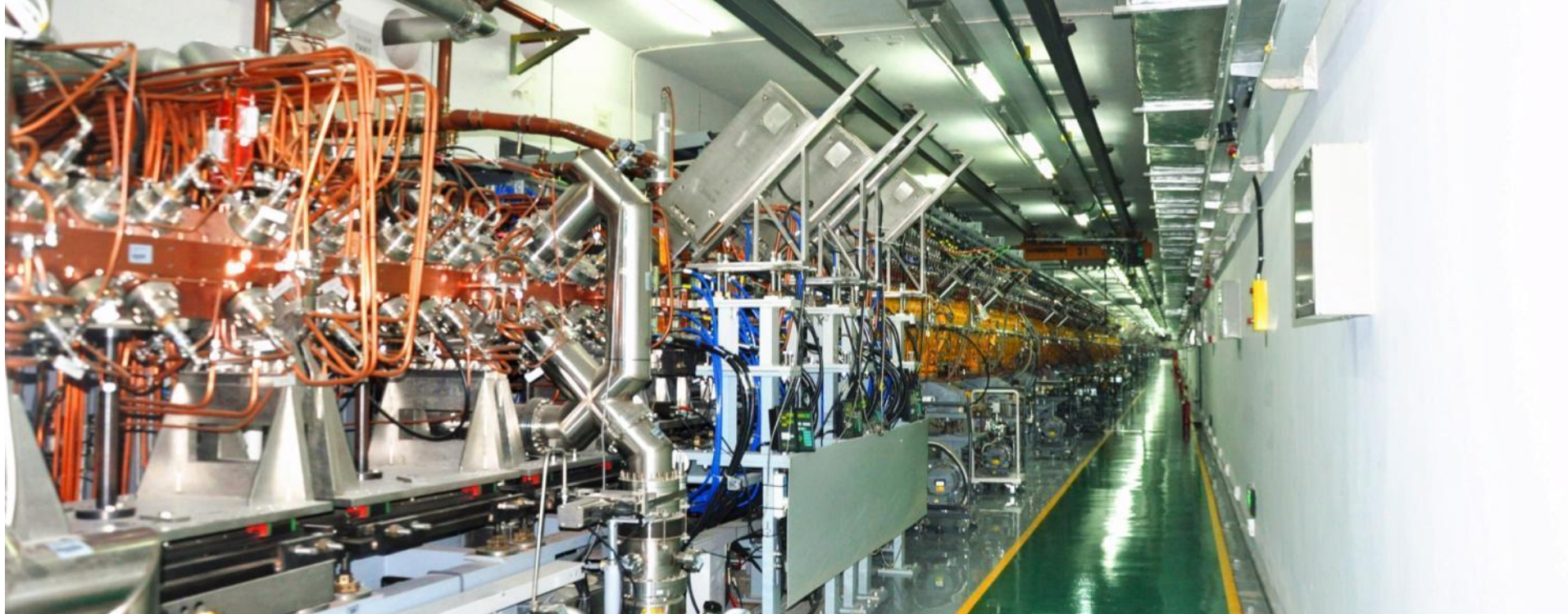


- 设计束流功率：一期100 kW, 升级工程500 kW。
- 项目投资：18.7亿元(国家)+地方配套。
- 2017年出束-联合调试，2018年5月投入运行。目前打靶束流功率170 kW

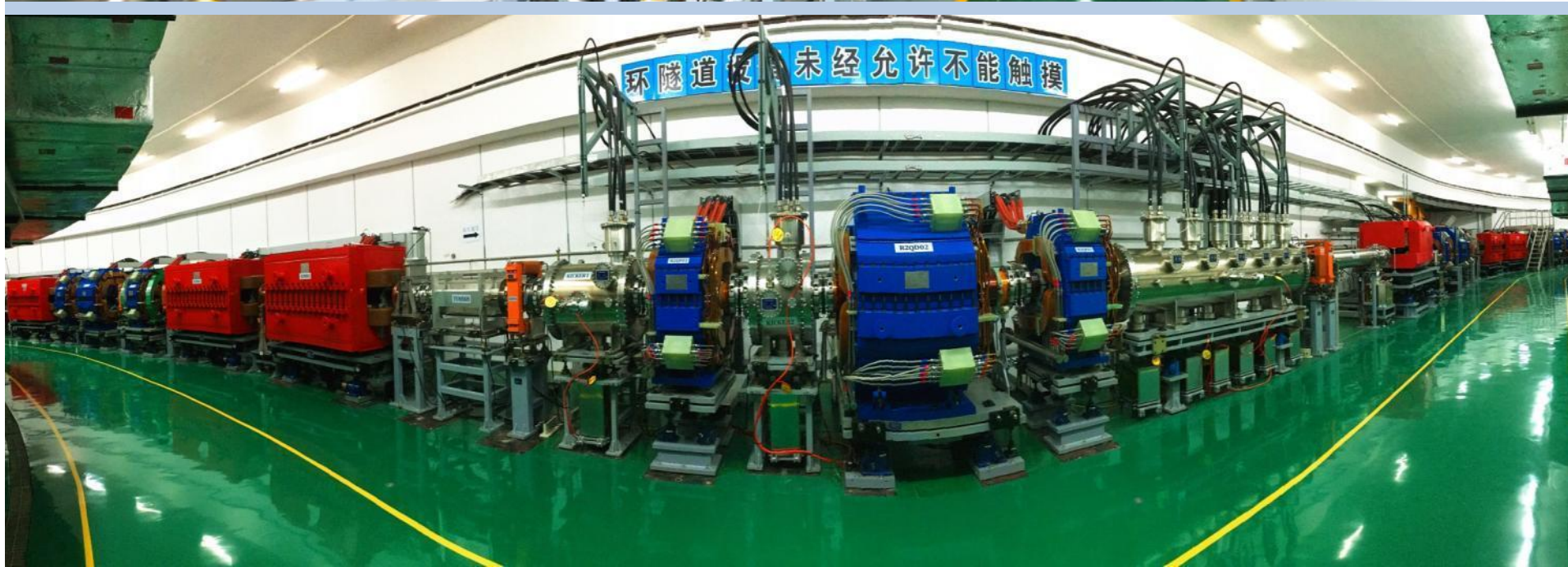
CSNS是一台基于高功率质子加速器的、多学科研究的大型科学研究装置，主要开展基于中子散射技术的多学科应用，也兼顾开展其他应用

- 一期建设：3台中子散射谱仪（设计为19+1台）【另建了8台共建谱仪】
- 反角白光中子源(Back-n)：多单位共建，与CSNS同时建成
- 二期工程：2024年3月正式启动，500 kW，预计2029年底建成





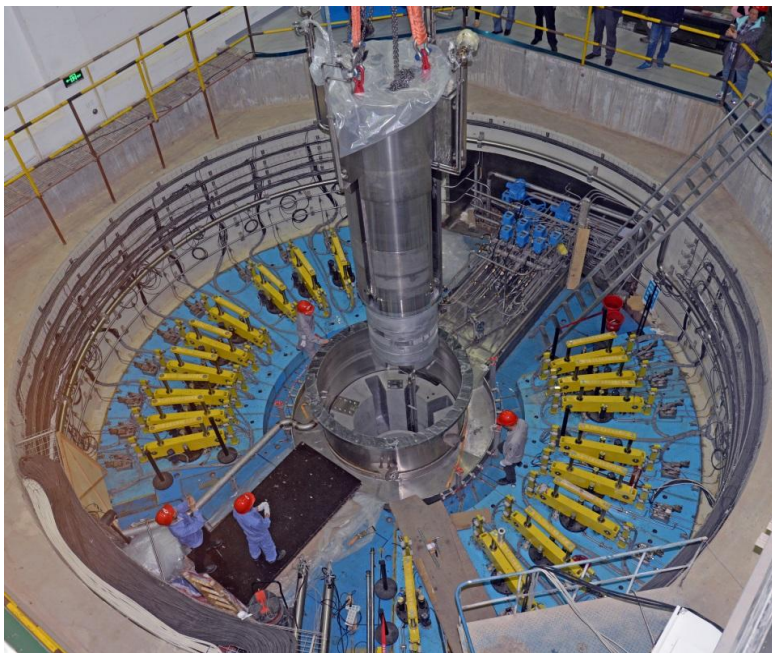
直线加
速器



RCS环
加速器

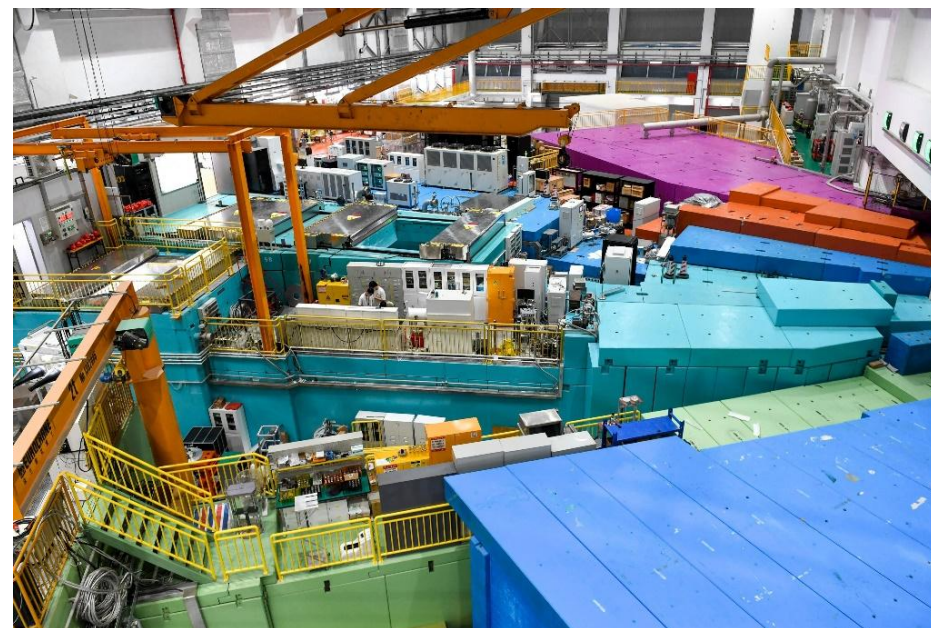


靶站
顶部



散裂靶

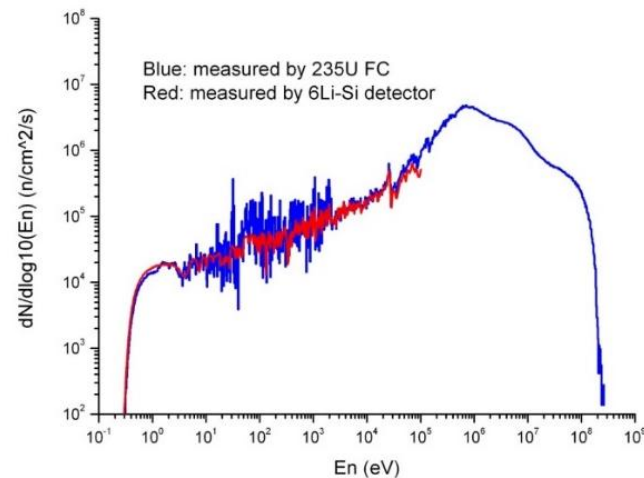
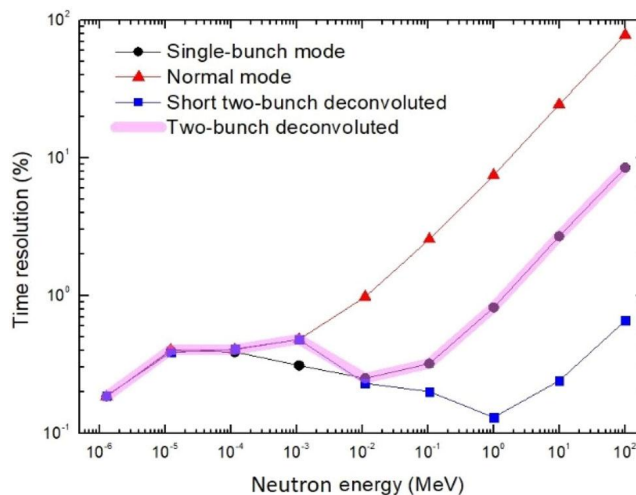
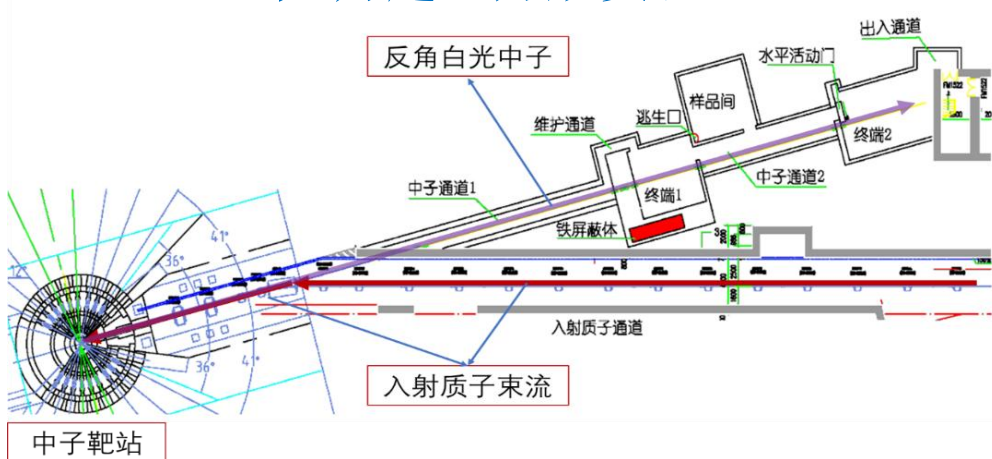
谱仪南
大厅



谱仪北
大厅

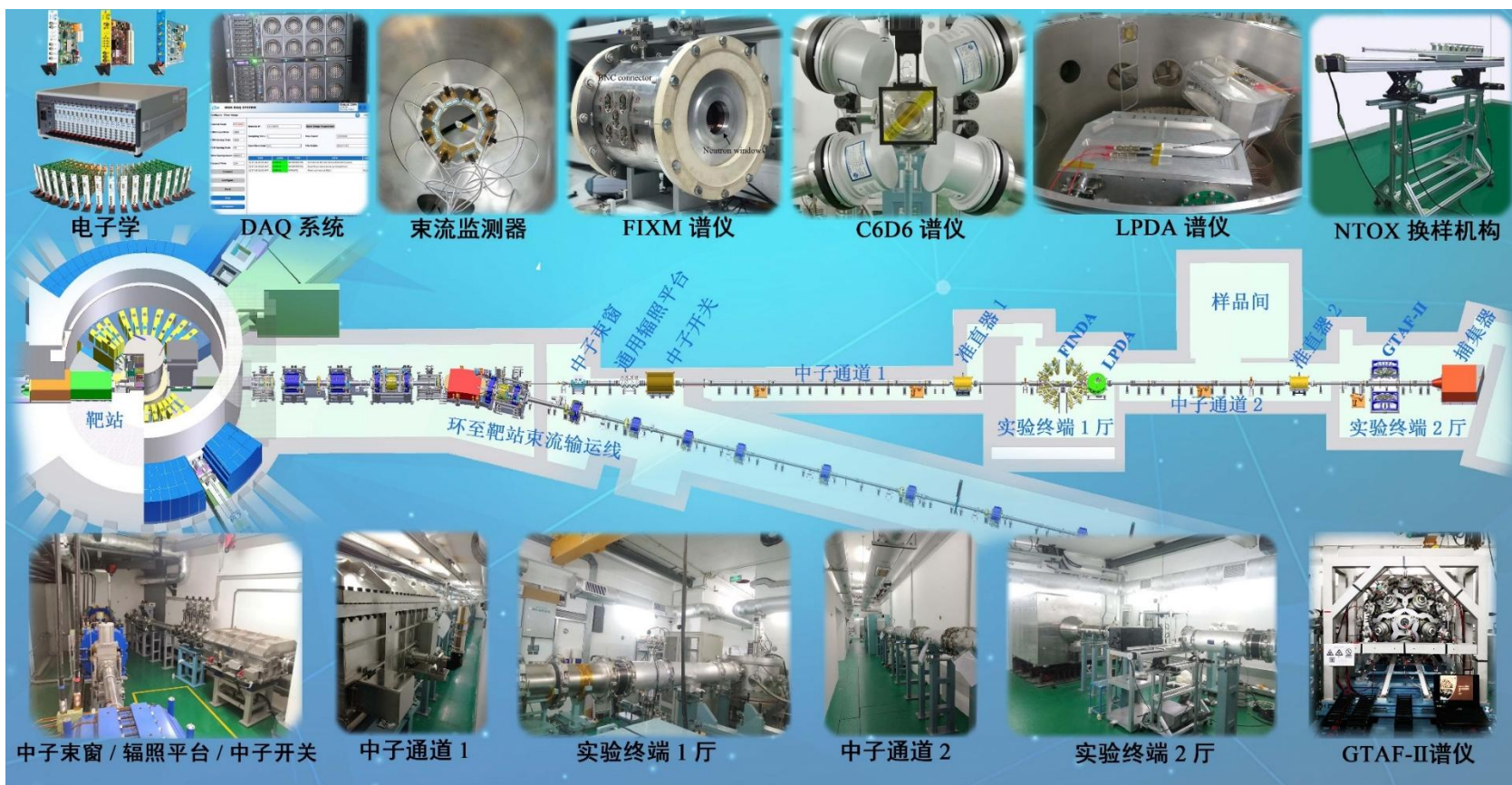
反角白光中子源 (Back-n)

- 世界上首台基于反角中子的宽能区白光中子实验装置
- 综合性能居于世界前列，其中距产生靶等距离的中子注量率最高（所有白光中子源）
- 多功能性：核数据测量、中子探测器标定、中子辐射效应、中子成像和核素成分鉴别
- Back-n建设和运行
 - 2013年9月成立白光中子源合作组（高能所、原子能院、九院、西核所、中科大）；组建由5个单位共同建设队伍；
 - 2014年-2018年：多渠道自筹经费，与CSNS主体同时建成
 - 2018年9月起：开放实验



• Back-n上开展的研究方向

- 核物理和核技术：核数据测量（中子诱发的核反应截面）：各种反应类型(全截面、裂变截面、俘获截面、带电粒子出射等等)、中子宏观实验
- 中子辐射：集成电路的高能中子单粒子效应、材料改性、辐射损伤
- 探测器标定、中子计量学：具有能谱范围宽、强度高的特点
- 白光中子共振成像/核素成分分析：非常独特，有希望同时区分全元素



中子技术在考古和文化遗产 研究中的应用



中子探针



- 中子能区划分
 - 快中子: $>1 \text{ MeV}$ (相对论中子: $>20 \text{ MeV}$)
 - 中能中子: $300 \text{ eV} \sim 1 \text{ MeV}$
 - 共振中子: $10 \sim 300 \text{ eV}$
 - 慢中子: $1 \sim 10 \text{ eV}$
 - 超热中子: $0.025 \sim 0.4 \text{ eV}$
 - 热中子: $\sim 0.025 \text{ eV}$ (反应堆中子)
 - 冷中子: $<0.025 \text{ eV}$
- 中子只与原子核发生作用
 - 不带电, 穿透能力强
 - 与轻元素、中等元素和重元素均能发生作用
 - 与同一种元素的不同同位素核作用不同 (核素区分)
 - 完全无损检测 (通常也不需要特殊的样品条件准备)
- 作用形式
 - 中子成像 (2D或者3D) (中子与样品的总作用)
 - 核素成分分析 (核反应过程)
 - 分子层次结构解析 (中子散射方法)

先进中子源:

- 反应堆中子源 (热中子): 铀原子核裂变产生的中子
- 散裂中子源 (热中子, 白光中子): 高能质子将重原子核靶打碎或使其蒸发中子



国内外利用中子技术开展考古/ 文化遗产的情况

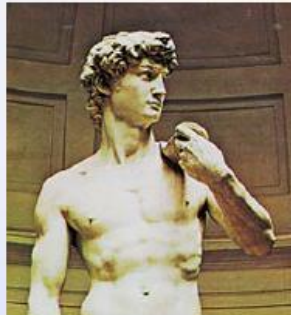
- 欧洲和日本都在长期系统性地开展相关的研究
 - 文物内容丰富，研究工作得到重视（系统性支持，如欧洲的Ancient CHARM计划）
 - 中子科学研究基础好，中子源装置众多
 - 发展了很多先进的方法
- 国际上其他国家
 - 有零星开展
- 国内
 - 中子活化技术有一定的开展，但没有形成主流
 - 近些年国内先进中子源发展很快，有机会大力发展

Artifacts investigated

All kind of artifacts (dimensions from mm to meter): papers, ceramics, stones, marbles, glasses, metals, etc.

Neutron analysis provides information on:

- Elemental and phase Composition
- Making techniques
- Provenance Conservation and Restoration
- Genuine or fake



中子成像技术

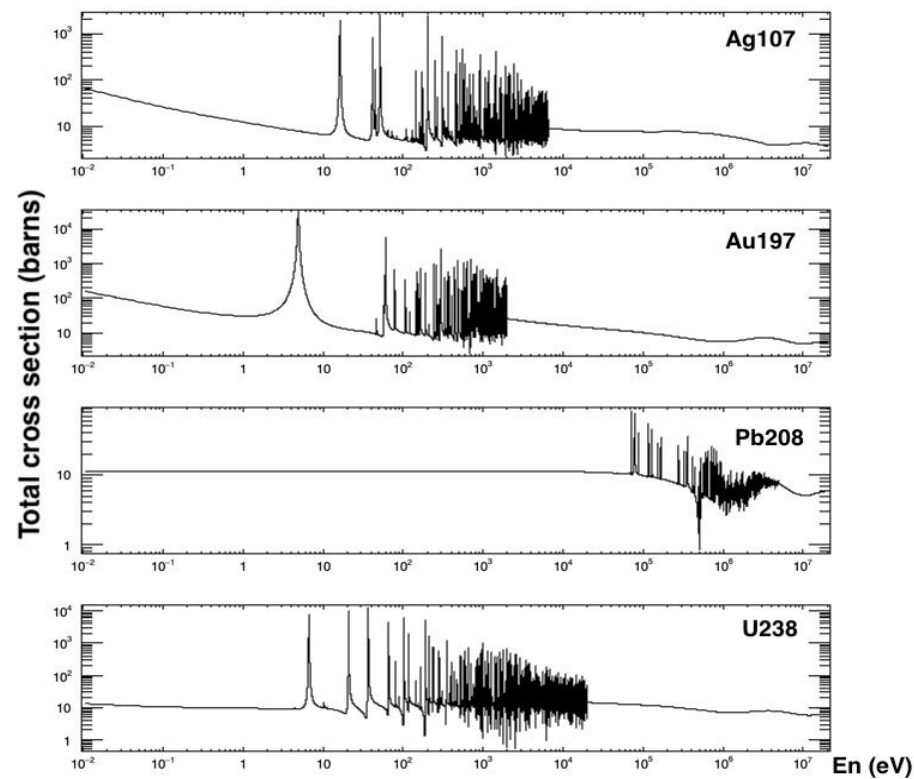
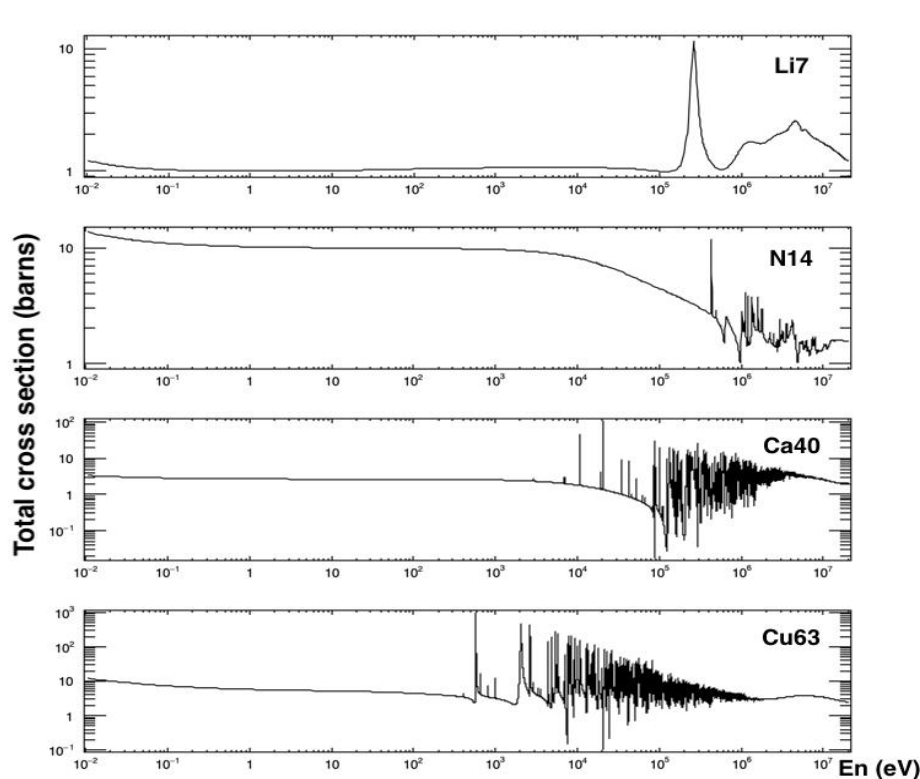
- 中子成像方法具有广泛的应用范围，与X射线成像互补。
- 中子成像方法近些年发展较快，包括中子源技术、探测方法和图像重建方法，其中可进行中子能量分辨的成像技术尤其得到重视。
- 根据中子能区的划分，中子成像可以分为**热中子和冷中子**成像(几十meV以下)、**快中子**成像（百keV以上）和**白光中子**成像（宽连续能区，meV-百MeV）。➔各有优势



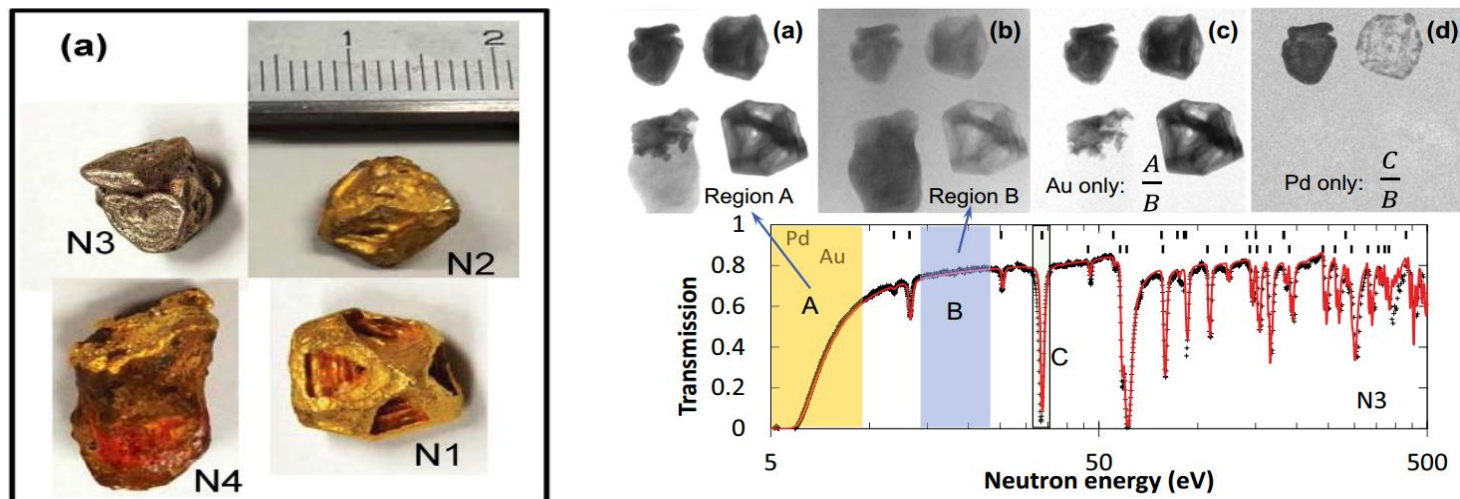
瑞士
PSI

新技术-白光中子共振成像方法

- 每个核素都有独特的中子吸收峰结构（特征共振峰，氢元素没有），峰位对应不同的中子能量。
 - 轻元素共振峰能量高，重元素共振峰能量低



- 中子共振成像方法：透射成像，像素点是否发生中子共振，实现核素鉴别。
- 白光中子共振成像：宽能谱白光中子源（eV-百MeV），高中子注量率和高飞行时间分辨（等价于中子能量分辨），获得**X-Y-T**信息，分析每个像点的核素成分。
 - 难度非常大，对中子源和探测方法都有非常高的要求
 - 国际上还没有成熟的经验（起步阶段）
 - 已有在eV能区 (主要是重元素共振区) 和快中子区 (轻元素，开时间窗法) 的成功探索



基于Timepix+MCP@J-PARC对天然金样品中的Au/Pd元素含量和位置的分析(美日合作)



中子诱发Gamma放射性和中子共振吸收方法



- 中子活化法（NAA, Neutron Activation Analysis）
 - 中子长期辐照，使样品活化，其中的某些核素发生嬗变从而具有放射性；离线精确测量Gamma能谱，它反映放射性核素的衰变能级（特征Gamma射线）。
【各种中子源均可以，包括反应堆中子源和散裂中子源的热中子】
- 基于瞬发Gamma测量的活化法（PGAA, Prompt Gamma）
 - 在线测量Gamma能谱，优势是可以对极短寿命的核素进行测量，应该范围更宽，但难度较大（散射本底非常强）
- 中子共振吸收方法（NRA, Neutron Resonance Analysis）
 - 基于中子透射率测量方法（NRTA）
 - 基于中子俘获发射Gamma的测量方法（NRCA），也是测量瞬发Gamma，主要作Gamma计数而不测其能量

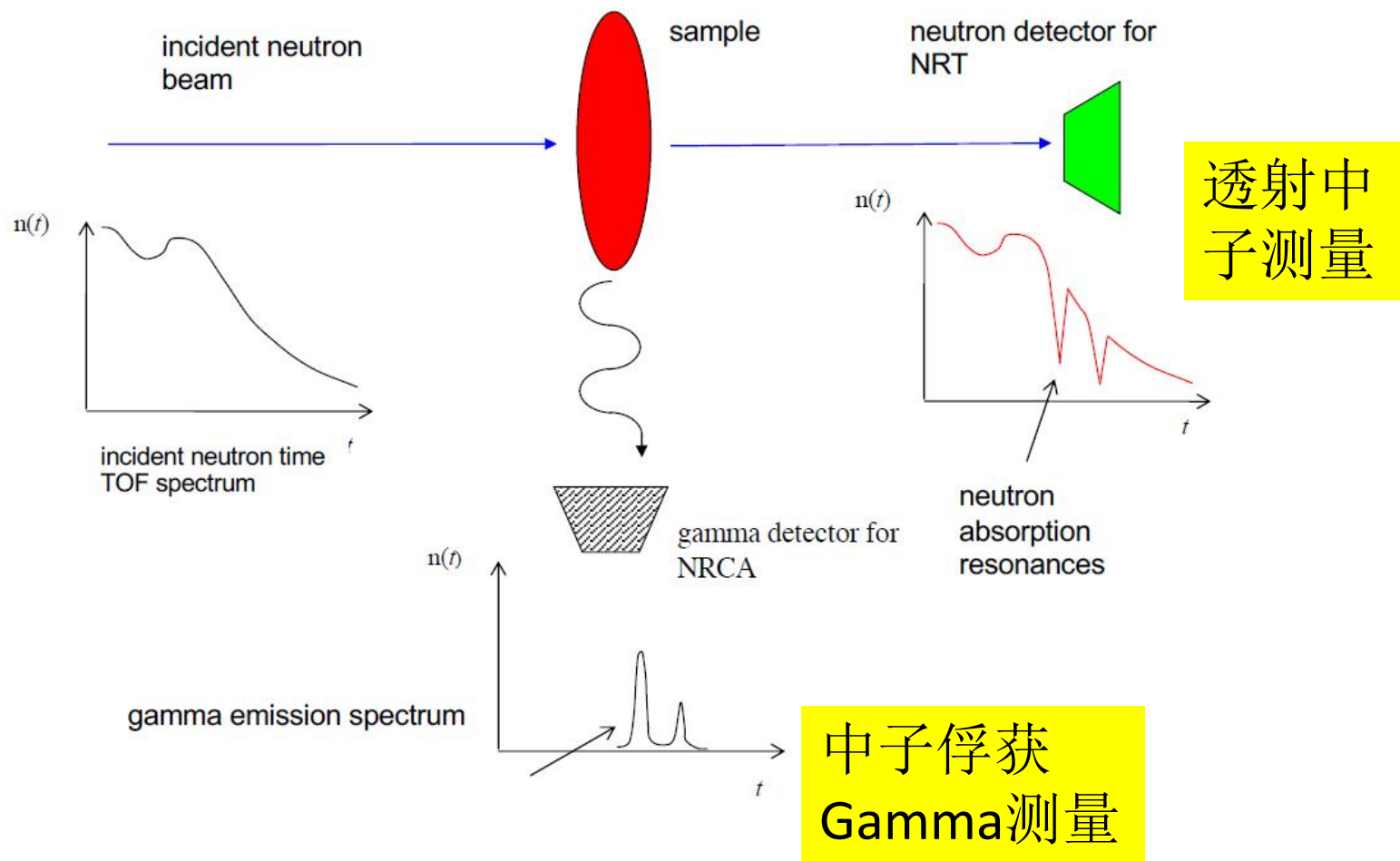
可以开展中子活化法（NAA）进行检测的元素

元素周期表

1																	2				
H																	He				
3	4															5	6	7	8	9	10
Li	Be															B	C	N	O	F	Ne
11	12															13	14	15	16	17	18
Na	Mg															Al	Si	P	S	Cl	Ar
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36				
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr				
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54				
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe				
55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86				
Cs	Ba	¹ La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn				
87	88	89	104	105																	
Fr	Ra	² Ac	Rf	Db																	
¹ Lanthanide		58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71						
		Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu						
² Actinide series		90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103						
		Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr						
	No n-gamma radioactive isotopes																				
	Radioactive isotopes can be produced. Limitation is short half-life or flux energy																				
	Elements routinely determined by INAA																				

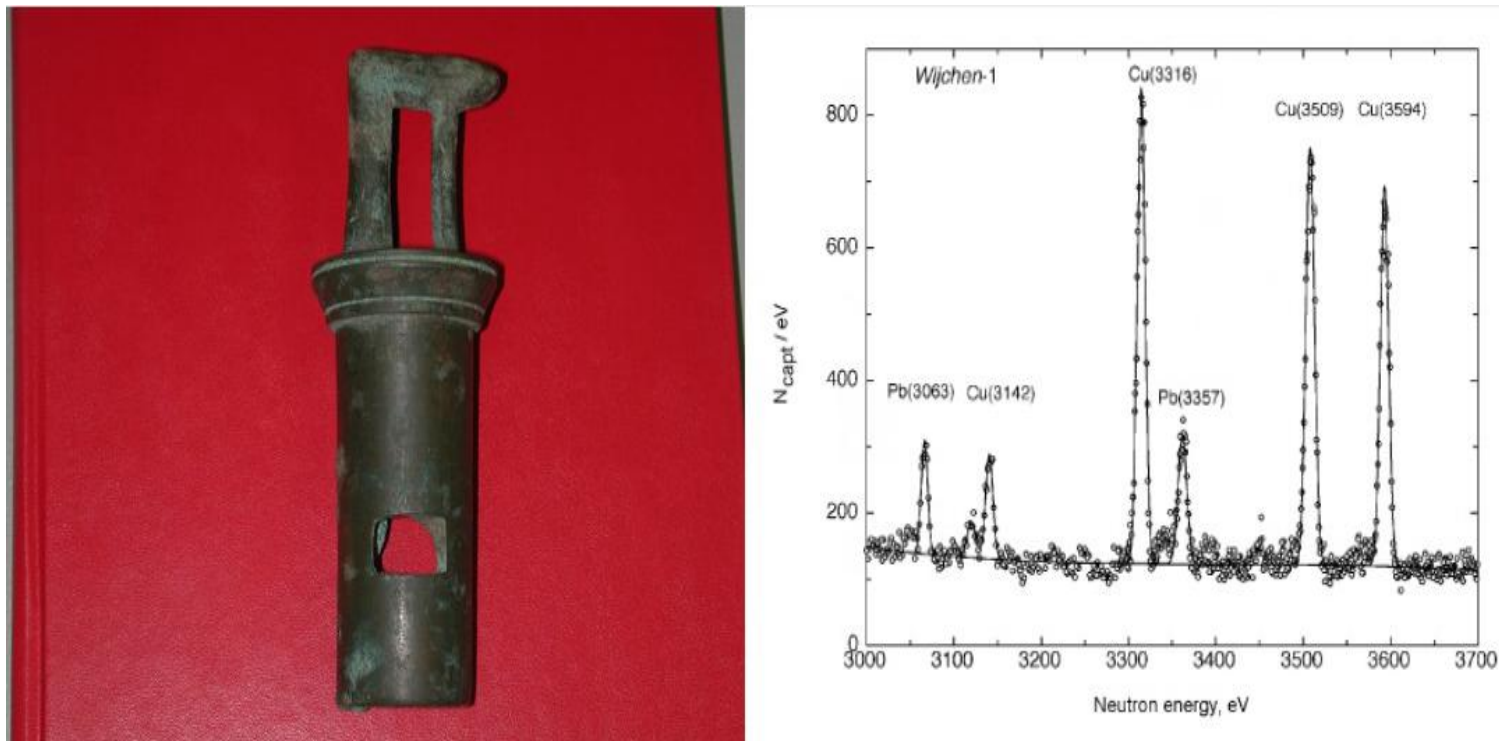
不能检测轻元素

中子透射方法和中子共振俘获方法



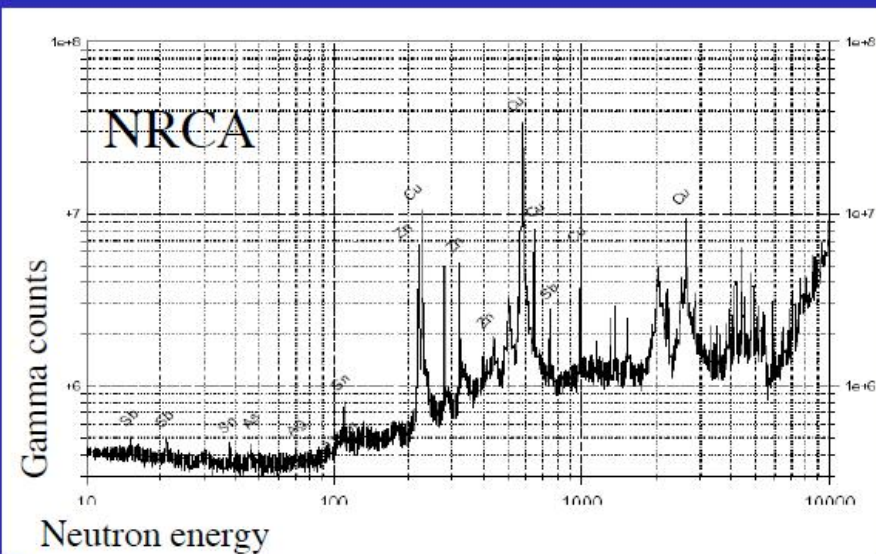
中子透射法（测量透射中子，共振吸收形成谷）和中子俘获法（测量原子核俘获中子后发射 γ 的共振峰），均与中子能量有关

- 中子共振核素成分分析方法较为成熟
 - 对中子源要求较低，一般的脉冲型白光中子源上都可以开展
 - 一般认为中子吸收法（NRCA）比较适合中重元素(共振峰在eV量级)，瞬发Gamma谱法（PGAA）比较适合轻元素



罗马出土的水龙头（左）及其中子共振核素分析结果（右）

NRCA on brass object, GELINA, Geel, Belgium



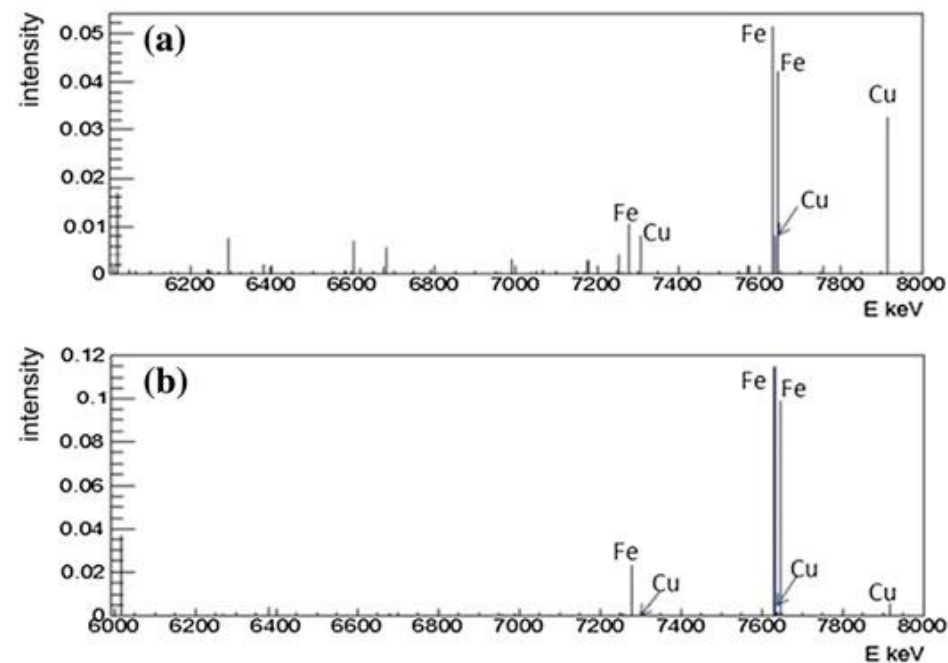
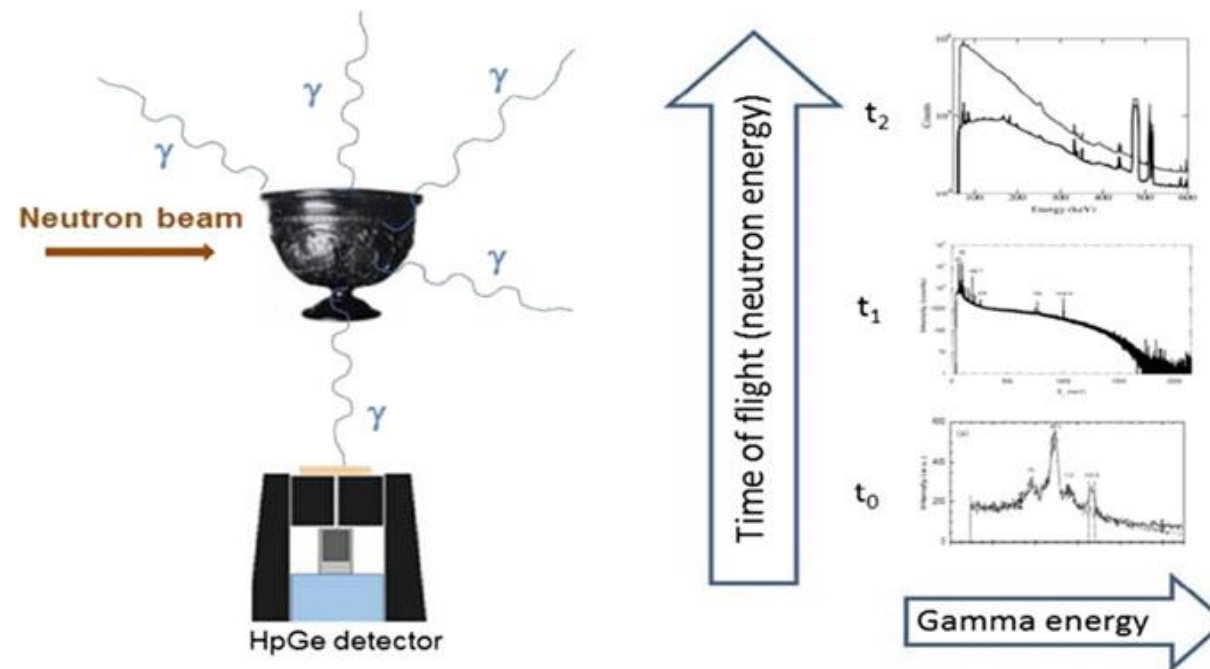
14/15th century
Cu/Zn Benin plaque
(private collection)

Element analysis

M. Blaauw, H. Postma, P. Mutti, (2002)

El	energies used	plaque concentration
	(eV)	(g/g and 95 % conf.)
Cu	230, 579, 650, 994	0.67 ± 0.02
Zn	282, 323	0.32 ± 0.01
Pb		< 0.08
Fe	1150	0.009 ± 0.005
Sn	111	0.0079 ± 0.0007
Sb	6.22, 21.4	$(3 \pm 1) \times 10^{-4}$
As	47	$(6.6 \pm 1.1) \times 10^{-4}$
Ag	5.19	$(4.3 \pm 0.2) \times 10^{-4}$

瞬发Gamma谱测量方法（正在发展中），尤其配合飞行时间测量的T-PGAA方法（日本J-PARC上有成功的经验，采用的是eV能区的超热中子）：利用不同能量的中子突显量少、作用截面小的核素

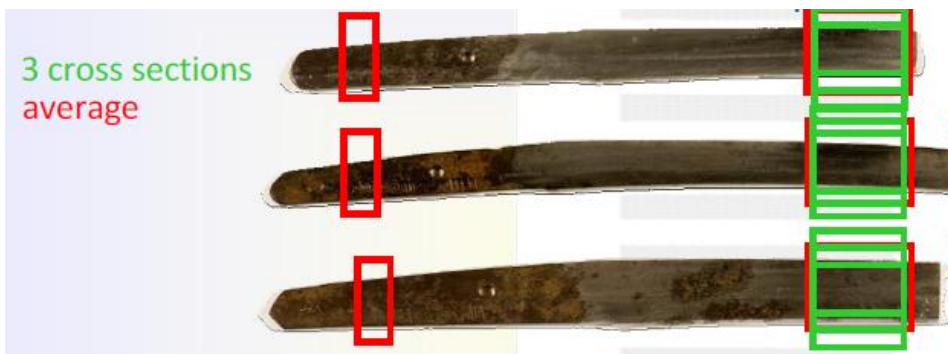


可以开展瞬发Gamma测量（NRCA/PGAA）进行检测的元素

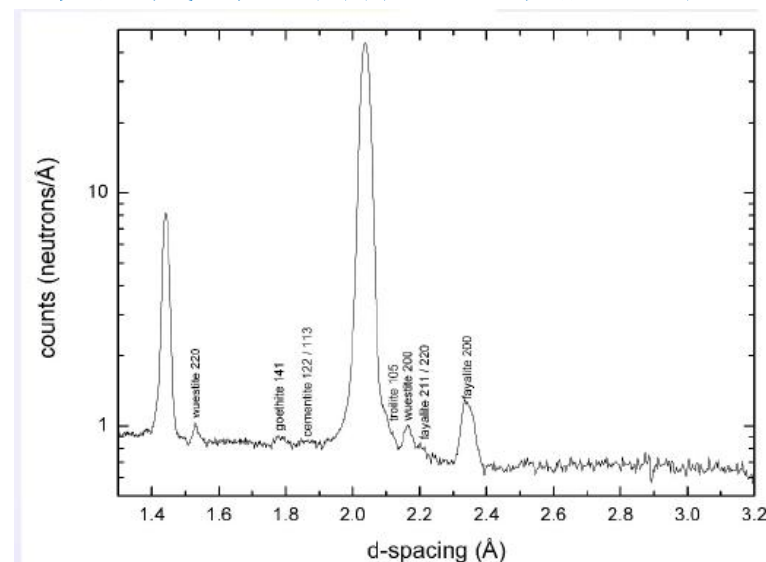
Element		Detection Limit [ppm]	
stable isotope		0.01-1	
atomic weight		1-10	
σ - capture		10-100	
σ - scattering		100-1000	
		>1000	
		no data	
H 1 1.00794 0.3326 b 82.02 b	He 2 4.002602 0.007 b 1.34 b		
Li 3 6.941 7.05 b 1.37 b	Be 4 9.0122 0.0076 b 7.63 b		
Na 11 22.98977 0.530 b 3.26 b	Mg 12 24.305 0.063 b 3.71 b		
K 19 39.0983 2.1 b 1.96 b	Ca 20 40.078 27.5 b 23.5 b		
Sc 21 44.9559 27.5 b 23.5 b	Ti 22 47.88 6.09 b 4.35 b		
V 23 50.9415 5.08 b 5.10 b	Cr 24 51.9961 3.05 b 3.49 b		
Mn 25 54.9380 13.3 b 2.16 b	Fe 26 55.845 2.56 b 11.62 b		
Co 27 58.9332 37.18 b 5.6 b	Ni 28 58.6934 4.49 b 1.65 b		
Cu 29 63.546 3.76 b 8.03 b	Zn 30 65.38 2.75 b 6.38 b		
Ga 31 69.723 2.75 b 6.63 b	Ge 32 72.64 2.20 b 8.60 b		
As 33 74.9216 4.5 b 5.50 b	Se 34 78.96 11.7 b 6.30 b		
Br 35 79.904 6.9 b 5.90 b	Kr 36 83.8 25 b 7.68 b		
Rb 37 85.4678 0.36 b 6.8 b	Sr 38 87.62 1.26 b 6.25 b		
Y 39 88.90585 1.28 b 7.70 b	Zr 40 91.224 0.185 b 6.46 b		
Nb 41 92.90638 1.15 b 6.255 b	Mo 42 95.94 2.46 b 5.71 b		
(Tc) 43 20 b 6.3 b	Ru 44 101.07 2.56 b 6.6 b		
Rh 45 102.9055 14.4 b 4.6 b	Pd 46 106.42 6.8 b 4.46 b		
Ag 47 107.8682 6.33 b 4.96 b	Cd 48 112.411 2520 b 6.5 b		
In 49 114.818 19.3 b 2.62 b	Sn 50 118.71 0.626 b 4.892 b		
Sb 51 121.76 4.91 b 3.90 b	Te 52 127.6 4.7 b 4.32 b		
I 53 126.90447 6.15 b 3.81 b	Xe 54 131.29 23.9 b -		
Cs 55 132.90545 29.0 b 3.90 b	Ba 56 137.327 1.1 b 3.36 b		
La 57 138.9055 8.97 b 9.66 b	Hf 58 178.49 104.1 b 10.2 b		
Ta 59 180.947 20.6 b 6.01 b	W 60 183.84 18.3 b 4.60 b		
Re 61 186.207 89.7 b 11.5 b	Os 62 190.23 190.23 1.47 b		
Ir 63 192.22 425 b 14 b	Pt 64 195.08 195.08 10.3 b 11.7 b		
Au 65 196.96656 98.65 b 7.73 b	Hg 66 200.59 37.23 b 26.8 b		
Tl 67 204.3833 3.43 b 9.89 b	Pb 68 207.2 0.171 b 11.12 b		
Bi 69 208.98038 0.0338 b 9.156 b	(Po) 70 -		
(At) 71 -	(Rn) 72 -		
(Fr) 73 -	(Ra) 74 126 b 13 b		
(Ac) 75 -	104 (223)		
105 (226)	106 (227)		
Ce 58 137.905 140.115 0.63 b 2.94 b	Pr 59 140.90765 11.5 b 2.68 b		
Nd 60 144.24 51 b 16.6 b	(Pm) 61 168.4 b 21.3 b		
Sm 62 150.36 5822 b 39 b	Eu 63 151.965 4530 b 9.2 b		
Gd 64 157.25 48700 b 180 b	Tb 65 158.92534 23.4 b 6.84 b		
Dy 66 162.5 994 b 90.3 b	Ho 67 164.93032 64.7 b 8.42 b		
Er 68 167.26 159 b 8.7 b	Tm 69 168.93421 100 b 6.38 b		
Yb 70 173.04 34.8 b 2.34 b	Lu 71 174.967 74 b 7.2 b		
Th 90 232.03805 7.37 b 13.36 b	(Pa) 91 200.6 b 10.5 b		
U 92 238.0289 7.57 b 8.9 b	(Np) 93 175.9 b 14.5 b		
(Pu) 94 101.73 b 7.7 b	(Am) 95 -		
(Cm) 96 -	(Bk) 97 -		
(Cf) 98 -	(Es) 99 -		
(Fm) 100 -	(Md) 101 -		
(No) 102 -	(Lr) 103 -		

中子散射方法解析分子结构

- 利用低能中子（0.025-10 eV）的中子散射技术，可以确定文物样品的分子结构（与制作工艺有关）
 - 中子衍射(Neutron Diffraction): 晶体结构或多晶材料
 - 小角散射(Small Angle Neutron Scattering)
 - 超小角散射(Ultra Small Angle Neutron Scattering)
- 举例
 - 意大利和日本研究人员合作研究日本古代剑的制作工艺发展历程



锻造工艺的不同和演变



CSNS开展文物研究的现状 和前景



CSNS正在开展的考古相关研究

- CSNS是目前世界上第4大散裂中子源
 - 打靶束流功率已达到**170 kW**，已开始的升级工程将提高至**500 kW**
 - 已投入运行**9**台中子散射谱仪，**2**台合作谱仪正在建设，**9**台将在**CSNS-II**中建设（包括衍射谱仪、小角散射谱仪、超小角散射谱仪）
 - **Back-n**是世界上流强最高的白光中子束线，非常有利于开展中子技术在文物研究中的应用
- 中子科学家与考古专家的合作已进行了多年
 - 中国科大科技考古团队加入**Back-n**合作，共同开展中子技术在文物研究中的应用
 - 在**CSNS**这样的大科学装置上开展文物考古研究，前景远大



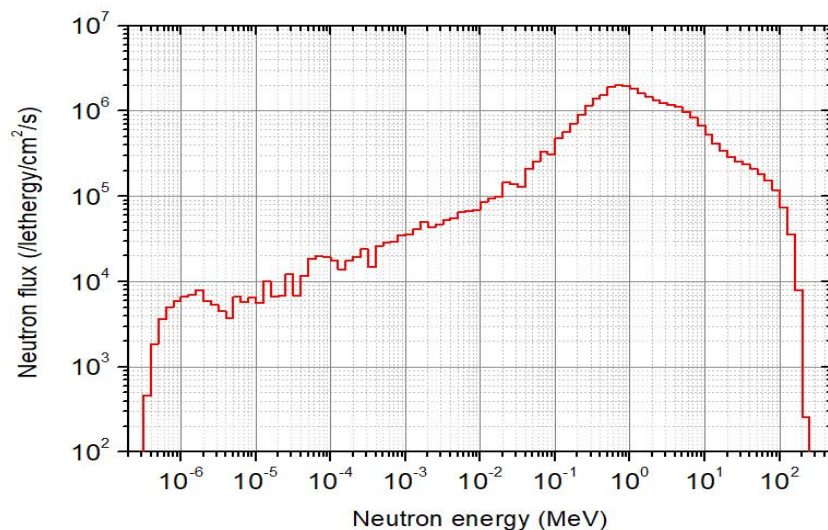
Back-n正在开展重点的研究



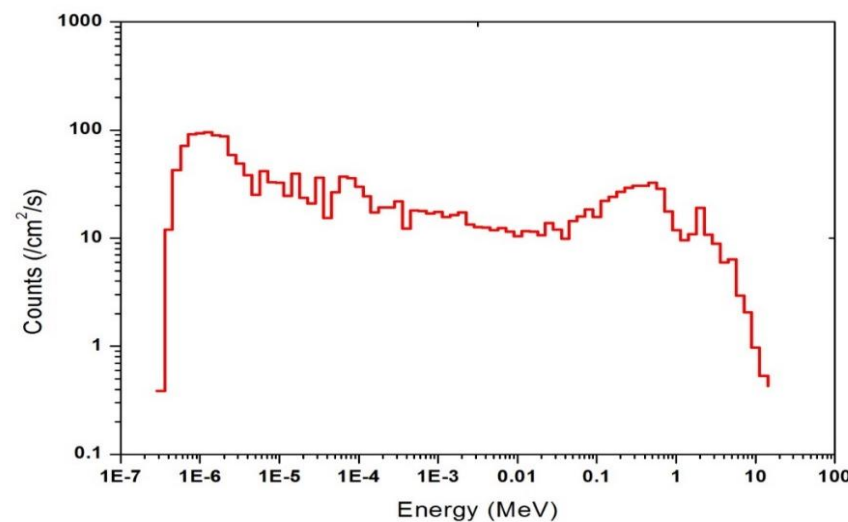
- 核素成分检测
 - 中子透射方法（NRTA）【初步掌握】
 - 中子俘获方法（NRCA）【初步掌握】
 - 瞬发Gamma测量方法（PGAA）【方法探索中】
 - 白光中子活化方法（NAA）【方法探索中】
- 中子共振成像
 - 利用门控CMOS相机开展中子共振成像实验【初步掌握，重元素效果很好】
 - 利用掺硼微通道板（B-MCP）开展中子共振成像实验（Back-n可能是世界上最好的开展全元素中子共振成像的中子束流）【初步掌握，潜力很大】

Back-n开展中子共振成像的优势和基础

- Back-n强度世界上最高，且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。
- 飞行距离长和时间特性好：中子能量测量

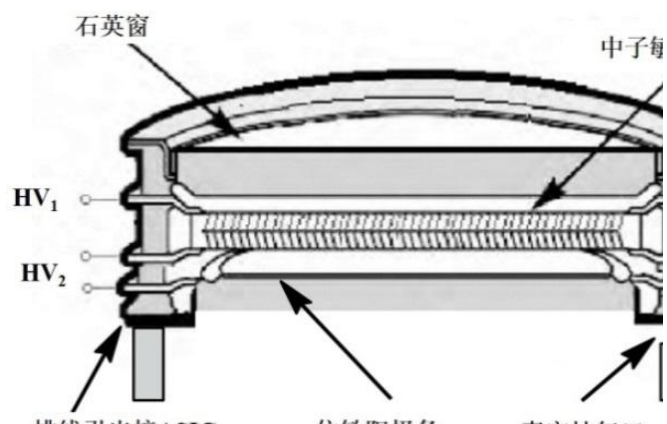
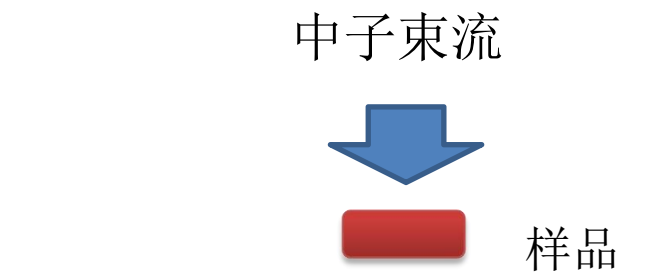


Back-n中子能谱

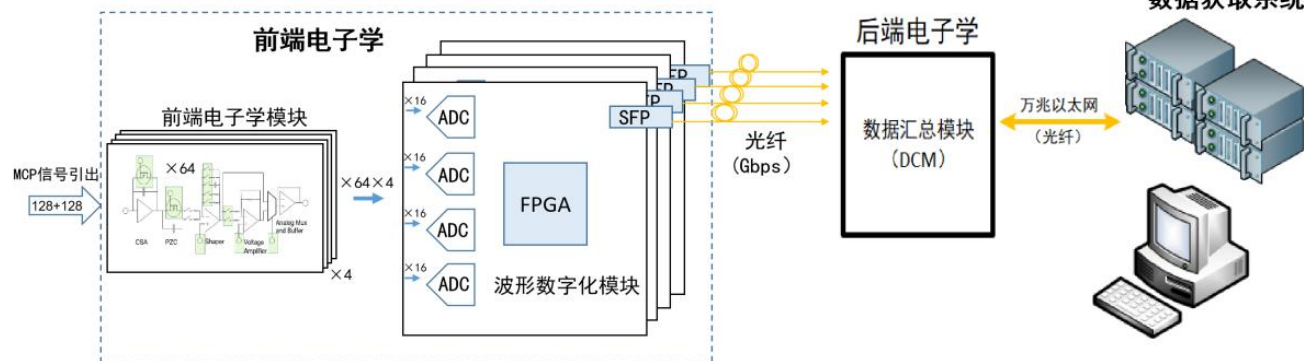
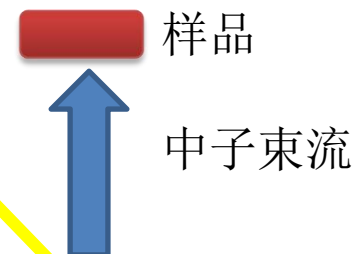
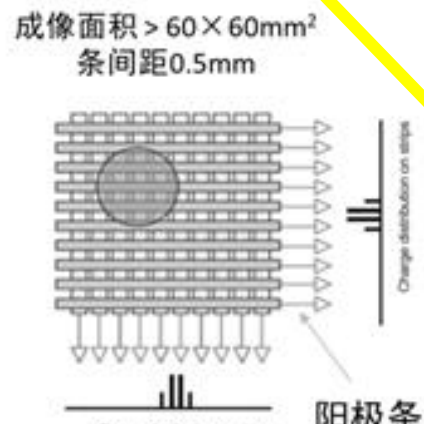
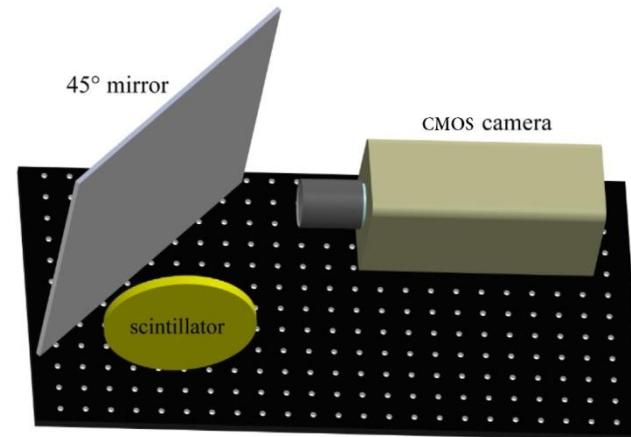


^{10}B 中子探测事例率曲线
(已知最好的白光中子转换体)

掺硼MCP方法



门控CMOS相机方法

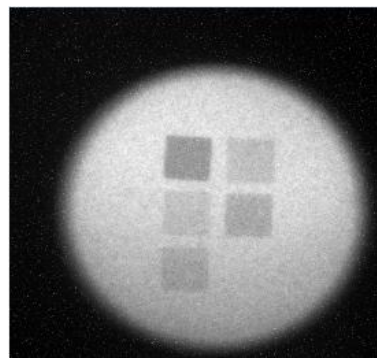
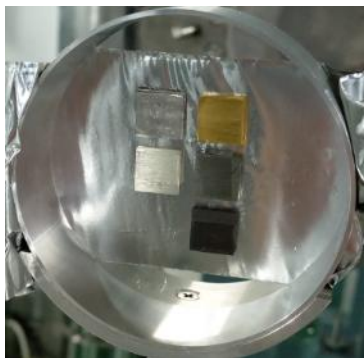


采用门控CMOS相机中子开展了一系列共振成像实验

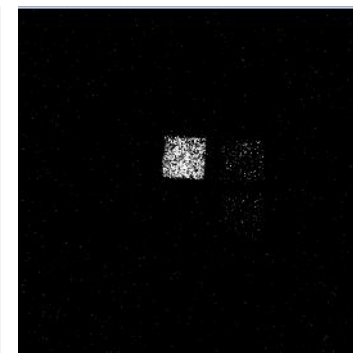
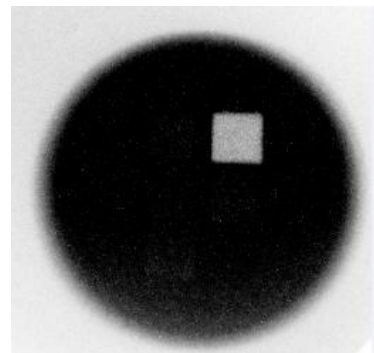
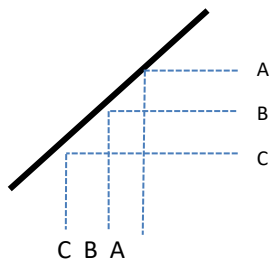
重元素检测效果突出

样品实物：Au、Ag、W、Ta、In

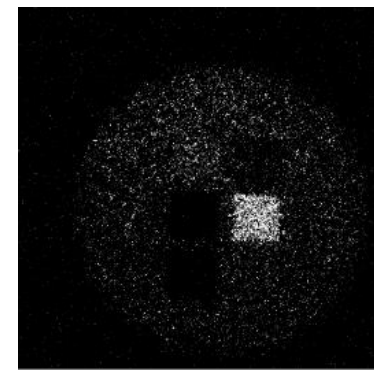
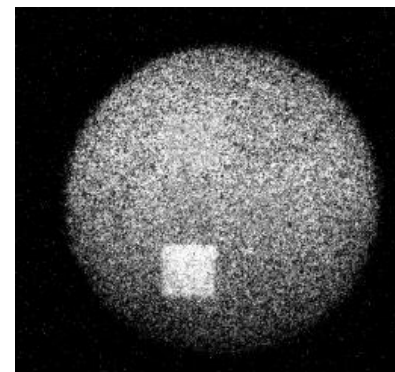
普通透射照相



光路原理：



共振核素检出：In、Au

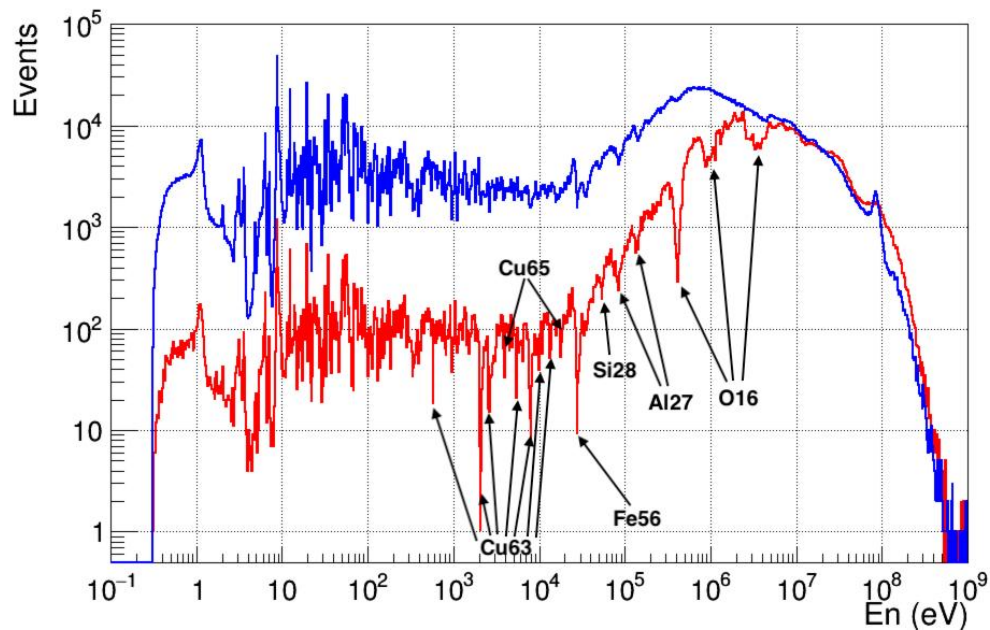


共振核素检出：Ta、Ag

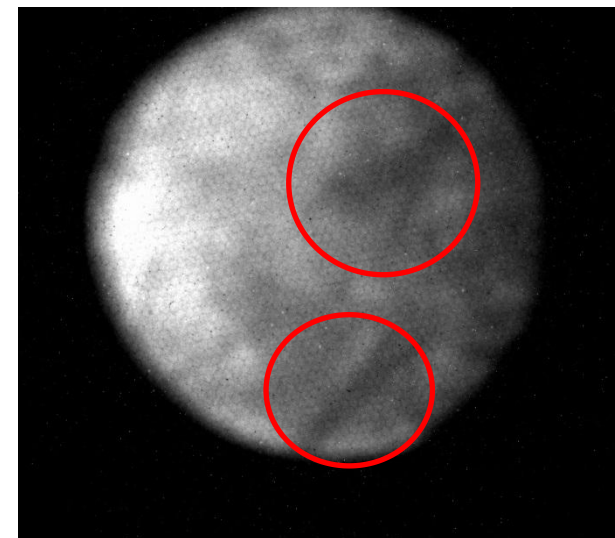
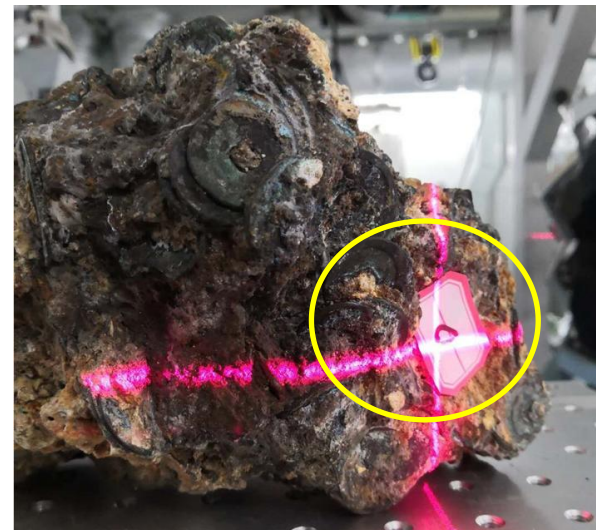
利用相机快门延迟和门宽，分别检出W、In、Ag、Au、Ta等核素位置分布

来自太平洋丝路的海洋沉船文物

- 透射法确定核素成分
- 共振成像实验寻找内部结构（门控CMOS相机）



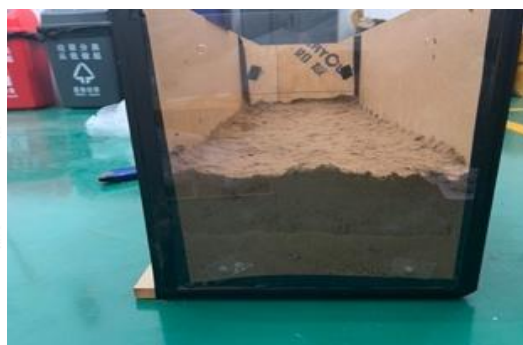
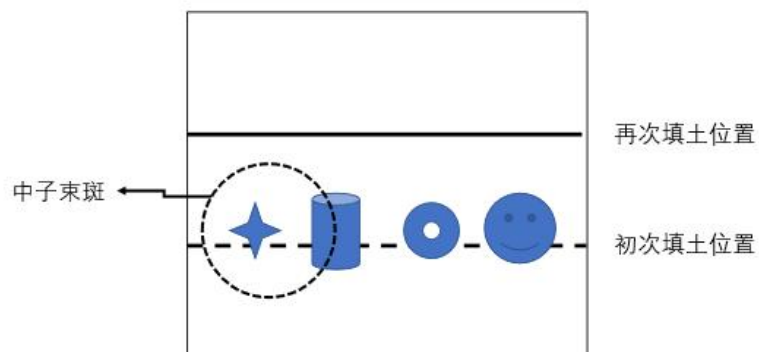
透射照相：
延 $1\mu\text{s}$ ，开门 10ms



初步看到样品中铜钱的位置（铜具有很窄的共振峰，采用目前门控CMOS相机作元素/核素鉴别有较大难度。正在发展更先进的探测器）

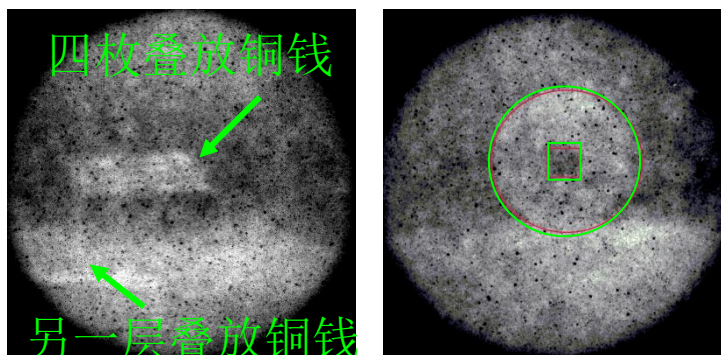
其他文物相关的实验

放进考古套箱的样品：古铜币、殷墟羊骨、牙齿、陶片

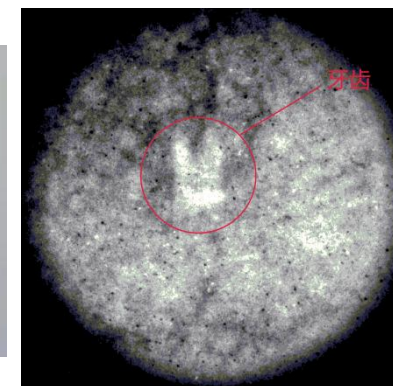


考古常用中型尺寸套箱：0.5m

古铜币透视成像效果：



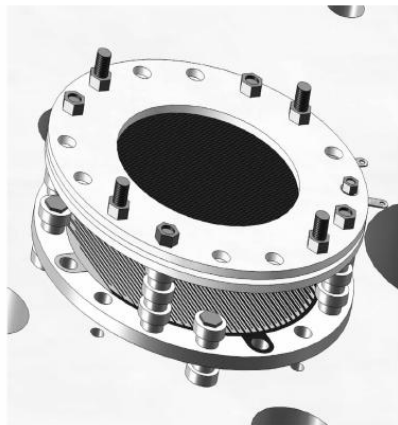
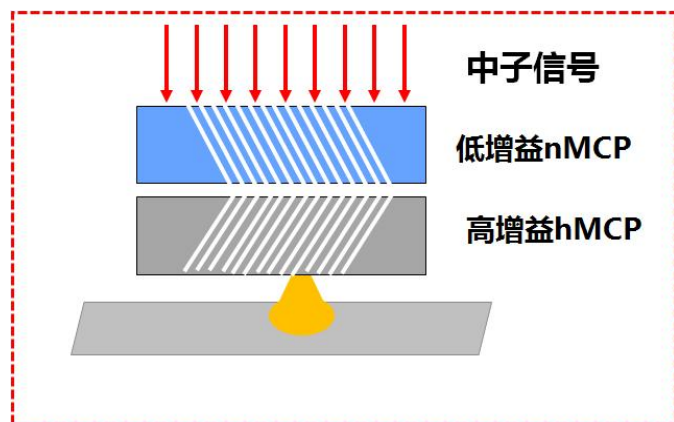
透过0.5m土层，铜钱轮廓和分布形态清晰可见



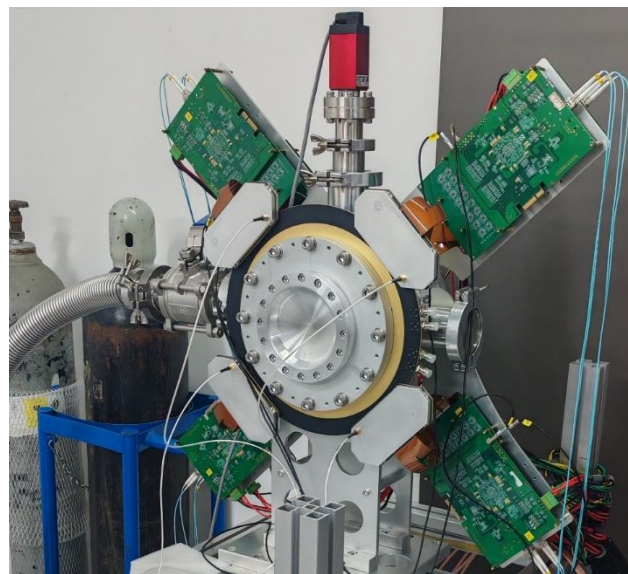
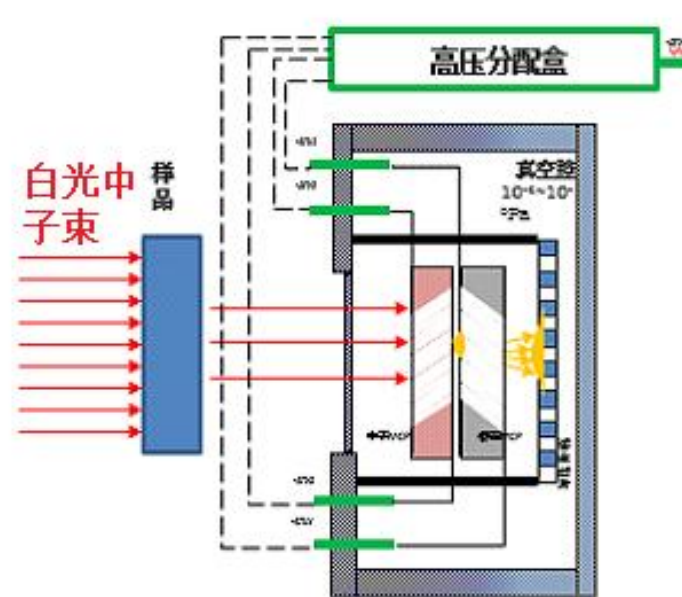
透过10cm土层，人类牙齿可见致密性差异

掺硼MCP (B-MCP) 是我们选定的主要技术路线, 已显示很大优势, 但仍在改进

- 全能区: 几eV – 10 MeV
- 元素范围: “所有元素”
- 位置分辨率: ~ 0.1 mm ($\phi 50$ -90 mm)

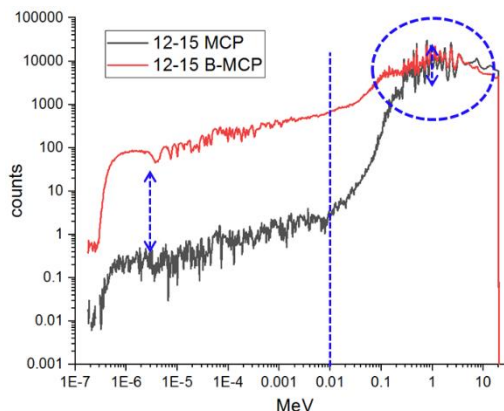


(a) Neutron sensitive MCP imaging detector

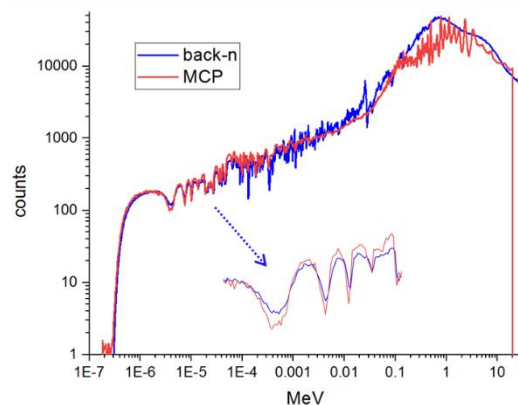


B-MCP: 高能所、科大和北方夜视合作

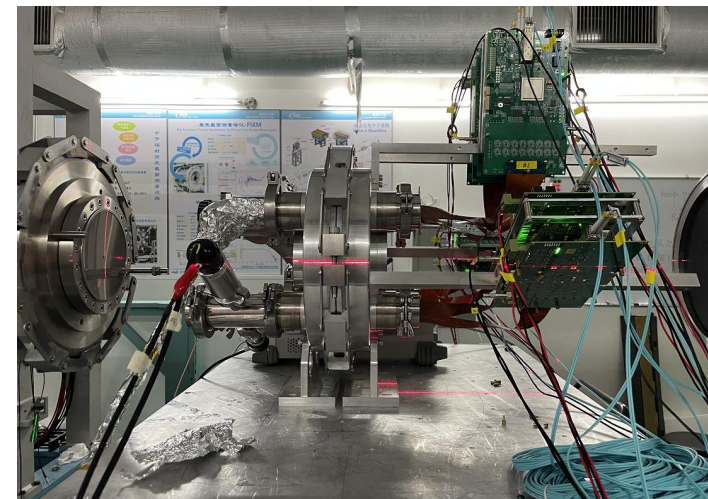
B-MCP实验进展 (2023年)



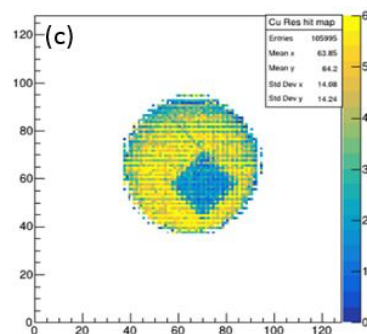
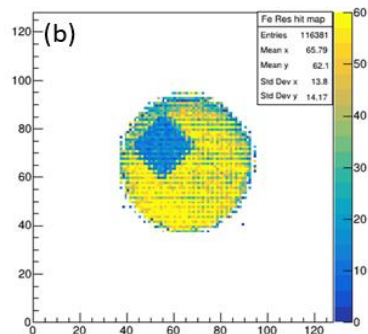
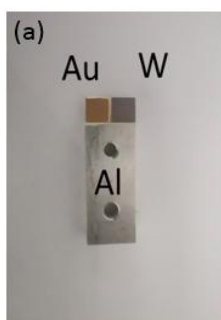
掺硼与普通MCP中子
探测效率对比



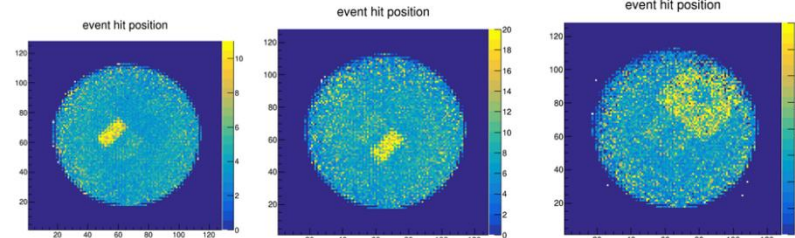
B-MCP中子能谱测量



B-MCP测量现场



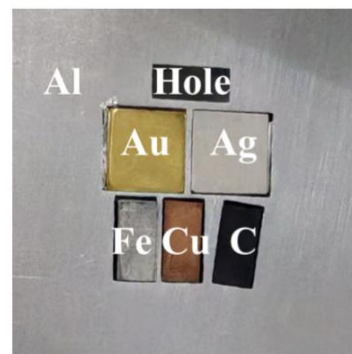
B-MCP首次成像实验可轻松鉴别重元素



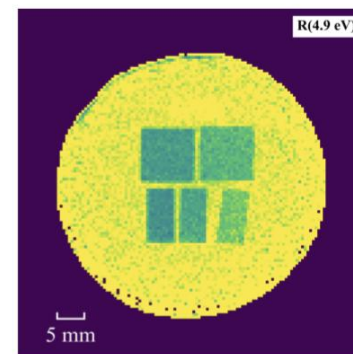
- 2023年B-MCP成像实验可鉴别中等元素(Cu/Fe/Al)
- 铝共振峰: ~ 35 keV

B-MCP实验进展 (2024年)

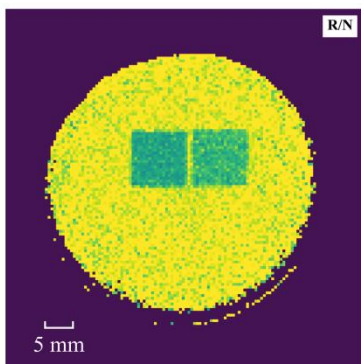
- ❖ 分别对 Au、Ag、Cu、Fe 和 Al 进行共振成像；
- ❖ 最高共振成像能区：Al - 73 ~ 100 keV；
(应该是目前世界上最高能区)



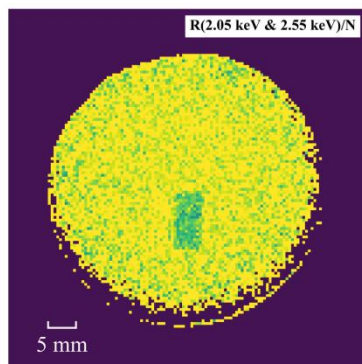
样品布局



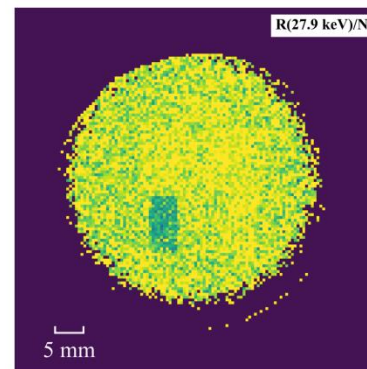
非遴选



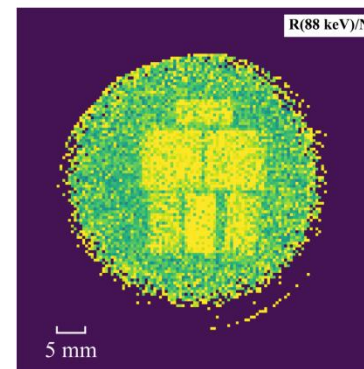
遴选Au & Ag



遴选Cu



遴选Fe

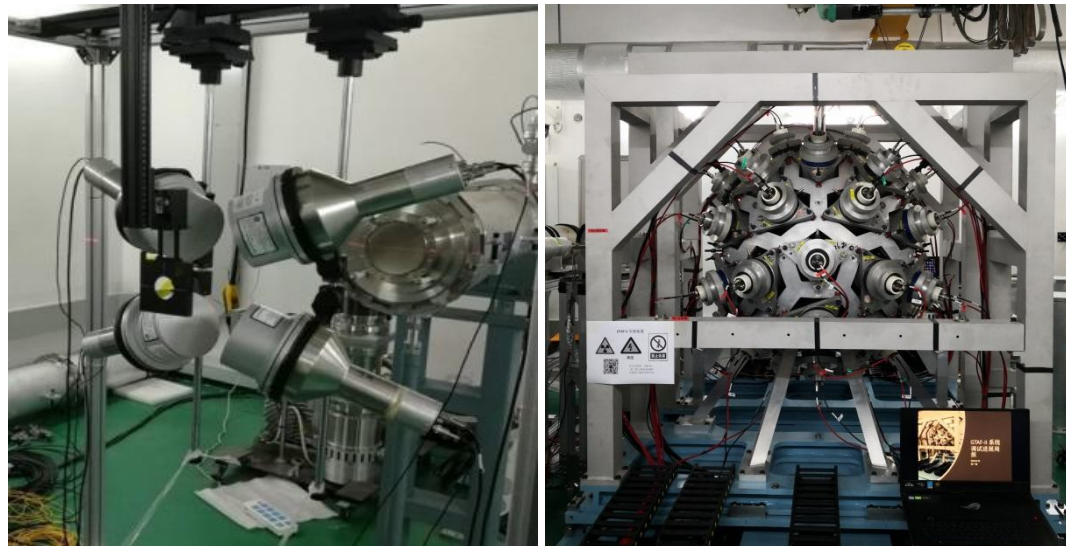


遴选Al

下一个实验：鉴别C和O（进入MeV能区）

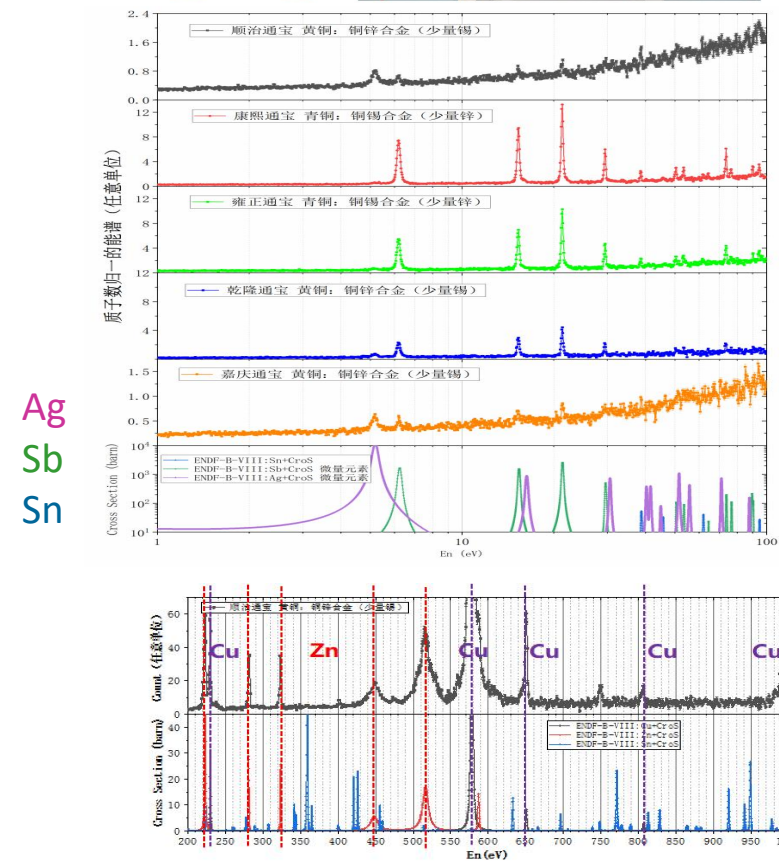
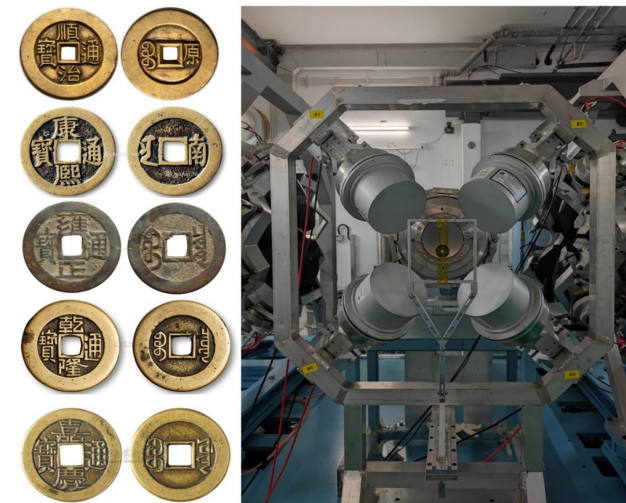
其他可用于文物研究的探测器

- 中子俘获发射Gamma测量 (NRCA)
 - C6D6谱仪
 - GTAF-II谱仪
- 特征Gamma谱测量
 - 高纯锗探测器
 - 中子活化法
 - 瞬发Gamma谱测量



中子共振俘获核素分析方法 (NRCA)实例

- NRCA (Neutron Resonance Capture Analysis)方法
 - 优势：完全无损，几乎所有核素
 - 条件：宽能谱脉冲白光中子源（如 Back-n）
 - 探测器（@Back-n）：4单元 C_6D_6 或 GTAF-II（40单元 BaF_2 阵列）
- Back-n上实验方法研究
 - 古代铜钱成分比较（右图，主元素 Cu/Zn/Sn，微量元素 Ag/Sb）
 - 模拟月壤样品成分
 - 难度在定量分析上 (将采用标准样品)





总结

- 中子技术在文物考古研究中大有前途，值得进一步发展相关的技术和应用
- Back-n提供了一个非常好的实验平台，相关实验条件正在逐渐建立，实验方法在探索中，非常欢迎国内文物和考古同行参与合作。

谢谢关注！ 欢迎合作！