



海纳百川 有容乃大

2023 年 CSNS 反角白光中子实验装置（第七届）用户研讨会，陕西西安，2023.9

四川大学离子加速器应用研究进展

韩纪锋

四川大学原子核科学技术研究所（720所）

辐射物理及技术教育部重点实验室

2023年9月20日



汇报内容

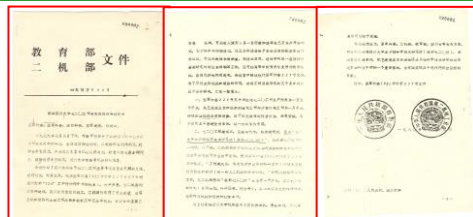
- 一、川大加速器研究平台
- 二、3MV串列加速器相关研究
- 三、CS30回旋加速器相关研究
- 四、总结和展望



四川大学核学科历史



我校核物理专业第一届（57级）同学毕业留念



教育部和二机部批准成立 原子核科学技术研究所(720所)



四川大学成立
核物理、放射化学
教研室

1957

开始核专业本科招生

1958

1980

教育部和二机部批准成立
原子核科学技术研究所(720所)

1960
-
1962

放射化学、核物理
教研室共同组建
原子能系

2007

成都市，中核集团，川
大共建成立
核科学与技术学院



川大加速器研究平台

■ 历史

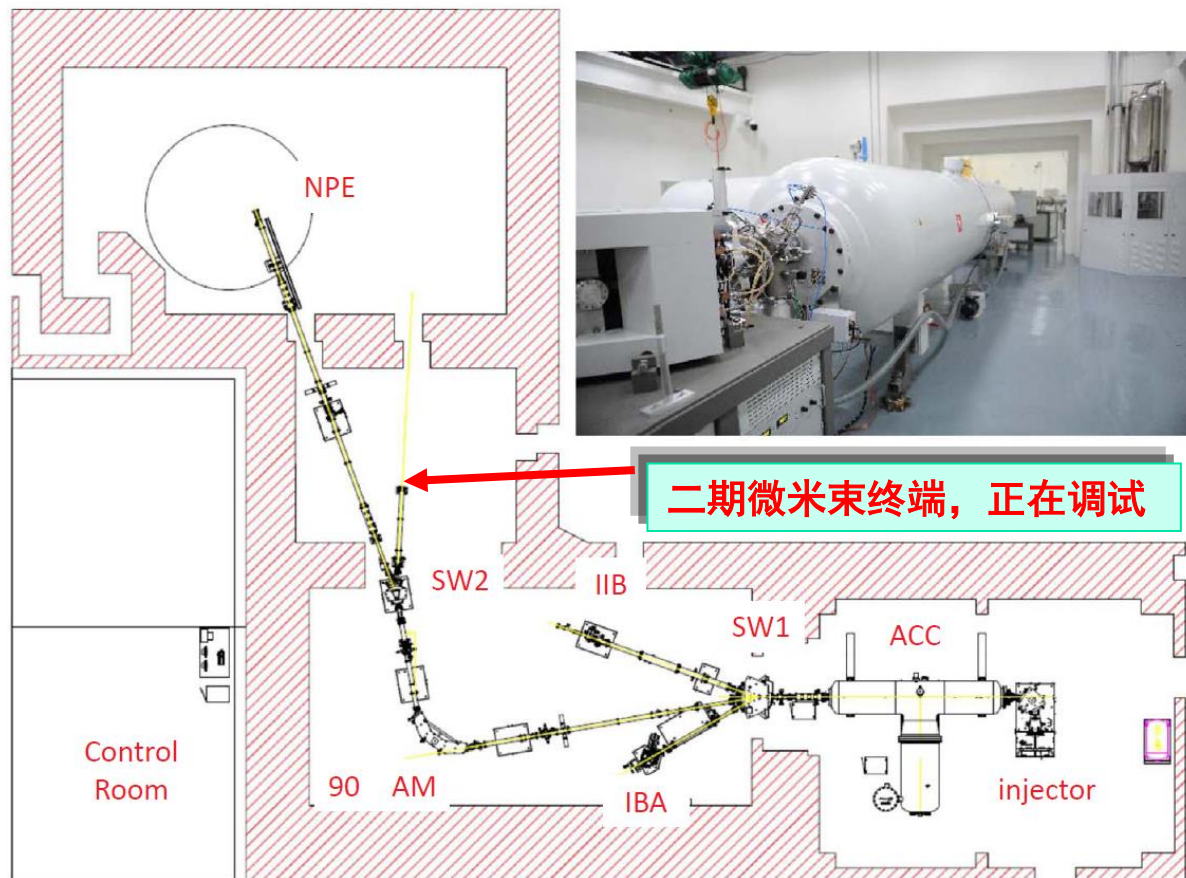
- 1.2m回旋加速器
- 2.5MV静电加速器
- 2MV电子加速器
- 高压倍加器
- 280kV注入机

■ 现在

- 3MV串列加速器
- CS30回旋加速器
- 2.5MV静电加速器



3MV串列加速器及终端平面图



Nucl. Instr. Meth. B 418 (2018) 68–73

●建设终端

- 离子束分析 IBA
- 离子辐照 IIB
- 核物理 NPE
- 原子分子物理
- 微束 MB

3MV 串列加速器平台



■ 可加速粒子种类：

- 从H到U的几乎所有带电粒子
- 常用：H, He, C, Si, Au...

■ 主要技术指标达到国际先进水平

- 能量： $(q+1) \times 3 \text{ MeV}$, $q=1-5$
- 流强：质子约 $60 \mu\text{A}$

■ 已建束流终端：

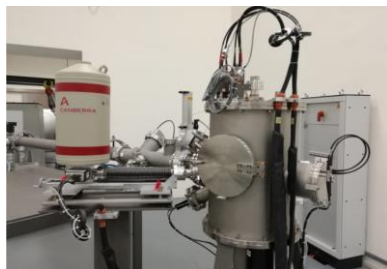
- 核物理：中子、核天体（中子通量 $1 \times 10^9 \text{ n/s}$ ）
- 离子束分析技术：交叉学科
- 材料辐照效应：核能领域（ITER计划）
- 原子分子物理：基础研究
- 微束：交叉学科



离子束分析实验终端

• IBA：交叉学科

- 四自由度靶位自动调节系统，安装25片 $\phi 10$ mm靶片
- 靶架旋转步长 0.01° ，位移步长0.01 mm
- 可自动实现24个样品的换靶、测试、数据保存功能
- PIXE、RBS、ERD、NRA等常用分析手段；
- 全谱元素分析



a) Matteo di Bartolo, Louvre. b) Forger.
PIXE analysis indicated that the red blouse in figure b contained cadmium. This is a direct proof that the painting is a modern forgery. In fact, red cadmium pigments were introduced in painting only in the early 19th century.

- 已配置3套探测器系统
- HPGe探测器
- 固定RBS探测器
- 可旋转RBS探测器

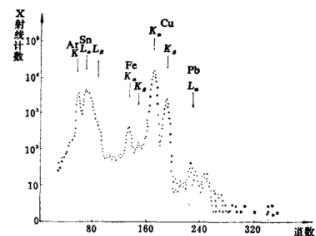


图5(a) 越王勾践剑黄花纹处PIXE能谱
质子能量1.7MeV, 束流强度~5nA, 测量时间10min.

80 复旦学报(自然科学版) 1979年

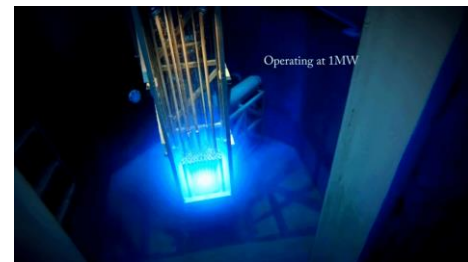
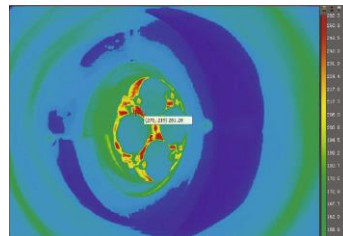
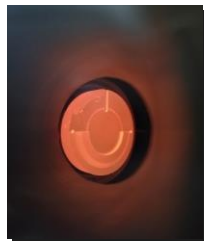
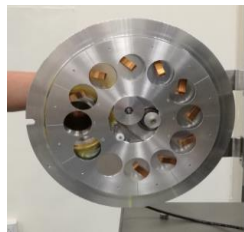
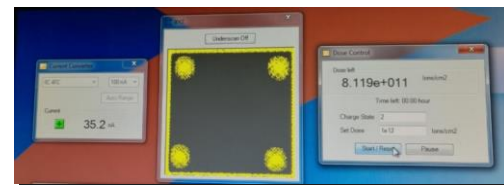
表1 越王剑表面各部位的元素成分

文物名称	分析部位	元素成分 (%)					
		Cu	Sn	Pb	Fe	S	As
越王勾践剑	剑刃	80.3	18.8	0.4	0.4		微量
	黄花纹	83.1	15.2	0.8	0.8		微量
	黑花纹	73.9	22.8	1.4	1.8		微量
	黑花纹特黑处	68.2	29.1	0.9	1.2	0.5	微量
	剑柄边缘	67.2	29.6	8.7	3.4	0.9	微量
越王勾践剑	剑格正中	41.5	42.6	6.1	3.7	5.9	微量
	黄花纹	77.2	15.7	6.6	0.4		微量
	黑花纹	75.3	16.6	7.5	0.5		微量
	剑柄特黑处	46.8	38.1	6.9	2.0	8.0	微量
	剑格	41.8	40.4	9.0	3.7	4.9	微量

离子辐照实验终端：核能材料、材料改性

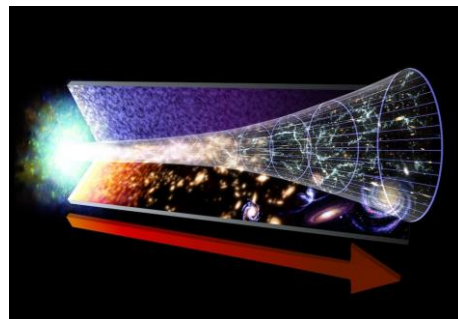
■ 配置束流自动扫描装置，辐照剂量实时监测：

- 剂量不均匀性 $<1\%$
- 配置常温辐照靶（12片 $\phi 50\text{mm}$ ）
高温靶（最高 800°C ，1片 $\phi 50$ ）
低温靶（液氮温度，1片 $\phi 50$ ）
- 设置剂量限值，自动辐照



核物理实验终端：实验核物理、中子物理、核天体物理

- 可提供p, He, B, C, O, Si等束流；
- 质子束流强约 $50 \mu\text{A}$ ；
 - 大厅长宽： $16 \text{ m} \times 9 \text{ m}$
 - 层高7 m、地坑深1 m
- 可提供中子源；
 - 靶位于房间中部，降低散射中子
 - 可提供(p,n)、(d,n)等中子源
 - 中子产额约 $1 \times 10^9 \text{ n/s}$

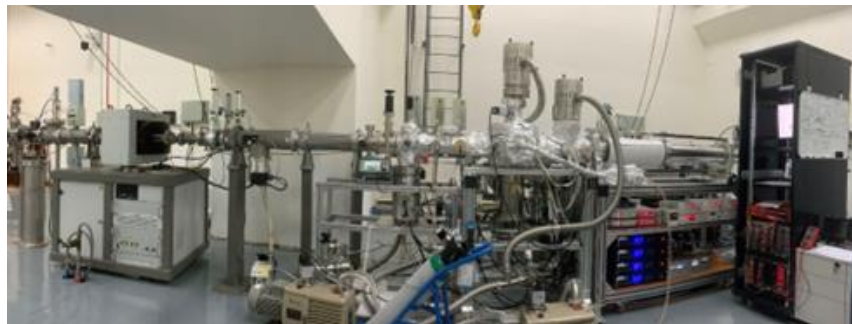
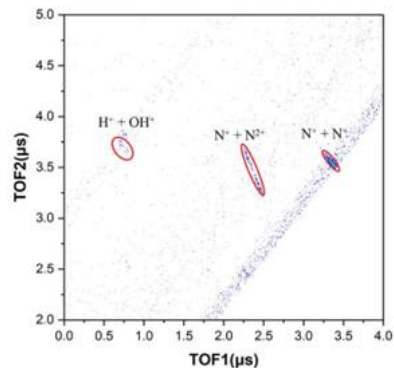




原子分子物理终端

■ 离子与原子分子碰撞研究

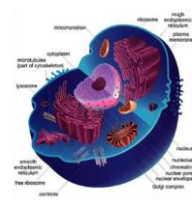
- 冷靶反冲离子动量谱仪
- 分子破碎机制研究
- 已基本完成调试，正计划开展实验



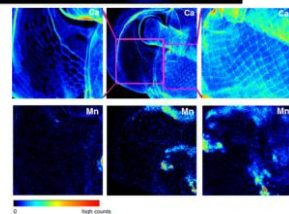
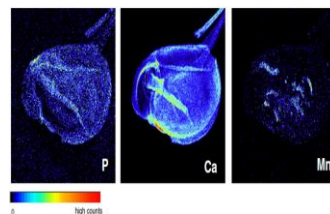
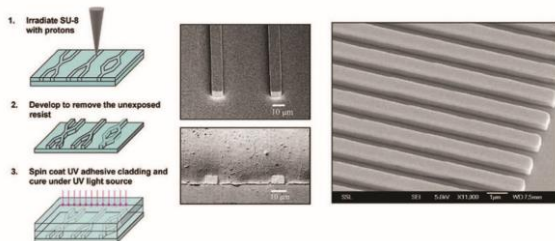
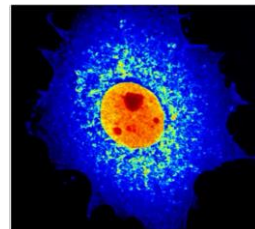
微束终端

■ 微米束流应用研究

- 束斑尺寸 $1\ \mu\text{m} * 1\ \mu\text{m}$;
- 生物医药材料等交叉学科研究;
- 细胞辐照、成像;
- 微纳加工技术研究;
- 正进行载束调试



<http://thegreatestgarden.com/>



3MV加速器近期代表性工作

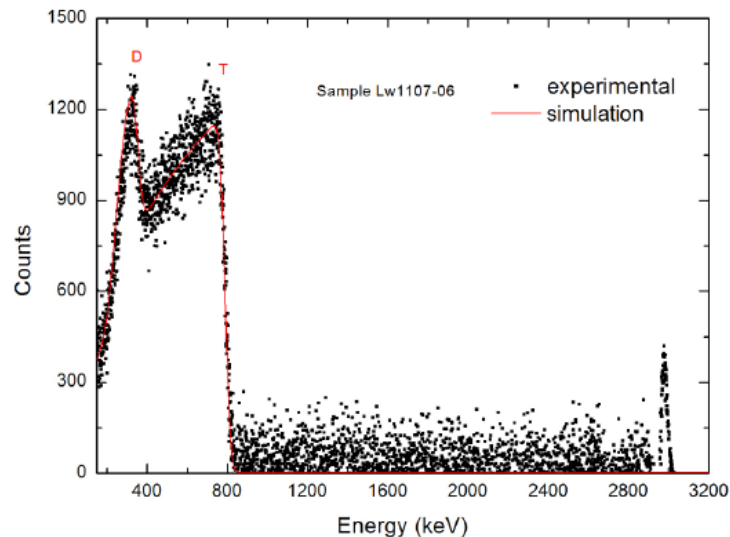
- 核分析
 - 氚分析、纳米薄膜分析...
- 核物理
 - 韧致辐射双微分截面、核天体反应截面
- 中子物理
 - 中子截面、中子探测器研制
- 离子辐照
 - 多场耦合辐照平台，核材料辐照
- 基于加速器的原子分子物理
-



3MV串列加速器IBA终端



扣除本底后的样品EBS能谱



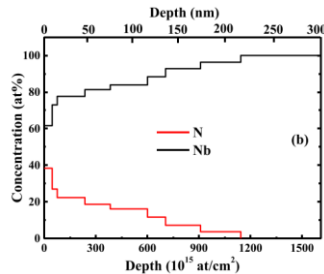
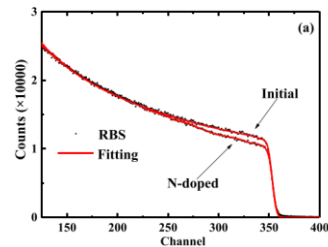
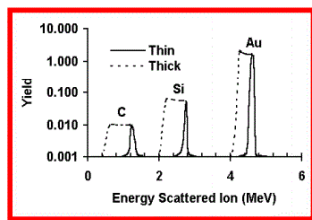
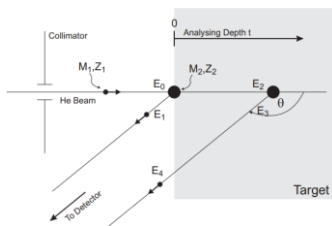
在3MV串列加速器IBA终端开展了氚气样品的EBS分析，提出了BIXS分析方法的标准流程。

B. Liu et al., Fusion Eng. Des. 172, 112751 (2021).

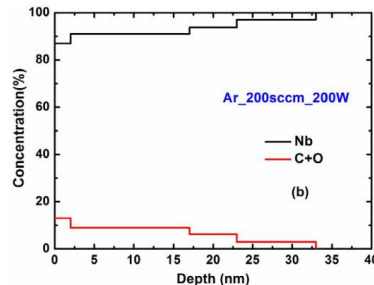
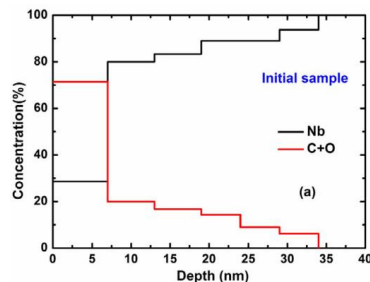
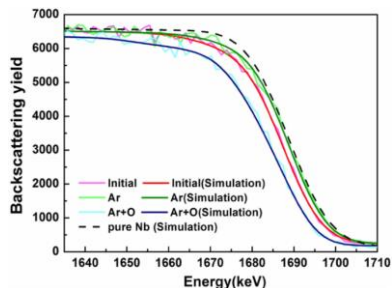
IBA --- 表面微量杂质分析

Nanotechnology 32 (2021) 245701

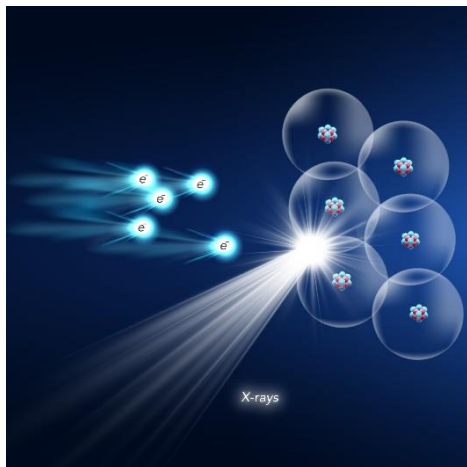
- RBS谱前沿形状->样品表面杂质种类和含量, 高度敏感
- 特别适合分析**纳米薄膜**及其杂质含量和深度分布



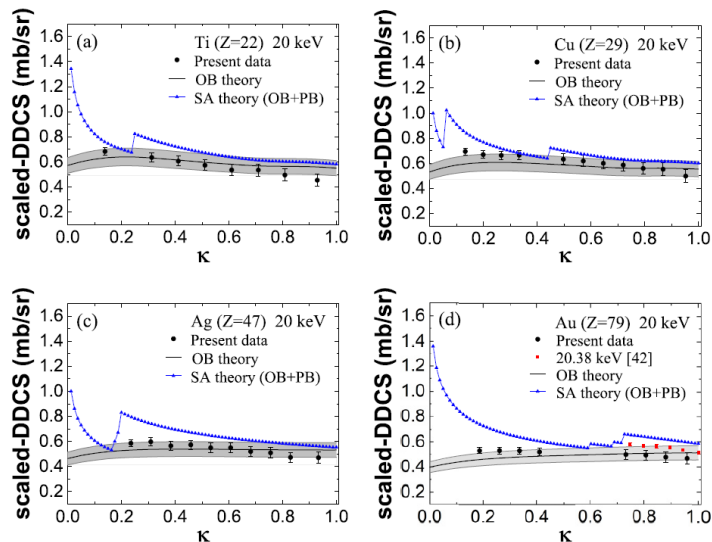
- 等离子体清洗后, 射频超导加速器腔表面**氧含量**变化



韧致辐射示意图



韧致辐射双微分截面测量结果



电子与固体碰撞实验中是否存在极化韧致辐射一直存在争论。

通过实验明确证实：**对固体靶，没有极化韧致辐射。** (靶厚度由加速器RBS方法精确测量)

研究结果以Letter形式发表在Physical Review A上。

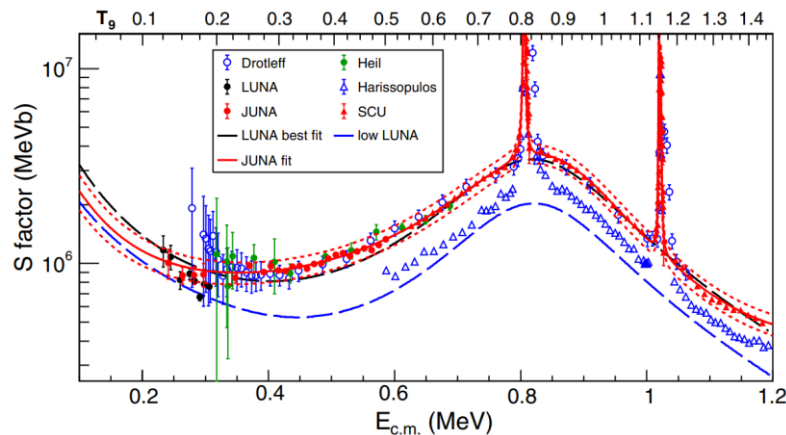
审稿人认为研究工作对一个长期存在的问题给出了明确的答案。 *L. Li et al., Phys. Rev. A107, L020802 (2023)*



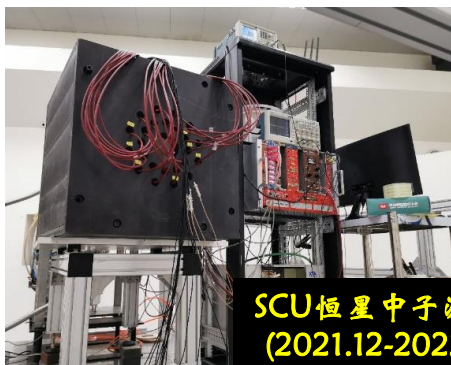
比铁更重的元素(超铁元素)的起源和丰度问题是21世纪“物理学的11个未解之谜”之一。

$^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反应为宇宙中超铁元素的产生提供中子。

宽能区 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反应截面实验测量



在锦屏和川大加速器上开展了宽能区($E_{\text{cm}}=0.24-1.9\text{MeV}$)范围自洽的实验测量, 测量结果对阈值附近共振的ANC值和电子屏蔽势进行了约束, 提高了反应率精度, 为天体物理提供了目前最精确的反应率数据。



SCU恒星中子源实验
(2021.12-2022.3)

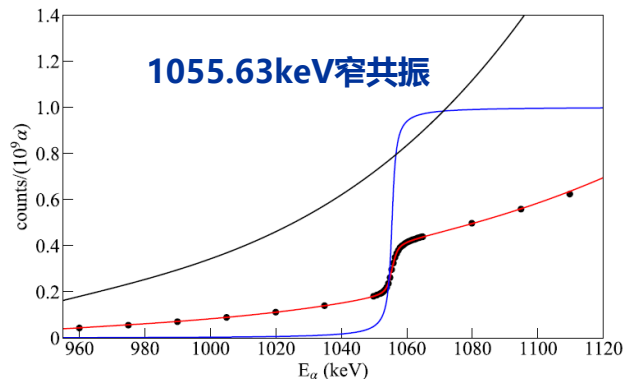
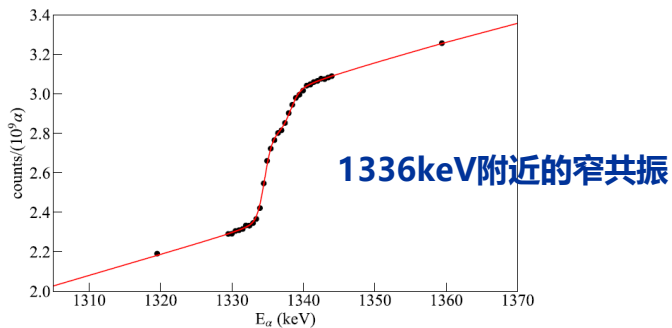
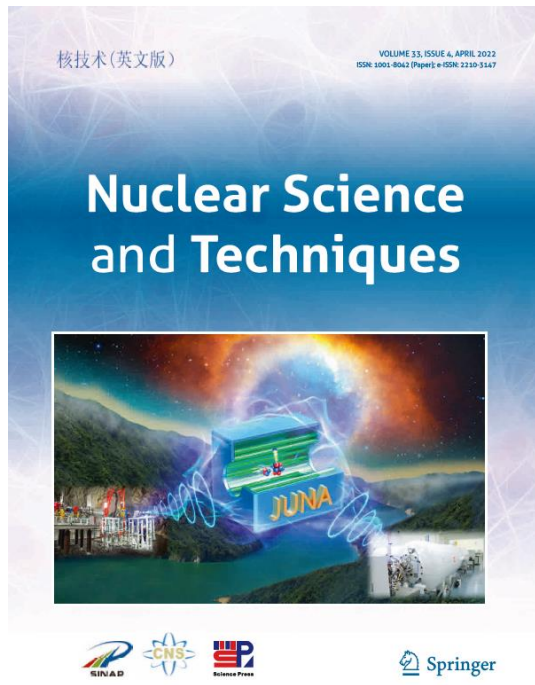


TABLE II. Resonance strength and the thick target yield of the $E_\alpha = 1055.63$ keV resonance.

Reference	$\omega\gamma/eV$	$Y_{\max} (n/\mu\text{C})^a$
This work	16.9 ± 0.4^b	6460 ± 152^c
Bair <i>et al.</i>	12.9 ± 0.6^d	4475 ± 223
Brune <i>et al.</i>	11.9 ± 0.4^e	4410 ± 170
Harissopulos <i>et al.</i>	12.1 ± 0.6	



对 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反应，实验精确测量了1055.63keV和1336keV窄共振的厚靶产额，提取了窄共振的共振强度和厚靶产额，为 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 和 $^{16}\text{O}(n, \alpha)^{13}\text{C}$ 反应数据评估提供了基准数据。



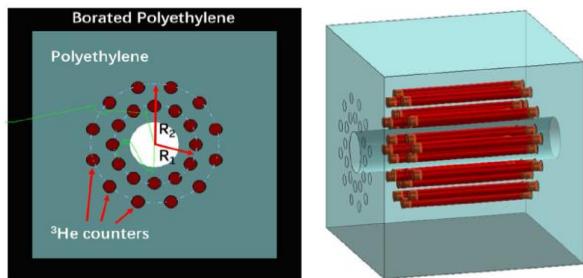
宣传视频



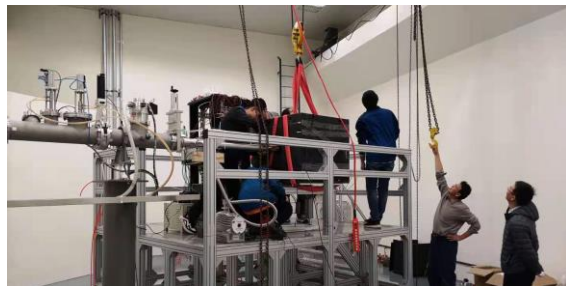
<https://mp.weixin.qq.com/s/K-uBAjCMkvOI9QhzK>

被NST期刊选为封面论文，期刊还为该论文做了宣传视频。

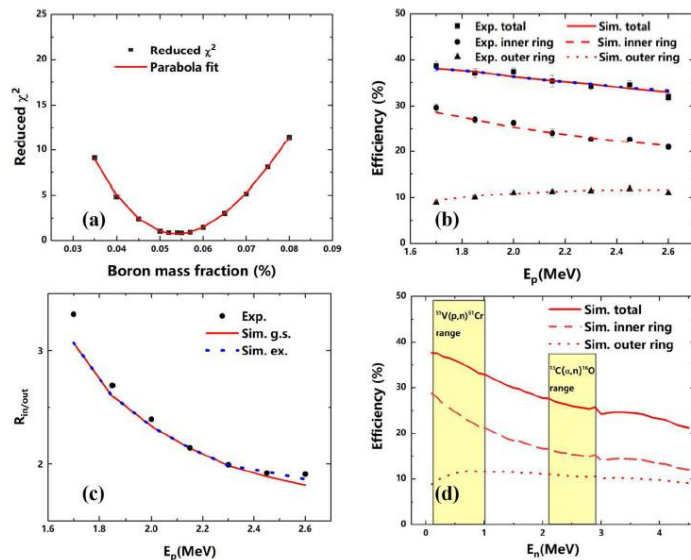
探测器阵列示意图



效率刻度实验@SCU



实验测量与Geant4模拟的比较



为了开展 $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$ 反应实验研究，研制了低本底中子探测器阵列，在锦屏深地核天体实验室测量的中子本底低至4.5cnt/h，并在3MV串列加速器核物理实验终端开展了中子探测效率的实验测量，首次定量研究了 $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$ 反应角分布对效率的影响。

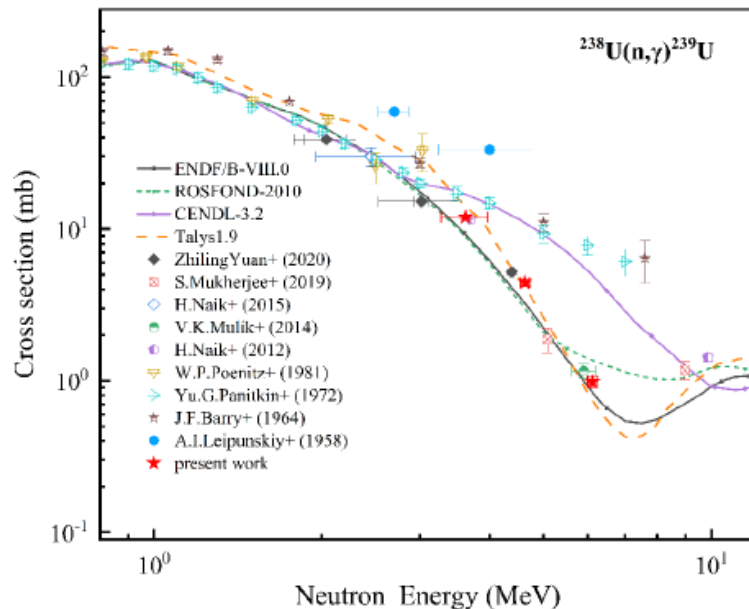
中核集团科学技术奖—特等奖 (参与单位之一)



实验装置照片

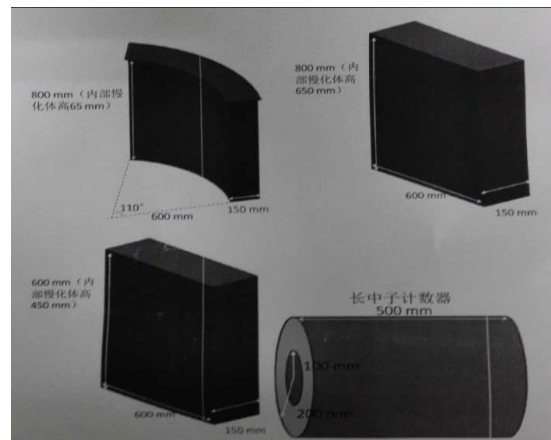


测量的 $^{238}\text{U}(n,\gamma)^{239}\text{U}$ 反应截面



在3MV串列加速器核物理实验终端，利用活化法测量了3-7MeV中子能区 $^{238}\text{U}(n,\gamma)^{239}\text{U}$ 反应截面，澄清了该能段的数据分歧。

- 加速器单能中子源
 - (p,n), (d,n), (α ,n)
- 探测器标定, 提供技术服务
 - 中物院一所
 - 中物院二所
 - 核工业西南物理研究院
 - 海军特色医学中心
 -



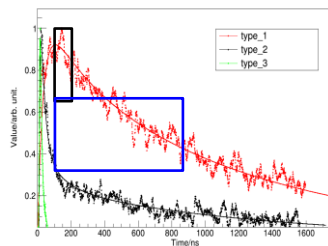
■ 基于CLYC进行中子伽马多模探测

- 混合辐射场监测、辐射剂量与防护...

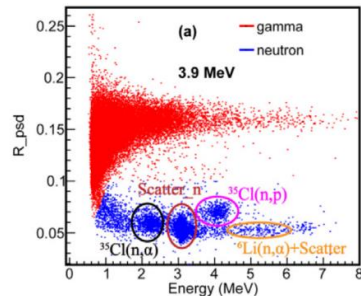
■ 机器学习算法，可实现：

- 热中子高效探测， ${}^6\text{Li}(n, \alpha)$
- 优良中子伽马甄别， $\text{FOM}>2$
- 高能中子能谱测量， ${}^{35}\text{Cl}(n, p)$ ，能量分辨15%
- 良好伽马能量分辨， $\sim 5\%@662\text{ keV}$
- 堆积脉冲种类识别， $\text{FOM}>1.1$ @计数率 $3\text{E}6\text{cps}$ ，计数型→电流型转换阶段
- 核反应通道甄别 $\text{Li}(n, \alpha), \text{Cl}(n, p)$ ，95%准确度

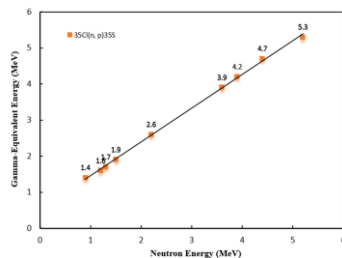
IEEE T Nucl Sci, 2023, 70, 2148
 Nucl Instr Meth A, 2023, 1055, 168561
 Nucl Instr Meth A, 2023, 1055, 168533
 Nucl Instr Meth A, 2022, 1028, 166328



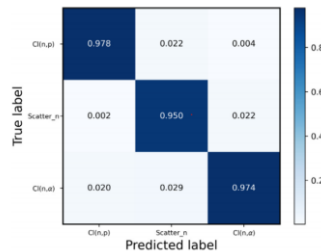
中子伽马波形差异



中子伽马2D分布



(n,p)能量沉积与入射中子能量关系

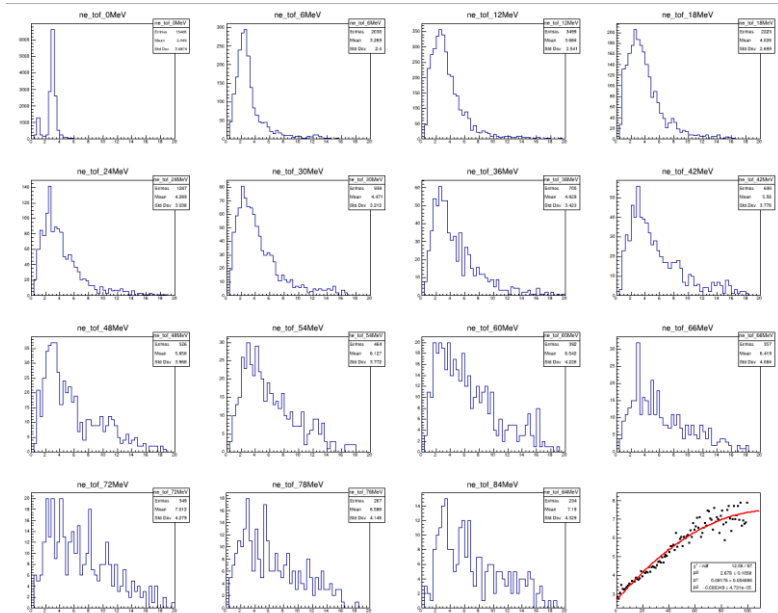
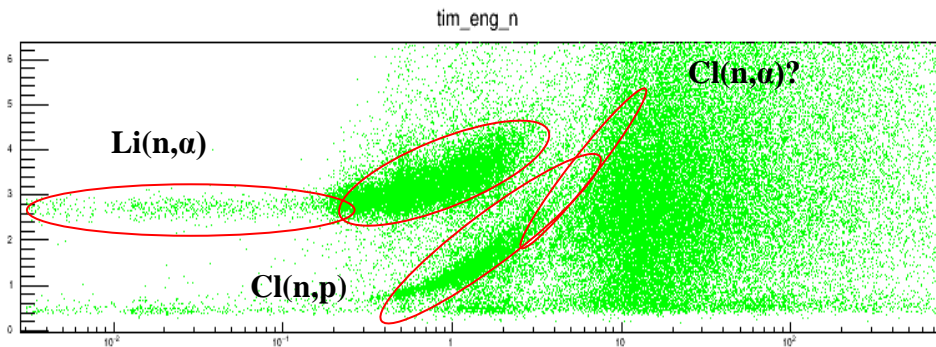
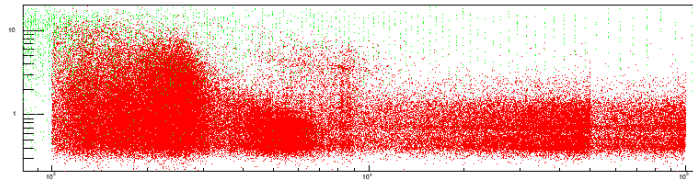
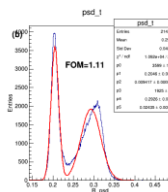
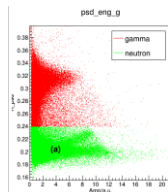


反应通道甄别

感谢白光源提供实验条件

CLYC进行白光测试

- 中子伽马存在显著差异
- 伽马持续存在
- 0-10MeV, 可分辨反应通道, $\text{Li}(n,\alpha), \text{Cl}(n,p)$
- 10MeV以上能区复杂, 中子能量和沉积能量正相关。铅砖慢化影响



感谢白光源提供实验条件

■ 动态范围提升算法

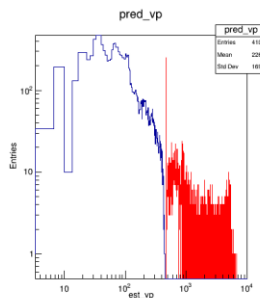
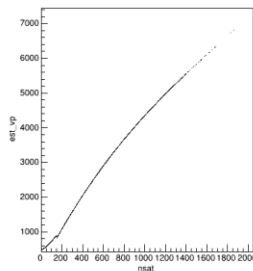
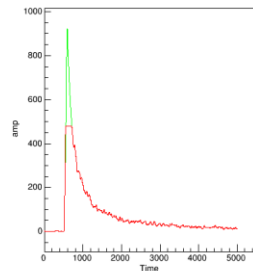
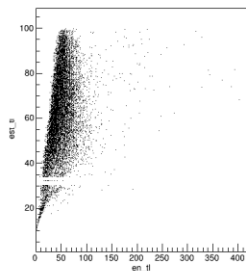
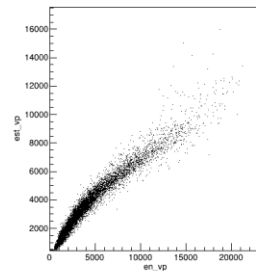
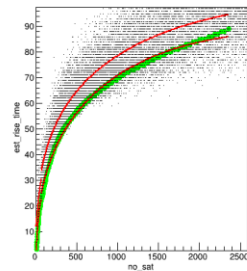
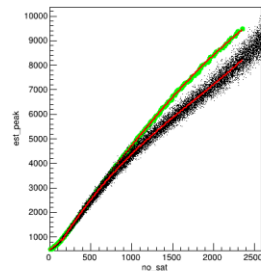
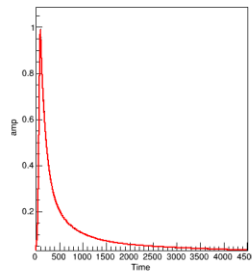
- 采集卡动态范围有限
- 信号幅度差异很大
- 出现大量饱和信号

■ 饱和信号的重建

- 拟合不饱和信号特征
- 根据饱和平台长度→实际峰位、峰值
- 补齐饱和信号
- 动态范围提升9倍

■ 机器学习算法进行重建

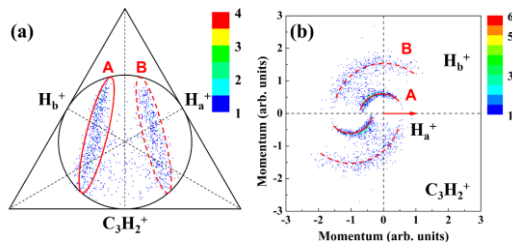
- 进行中



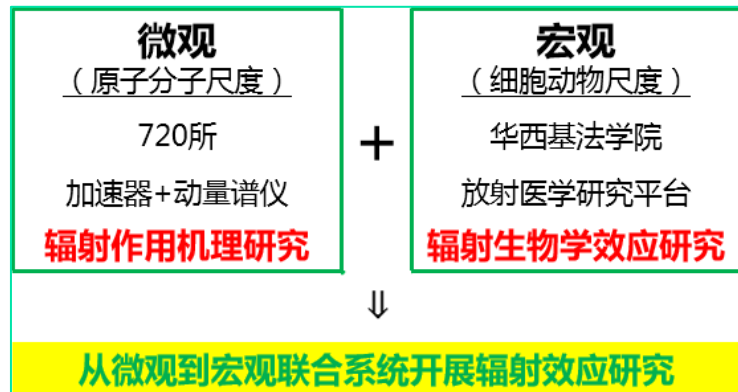
从微观到宏观：辐射效应研究 冷靶反冲离子动量谱仪



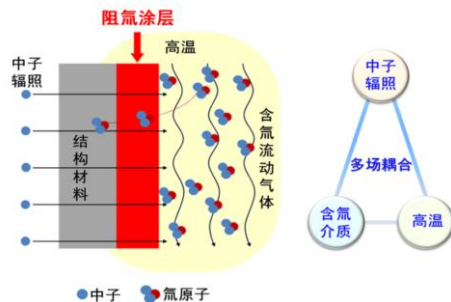
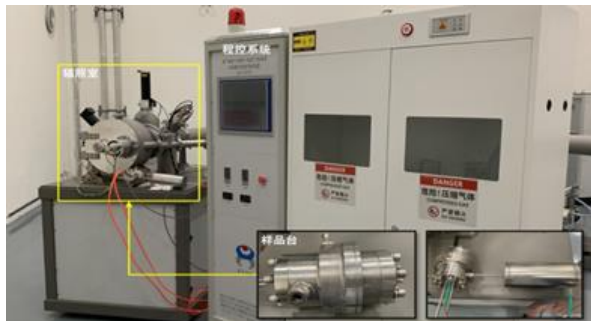
研究离子束辐射下，生物分子、星际介质等靶分子的碎裂机制



发现He与丙二烯分子碰撞时，分子碎裂之前会发生超快氢迁移过程，Physical Review A 105, 022818 (2022)。



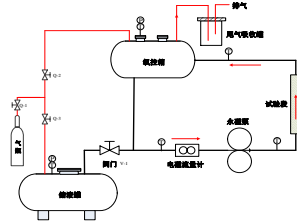
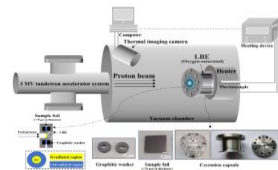
■ 离子辐照-热循环-氢（气体）渗透多场耦合测试装置



模拟聚变堆工况“离子辐照-热循环-氢（气体）渗透”多场耦合测试装置是同类型装置**国际第2台**，技术指标水平优于欧盟（CIMAT）的电子辐照多场耦合装置

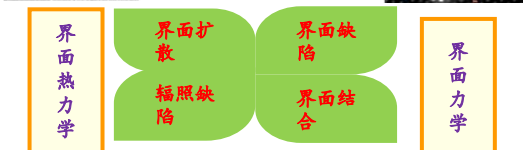
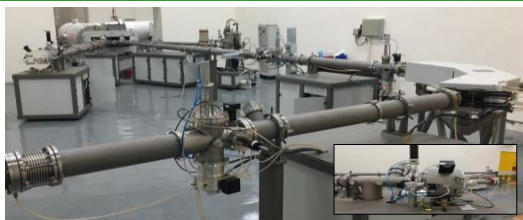
■ 质子辐照+静/动态铅铋腐蚀多场耦合实验装置

模拟第四代核能系统铅冷快堆材料近工况服役性能的“质子辐照+铅铋腐蚀”多场耦合实验装置是**国内首台、国际第四台**同类装置，其沿用了国际上主流的质子辐照对中子辐照进行模拟实验

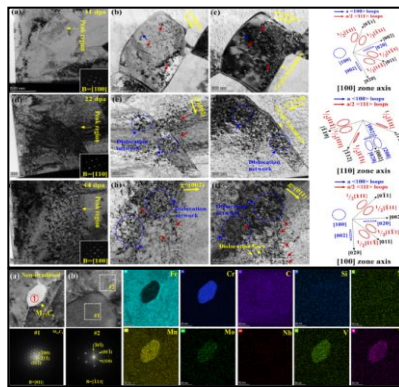
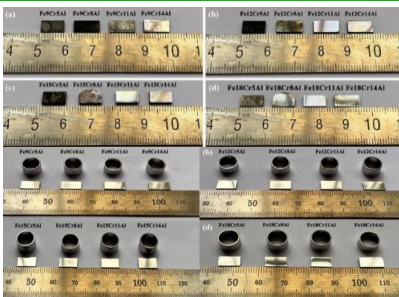


装置特色优势
不依赖于反应堆，接近实际工况评价材料服役性能，进行快速筛选

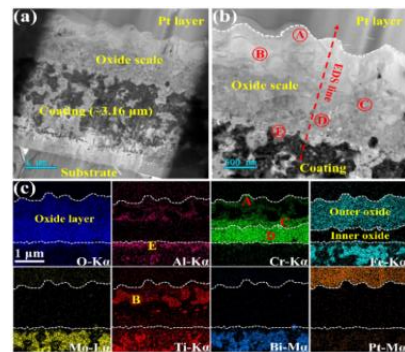
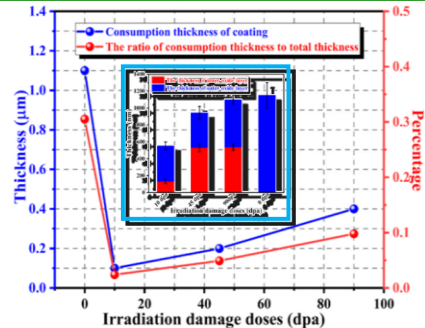
反应堆结构材料及燃料的辐照损伤效应研究



U-Mo金属燃料失效模式及辐照损伤



反应堆F/M钢包壳辐照损伤微观结构



包壳涂层辐照损伤及其腐蚀协同行为

开展了多种反应堆结构材料、耐工质腐蚀涂层、弥散燃料基体的辐照损伤效应研究，发表系列高水平论文(>25)、部分涂层研究成果获得业界认可应用，获得科技部ITER项目、国家自然科学基金重点项目等多项课题资助

基于CS30回旋加速器的同位素研制及应用



1.2m回旋加速器



CS-30回旋加速器



- 自上世纪80年起一直开展加速器同位素的研制与应用工作，是国内这一领域最重要的研究与人才培养基地之一；
- 先后开展过 ^{57}Co 、 ^{89}Zr 、 ^{109}Cd 、 ^{111}In 、 ^{199}Tl 、 ^{210}Po 、 ^{211}At 等十余种同位素及放射源的研制工作，种类全国最多；
- 已获得国家科技进步奖1项、国家发明奖1项，省部级科技奖10余项；
- 基于CS30构建了目前国内高校和西部地区唯一的综合性加速器同位素研究平台。

四川大学已研制的部分加速器核素

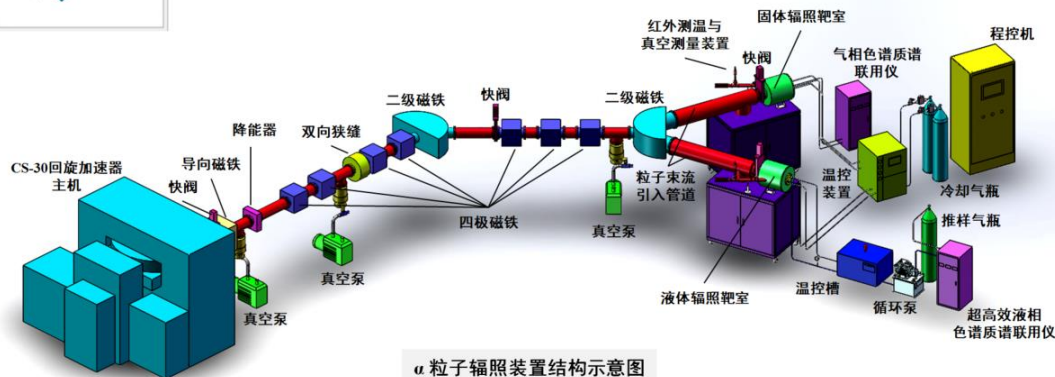
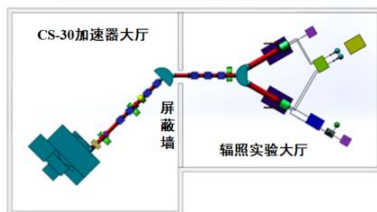
核素	半衰期	衰变类型	生成核反应
^{54}Mn	312.3d	EC	$^{51}\text{V}(\alpha, n)^{54}\text{Mn}$
^{57}Co	271.8d	EC	$^{55}\text{Fe}(d, n)^{57}\text{Co}$
$^{62}\text{Zn}-^{62}\text{Cu}$	9.21h(9.73Min)	EC(β^+)	$^{63}\text{Cu}(p, 2n)^{62}\text{Zn}$
$^{68}\text{Ge}-^{68}\text{Ga}$	270.8h(68Min)	EC(β^+)	$^{69}\text{Ga}(p, 2n)^{68}\text{Ge}$
^{89}Zr	78.4h	EC(β^+)	$^{89}\text{Y}(p, n)^{89}\text{Zr}$ $^{89}\text{Y}(d, 2n)^{89}\text{Zr}$
^{98}Tc	$4.2 \times 10^6 \text{a}$	β^-	$^{98}\text{Mo}(d, 2n)^{98}\text{Tc}$
^{109}Cd	463d	EC	$^{109}\text{Ag}(d, 2n)^{109}\text{Cd}$
^{111}In	67h	EC	$^{112}\text{Cd}(p, 2n)^{111}\text{In}$
^{123}I	13.2 h	EC	$^{121}\text{Sb}(\alpha, 2n)^{123}\text{I}$
$^{178\text{m}}\text{Hf}$	31a	IT	$^{176}\text{Yb}(\alpha, 2n)^{178\text{m}}\text{Hf}$
^{199}Tl	7.42 h	EC	$^{197}\text{Au}(\alpha, 2n)^{199}\text{Tl}$
^{210}Po	138.4d	α	$^{209}\text{Bi}(p, \gamma)^{210}\text{Po}$
^{211}At	7.21h	α	$^{209}\text{Bi}(\alpha, 2n)^{211}\text{At}$
^{236}Np	$1.55 \times 10^5 \text{a}$	EC(β^-)	$^{238}\text{U}(p, 3n)^{236}\text{Np}$

基于CS-30回旋加速器的同位素研制及应用



基于回旋加速器的 α 辐照效应平台构建及萃取体系的 α 辐照效应研究

α 粒子辐照装置空间布局图



α 粒子辐照装置结构示意图

- 正在基于CS-30回旋加速器构建模拟 α 粒子辐照效应的实验技术平台；
- 拟开展TiAP、TODGA等含P、N类新型萃取剂的外源 α 辐照效应研究，获取其辐解规律及对镅系、铯系离子的萃取性能影响。

■ 致谢

- 感谢各位领导专家的支持和帮助

■ 素材来源

- 安竹，刘宁，杨吉军，林炜平，罗小兵，张坤，胡智民.....
- 廖小东，宋明江，王鹏，范轶翔，白帆，刘根

欢迎到川大访问指导，谢谢！

