



**中国科学院近代物理研究所**  
Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences



**中国科学院**  
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

## **第十届CSNS反角白光中子实验装置用户研讨会**

# **ADS核数据研究进展及 CiADS核数据实验平台建设**

**报告人：韩瑞**

**研究团队：陈志强、田国玉、刘丙岩、张鑫、孙慧等**

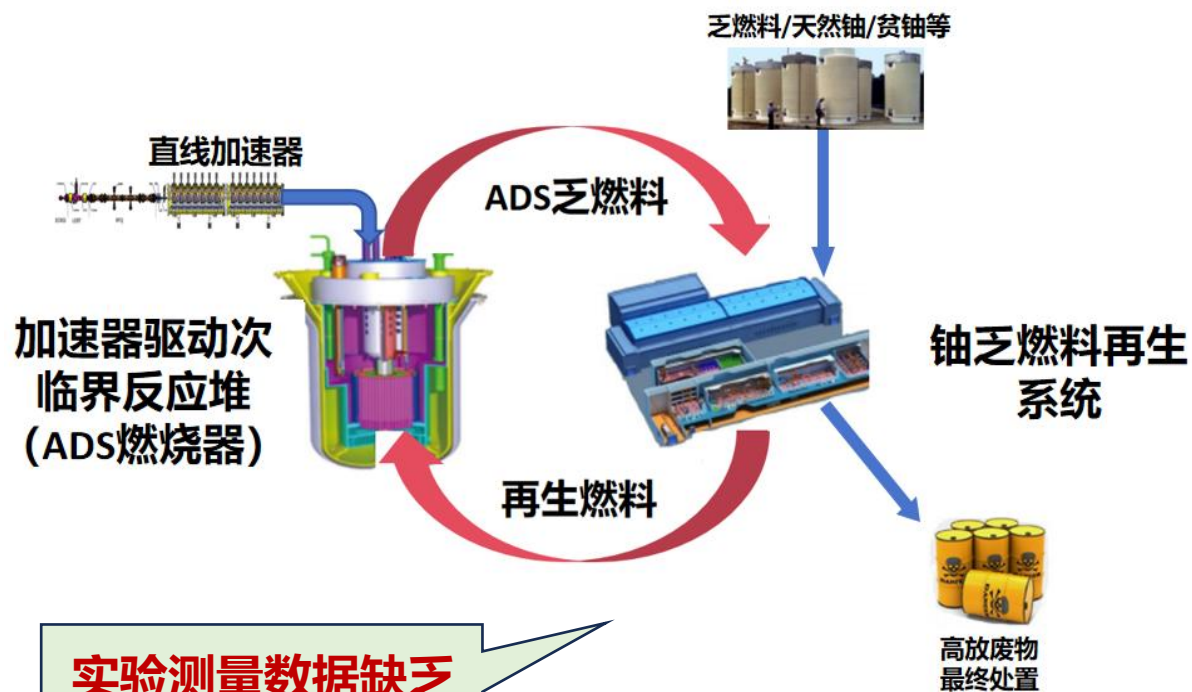
**2026年07月15日**

## 汇报提纲

- 研究背景及意义
- ADS核数据需求
- ADS核数据研究进展
- CiADS核数据实验终端建设情况介绍
- 总结

- 2011年，中国科学院近代物理研究所牵头，启动中科院战略性先导科技专项“未来先进核裂变能—ADS嬗变系统”。
- 2015年12月，国家发改委正式批准“加速器驱动嬗变研究装置” (China Initiative Accelerator Driven System, 简称CiADS)的立项。
- 2025年，“两种新一代核裂变能关键技术研究”正式获批国家重大专项。
- ✓ 加速器驱动的先进核能系统（ADANES）：Accelerator Driven Advanced Nuclear Energy System（中国科学院近代物理研究所）
- ◆ 乏燃料再生循环利用
- ✓ 钍基熔盐堆核能系统（TMSR）：Thorium Molten Salt Reactor nuclear energy system（中国科学院上海应用物理研究所）
- ◆ 钍铀燃料循环利用

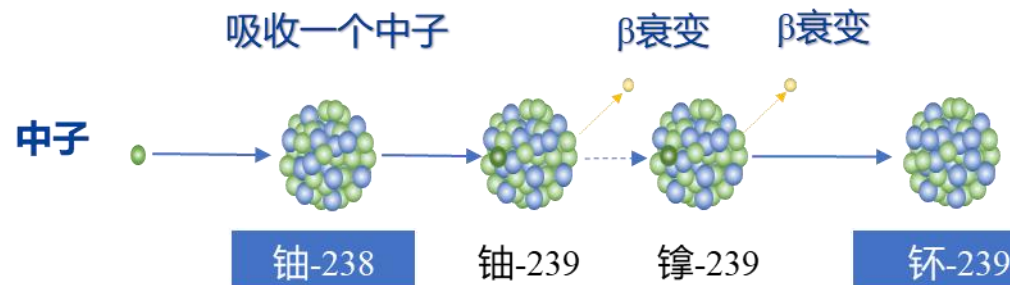
## ➤ 加速器驱动先进核能系统：



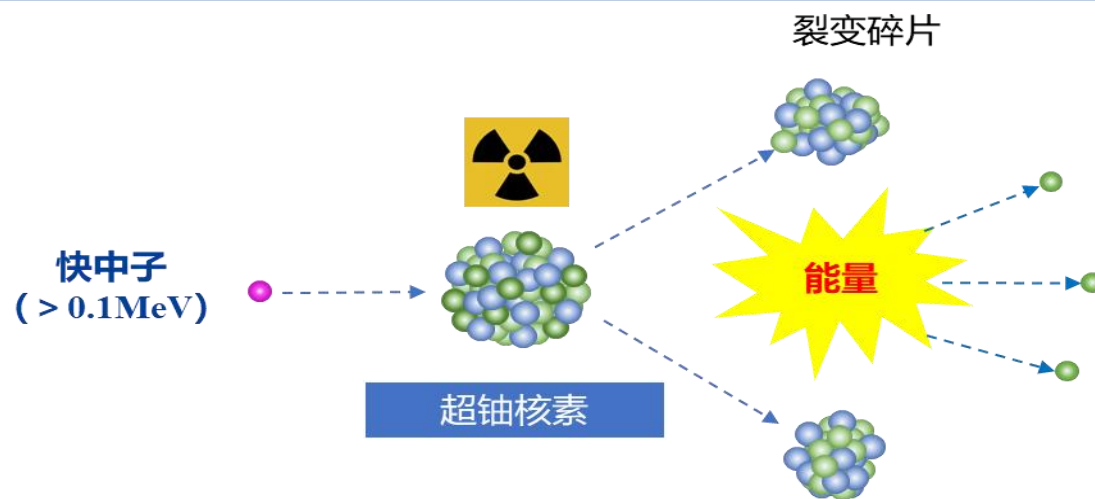
加速器驱动嬗变研究装置示意图

## ➤ 增殖：铀资源稀缺

- 铀-238  $\rightarrow$  钚-239 (易裂变)



## ➤ 嬗变：乏燃料（长寿命放射性产物）





## ➤ 国际评价数据库中子评价数据的情况：

| 数据库                  | 国家   | 发布时间       | 主要特点                                                                                             |
|----------------------|------|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>CENDL-3.2</b>     | 中国   | 2020.6.12  | 中子能量<20MeV                                                                                       |
| <b>ENDF/B-VIII.1</b> | 美国   | 2024.8.30  | 中子能量<20MeV，部分拓展至30MeV                                                                            |
| <b>JEFF-3.3</b>      | 欧洲   | 2017.11.20 | 中子能量<20MeV                                                                                       |
| <b>JENDL-5.0</b>     | 日本   | 2021.12.27 | 中子能量<200MeV                                                                                      |
| <b>ADS-2.0</b>       | IAEA | 2008.12    | U-232,Np-237,Np-239,Cm-242,Cm-247取自JENDL,W-180,W-182,W-183,W-184,W-186IAEA自己评价，其它的取自ENDF/B-VII.0 |

## ➤ 主要核素或元素基础核数据：

| 靶材料                                        | 结构材料                                                                        | 屏蔽材料                          | 核燃料、Th-U循环相关                                                                                                                                                                                            | 其他材料                                                                                                                                                                                                      |
|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Pb, Bi, W, Fe,<br>Ni, U, Zr,<br>Sn ,Ta, Al | Zn, Cu, Ni, Co, Fe,<br>Mn, Cr, Ti, Ca, Ar,<br>Al, Mg, Na, O, N, C,<br>B, Be | C, N, O, Si,<br>P, Ca, Ti, Fe | $^{238}\text{U}$ , $^{235}\text{U}$ , $^{239}\text{Pu}$ , $^{238}\text{Pu}$ 、<br>$^{232}\text{Th}$ , $^{231}\text{Pa}$ , $^{232}\text{Pa}$ , $^{233}\text{Pa}$ ,<br>$^{233}\text{U}$ , $^{234}\text{U}$ | $^{79}\text{Se}$ , $^{93}\text{Zr}$ , $^{99}\text{Tc}$ , $^{107}\text{Pd}$ ,<br>$^{126}\text{Sn}$ , $^{129}\text{I}$ , $^{135}\text{Cs}$ , $^{237}\text{Np}$ ,<br>$^{241}\text{Am}$ , $^{242}\text{Cm}$ 等 |

## ➤ 通用数据库不能满足目前ADS设计和运行需求

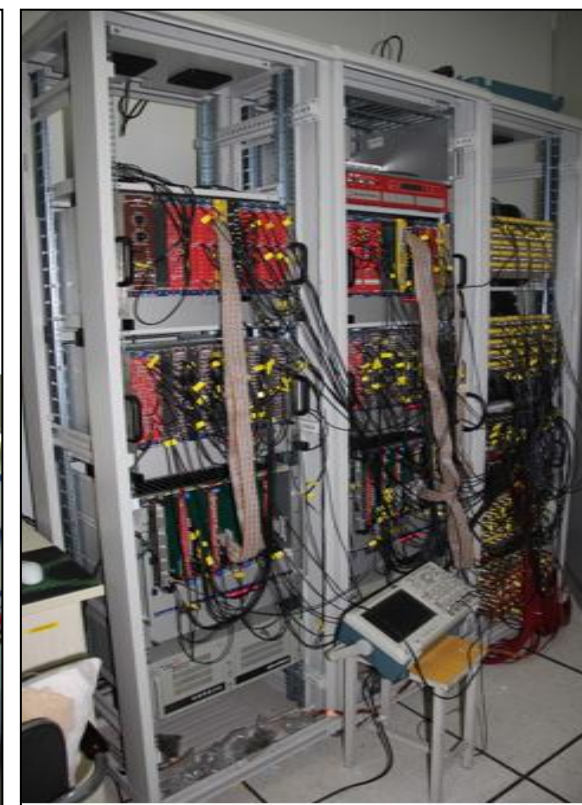
- 基于中国科学院近代物理研究所HIRFL-CSR加速器，建立了核数据实验终端；
- 搭建了核数据实验研究平台，开展了一系列核数据实验测量及理论研究，主要包括出射中子能谱和产额、轻带电粒子测量，活化法剩余核放射性产物产生截面测量等。



兰州重离子加速器与冷却储存环 (HIRFL-CSR)



核数据实验研究平台





## □ ADS关键材料中子学实验测量：

- 开展“400 AMeV  $^{12}\text{C} + \text{Pb}$ ”实验（厚靶，裸靶，中子活化法），散裂靶中子学性能研究；（2012年）
- 开展“165 - 350 MeV/u  $^{12}\text{C} + \text{H}_2\text{O}$ ”实验，轻带电粒子谱仪性能测试；（2013年）
- 开展“400 AMeV  $^{12}\text{C} + \text{Pb}/\text{W}$ ”实验（厚靶，水浴中子活化法），散裂靶中子学性能研究；（2013年）
- 开展“400 MeV/u  $^{16}\text{O} + \text{Pb}/\text{W}$ ”实验（薄靶，在线测量），中子及轻带电粒子能谱及角分布；（2014年）
- 开展“250 AMeV  $\text{p} + \text{Pb}/\text{W}$ ”实验（厚靶，水浴中子活化法），散裂靶中子学性能研究；（2014年）
- 开展“300 MeV  $\text{d} + \text{Be}/\text{Pb}$ ”实验，Be靶射程，Be/Pb靶中子能谱测量；（2015年）
- 开展“26.7 MeV/u  $^4\text{He} + \text{W}, \text{Pb}, \text{C}, \text{Be}$ ”实验（厚靶），中子能谱测量；（2018年）
- 开展“80.5 MeV/u  $^{12}\text{C} + \text{W}, \text{Pb}, \text{Au}, \text{Cu}, \text{C}$ ”实验（靶靶），轻带电粒子测量；（2019年）
- 开展“80.5 MeV/u  $^{12}\text{C} + \text{W}, \text{Pb}, \text{C}, \text{Be}$ ”实验（厚靶），中子能谱测量；（2019年）
- 开展“500 MeV/u  $^4\text{He} + ^{238}\text{U}, \text{Pb}, \text{重水}$ （厚靶）”，中子能谱测量；（2023年）
- 开展“500 MeV/u  $^9\text{Be} + ^{238}\text{U}, \text{Pb}, \text{重水}$ （厚靶）”，中子能谱测量。（2025年）

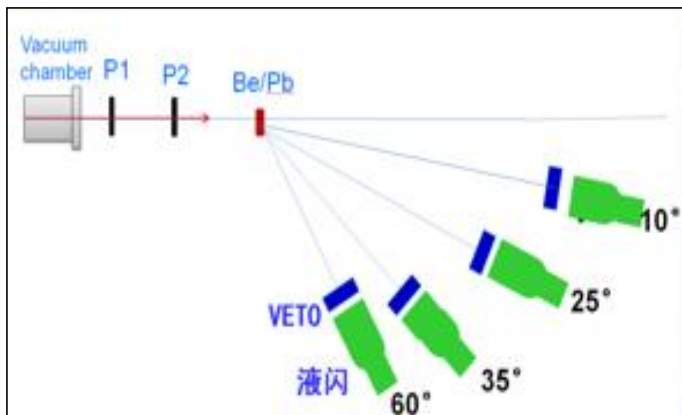
## □ ADS靶堆耦合系统相关实验：

- 开展14MeV中子与镓、钨、石墨、聚乙烯、铀、铅、钨球颗粒、碳化硅及组合实验；泄露中子能谱测量，中子评价数据库的宏观检验（与原子能院核数据重点实验室合作）；（2013-2016年）
- 利用80.5MeV/u  $^{12}\text{C}$ 轰击钨靶产生高能白光中子，开展高能中子在铍、铁、铀、石墨、铅等靶中的输运实验测量；（2019年）

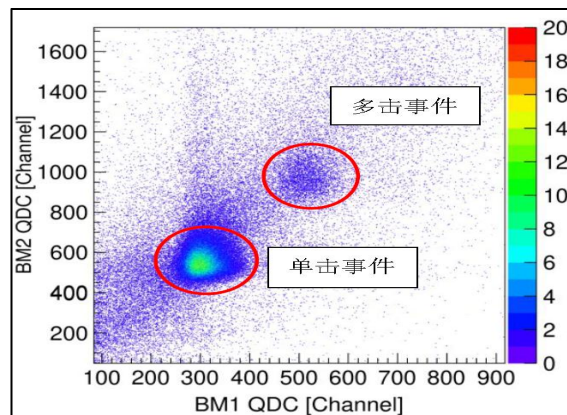
## □ 感生放射性实验：

- 开展20 MeV, 100 MeV质子、 $^4\text{He}$ 与铅、铋、钍、铁、镍、钼、铜等靶反应；（2020年-2026年）
- 开展DT中子与钍、镍、锡、锆、铜、铁等靶反应（与兰州大学、九院合作）（2021年）

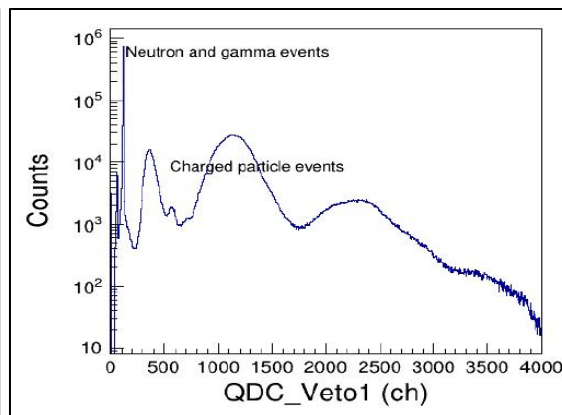
- 利用兰州重离子加速器提供的带电离子束，开展了一系列带电离子诱发核反应出射中子能谱测量、角分布实验测量，采用中子飞行时间谱仪，使用液体闪烁体探测器测量靶体出射中子。



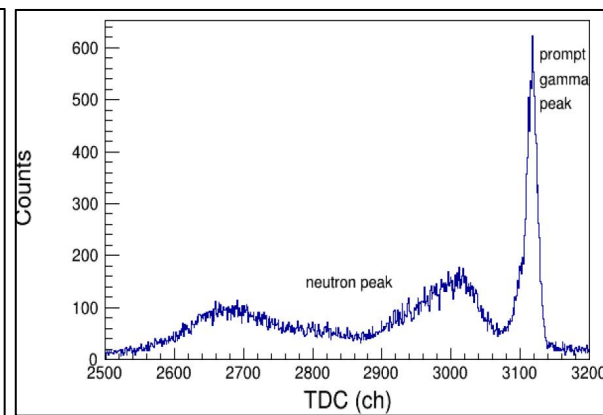
实验装置示意图



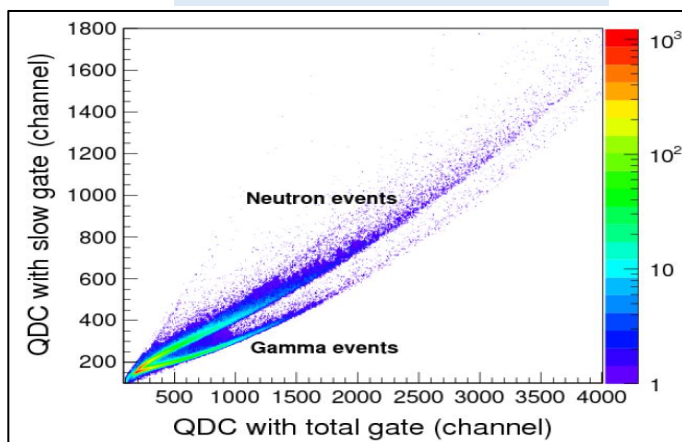
束流信息



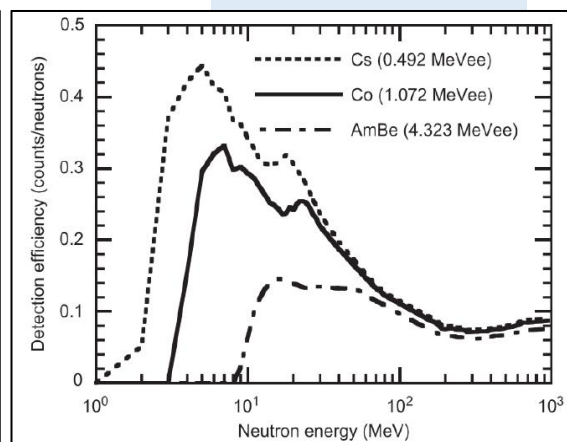
VETO带电粒子事件



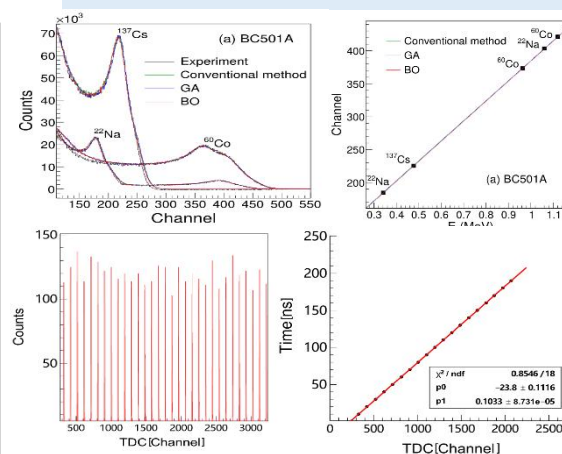
飞行时间谱



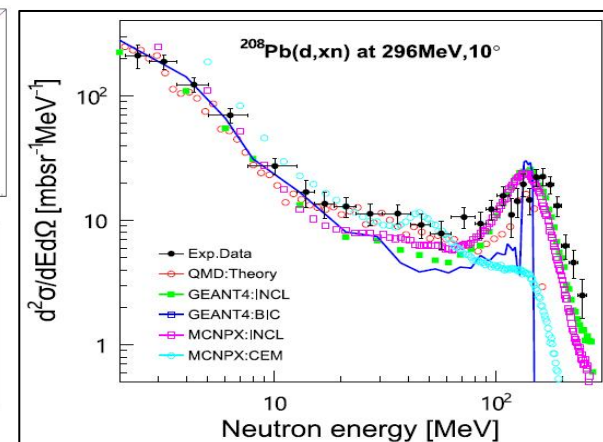
中子伽玛甄别



液闪探测效率

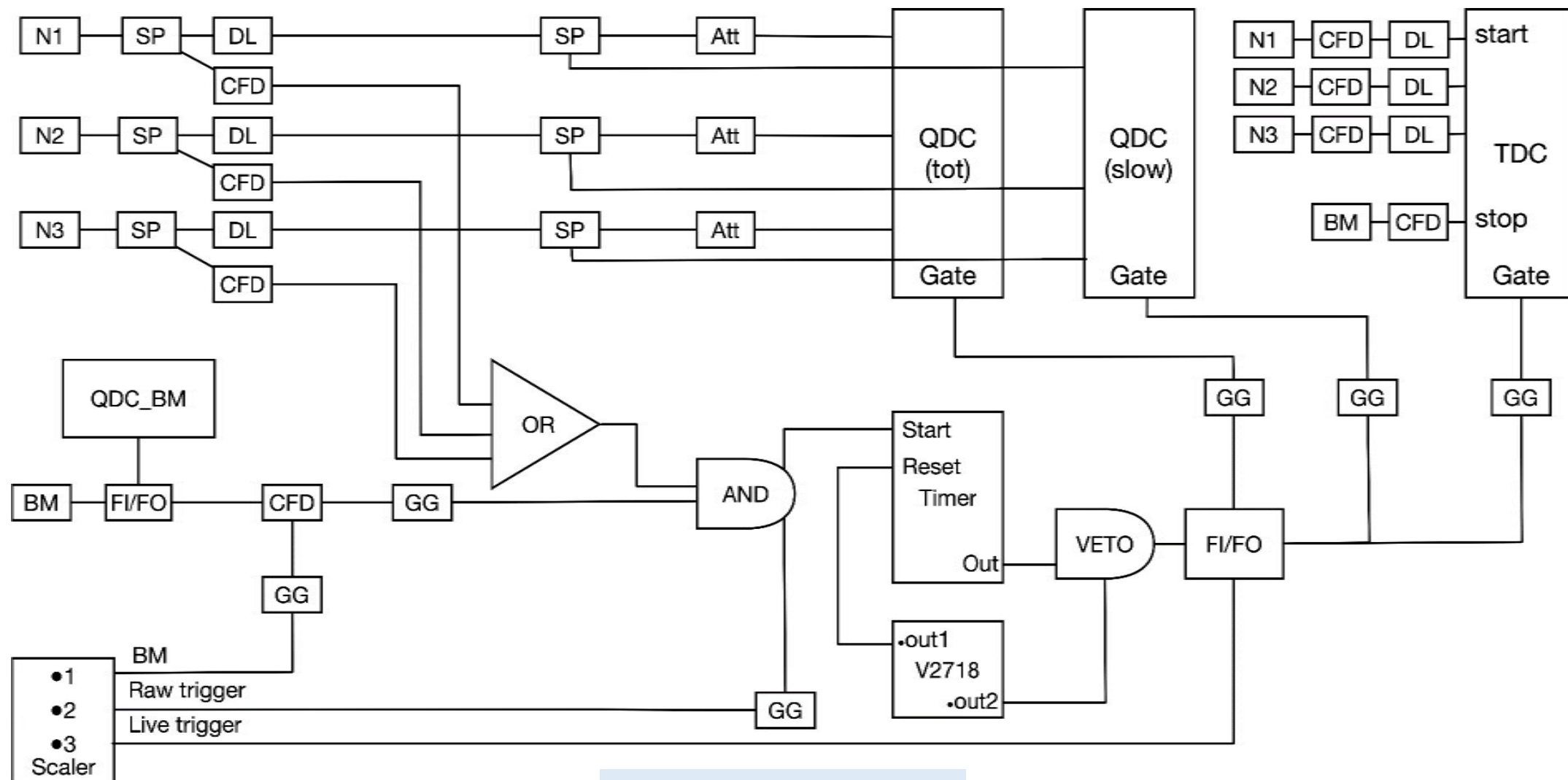


能量与时间刻度



中子能谱

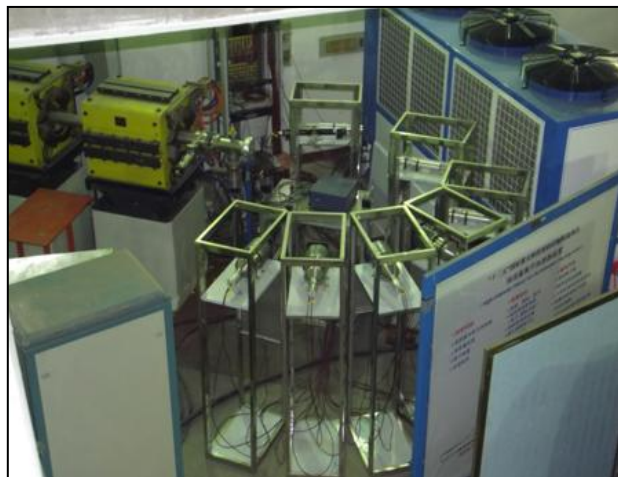
## ➤ 中子飞行时间法测量核电子学线路图



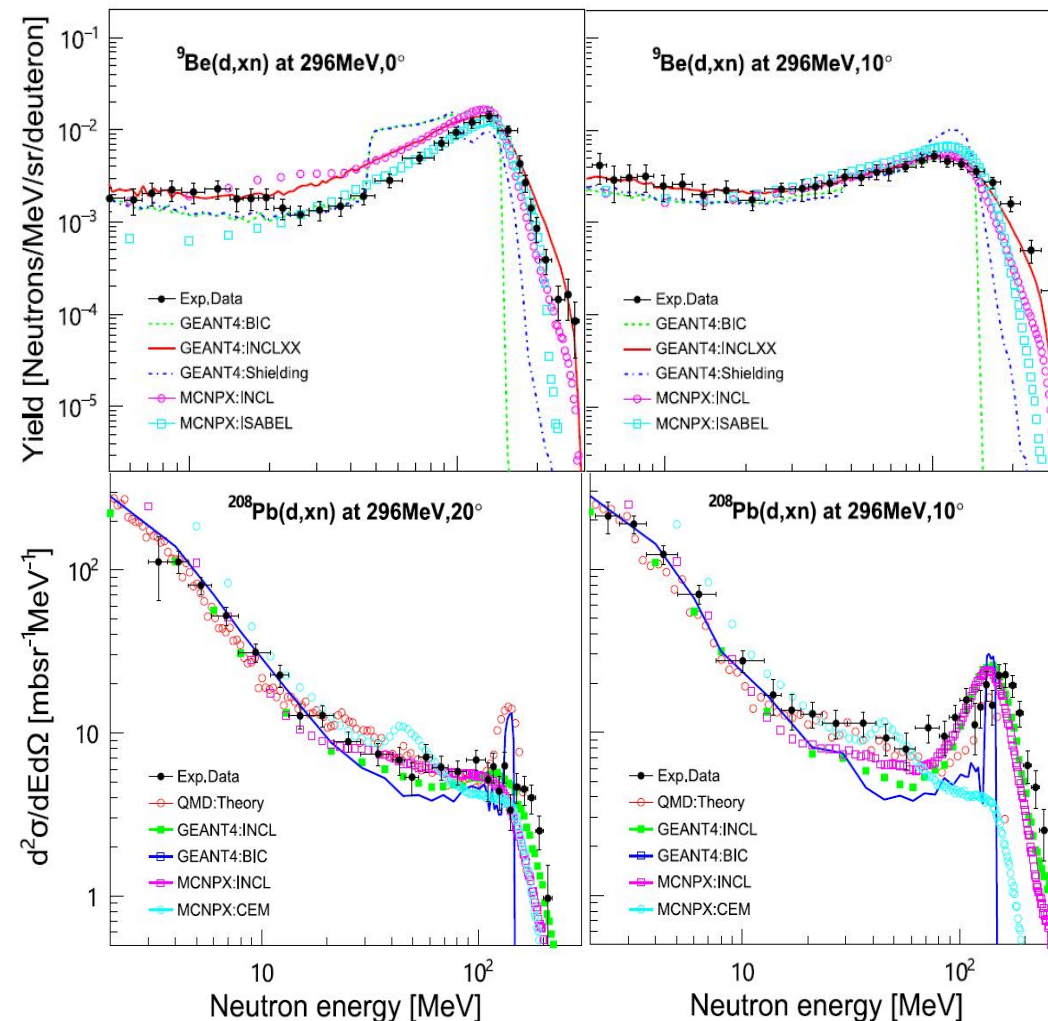
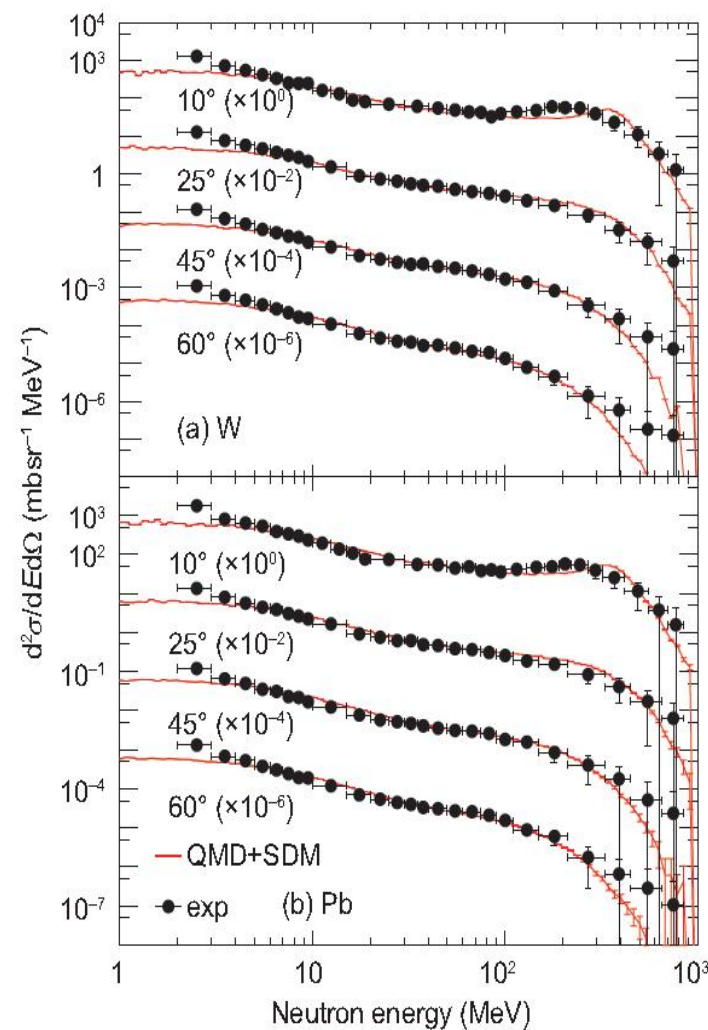
实验核电子学框图



## ➤ 400 MeV/u $^{16}\text{O}$ + Pb/W



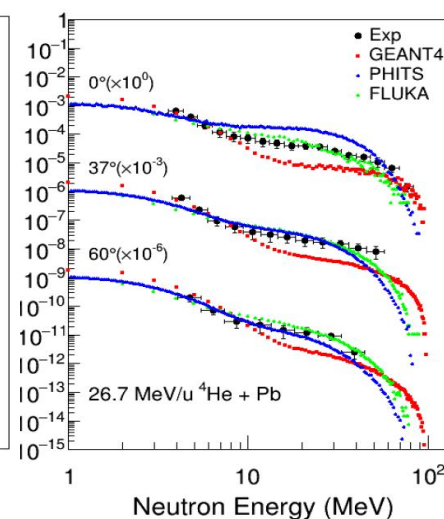
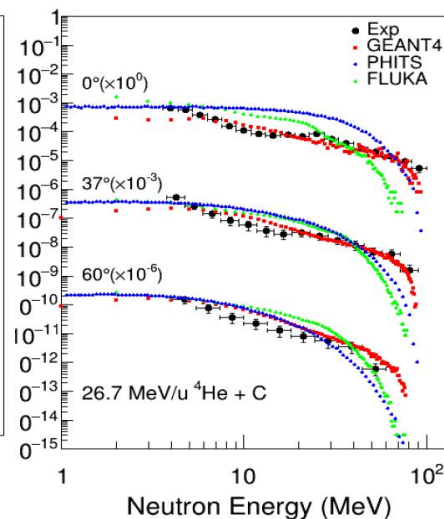
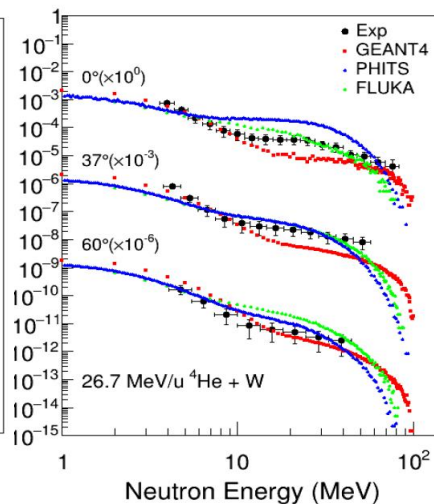
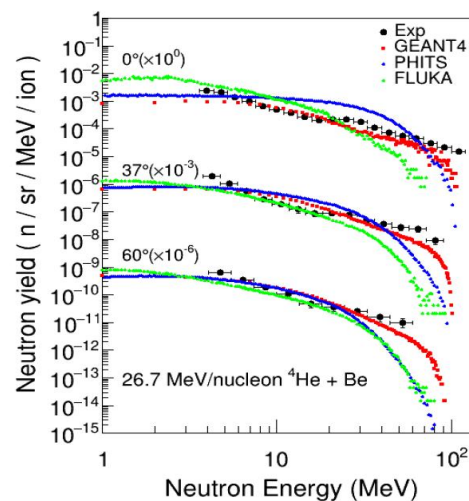
## ➤ 300 MeV d + Be/Pb



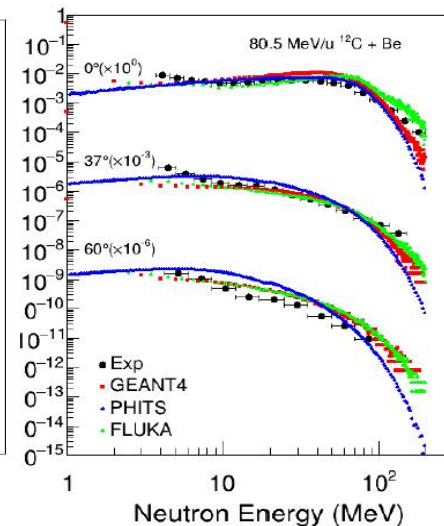
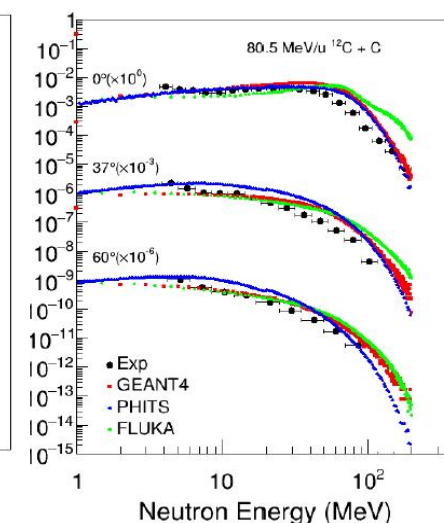
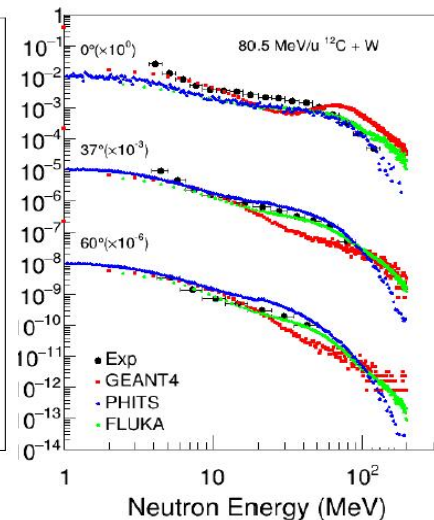
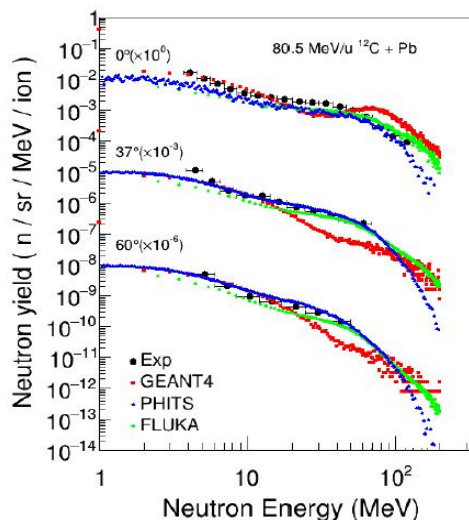
不同角度的出射中子能谱



## ➤ 26.7 MeV/u $^4\text{He}$ + W, Pb, C, Be

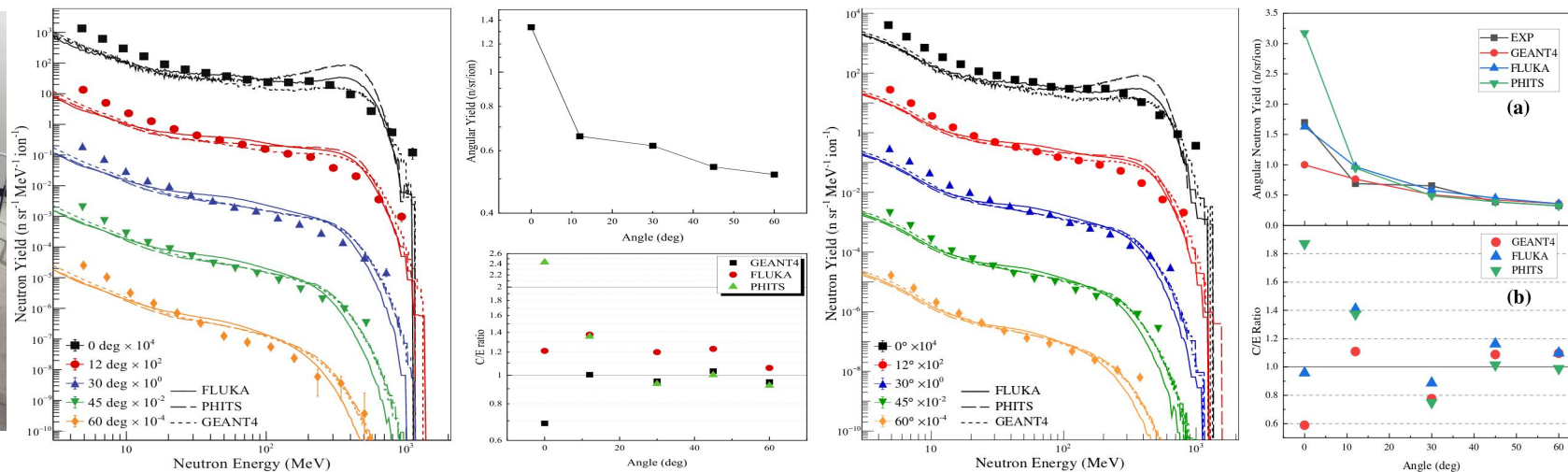
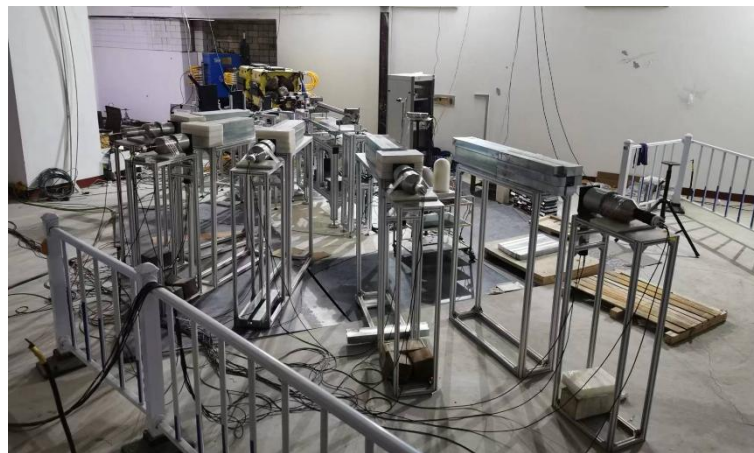


## ➤ 80.5 MeV/u $^{12}\text{C}$ + W, Pb, C, Be

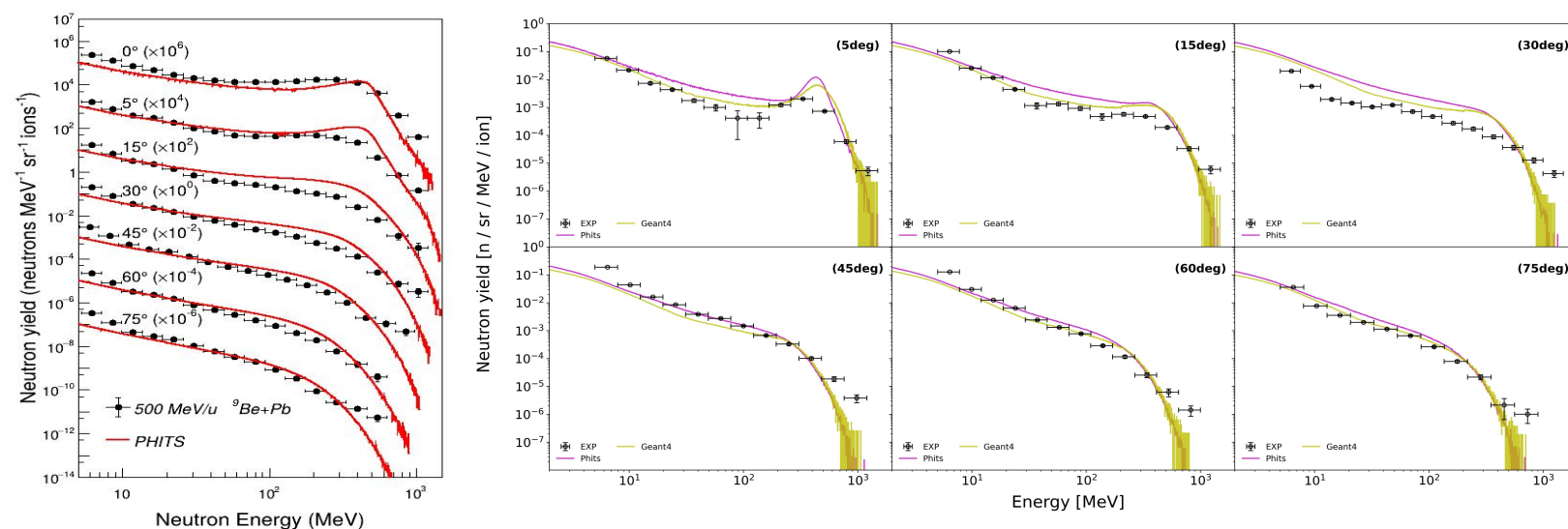




## ➤ 500 MeV/u $^4\text{He}$ + Pb, U, D<sub>2</sub>O中子双微分产额实验测量

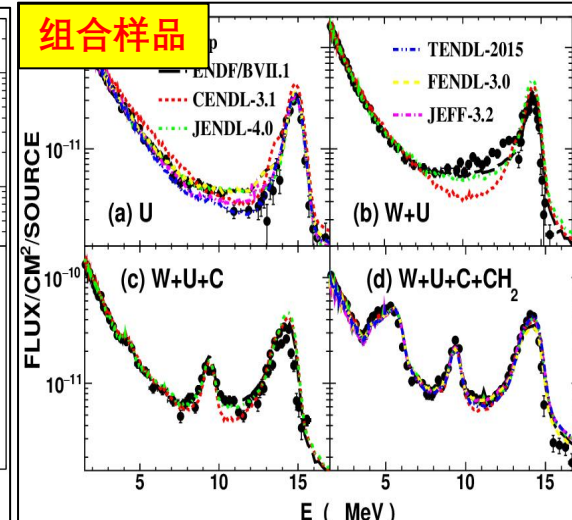
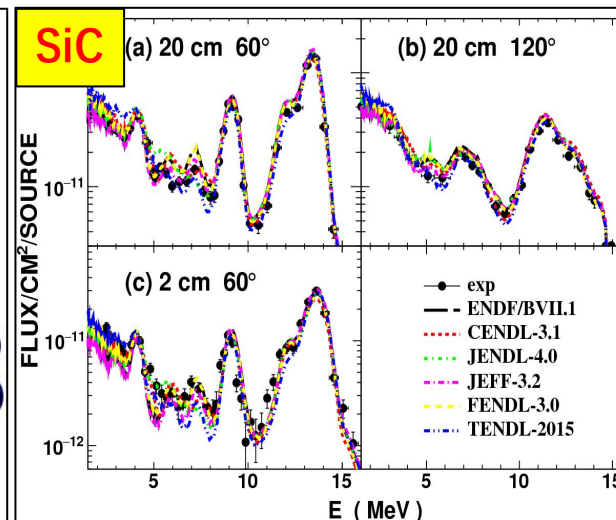
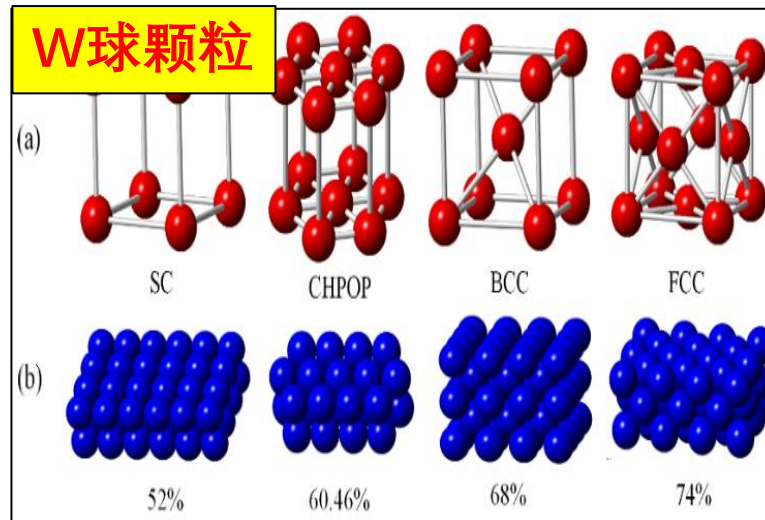
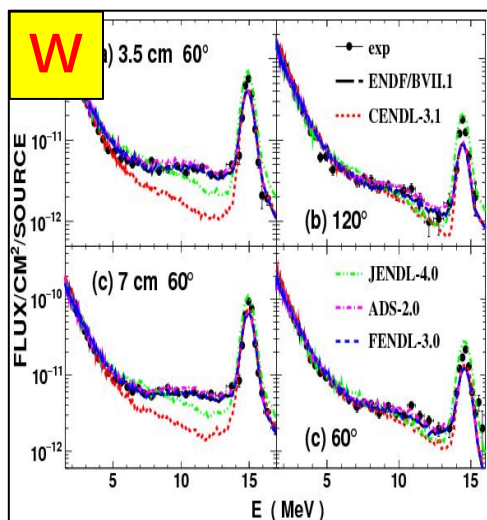
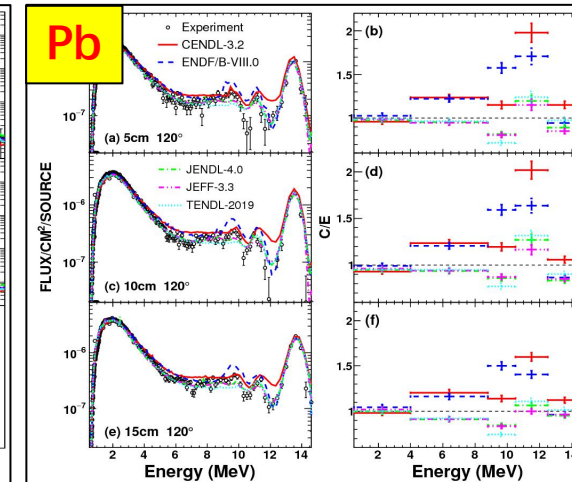
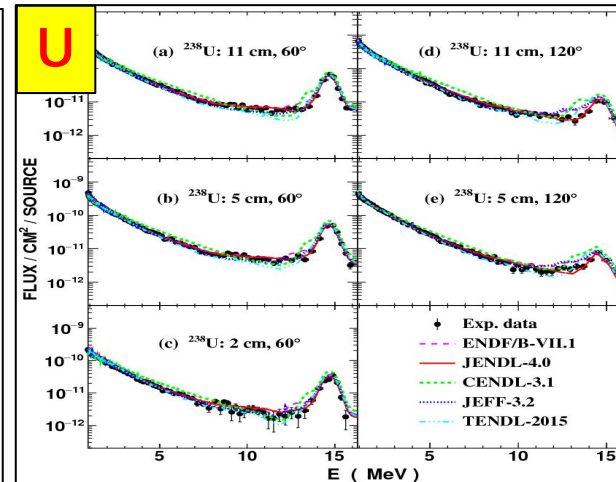
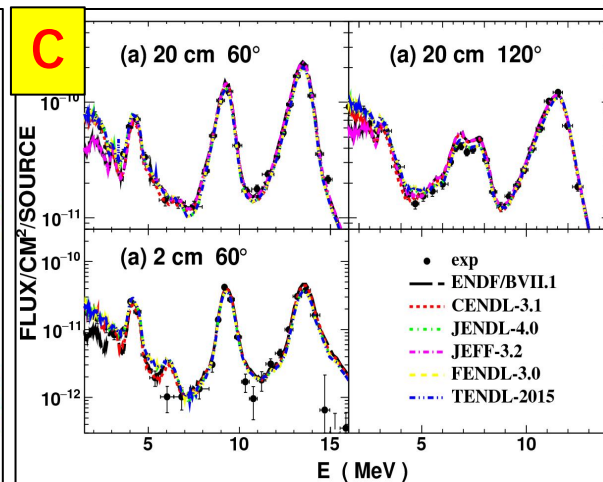
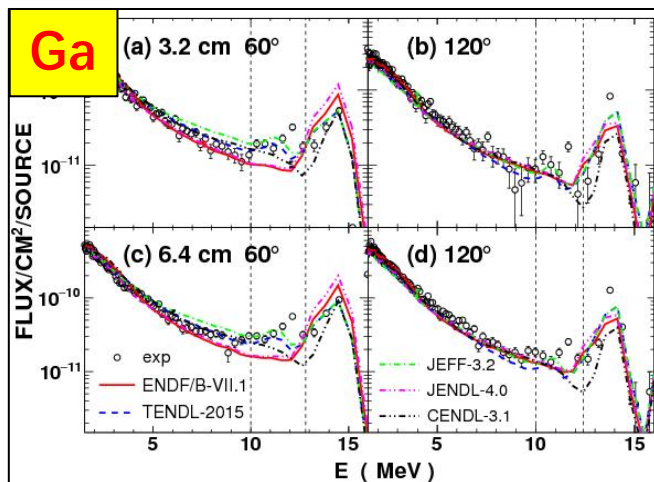


## ➤ 500 MeV/u $^9\text{Be}$ + Pb, U, D<sub>2</sub>O中子双微分产额实验测量



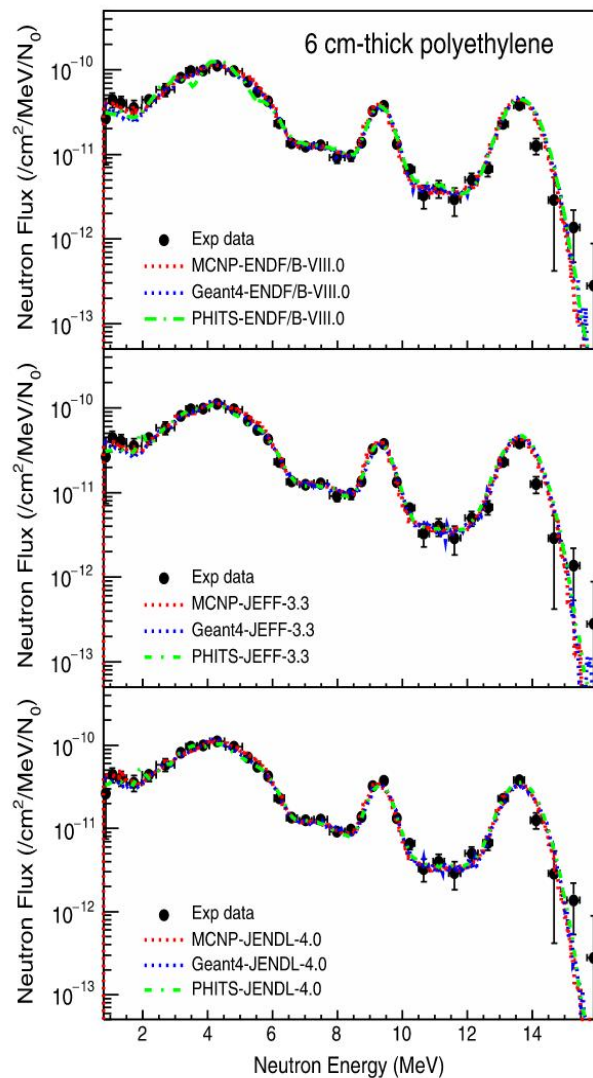


- 基于中国原子能科学研究院300 kV高压倍加器上的核数据宏观基准检验装置开展了先进核能关键材料中子积分实验测量，包括：**镓、石墨、钨、钨球颗粒、铀、碳化硅、铅、聚乙烯及钨、铀、碳和聚乙烯组合样品**实验；实验测量了样品的泄漏中子谱，检验国际评价数据库。

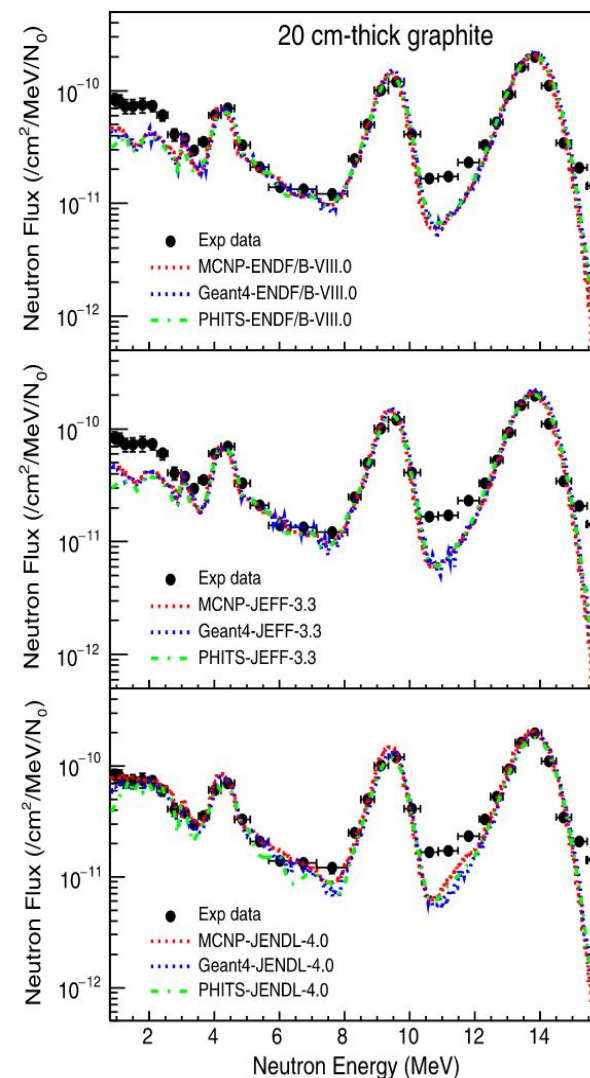
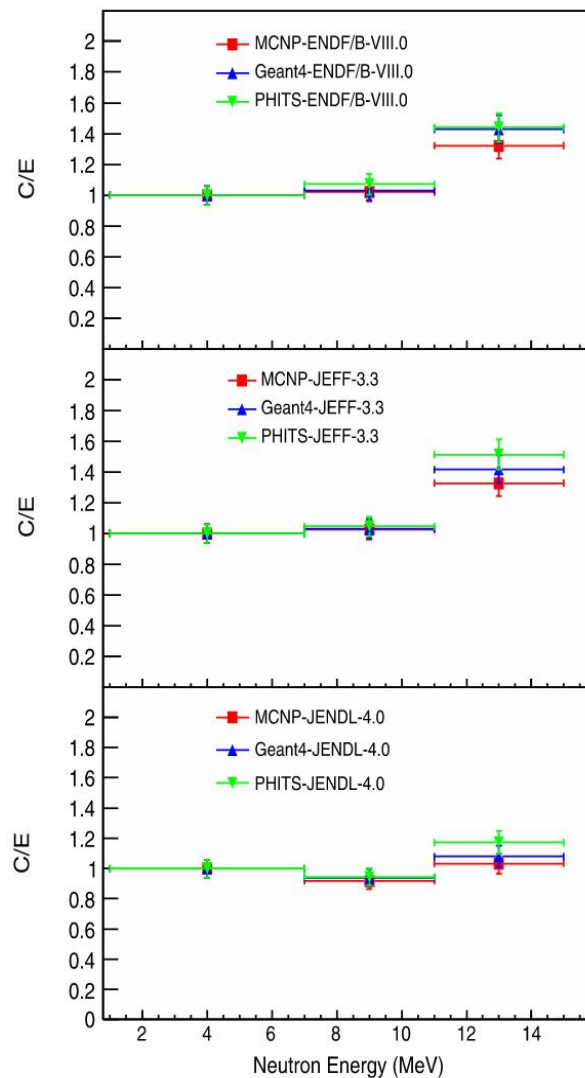




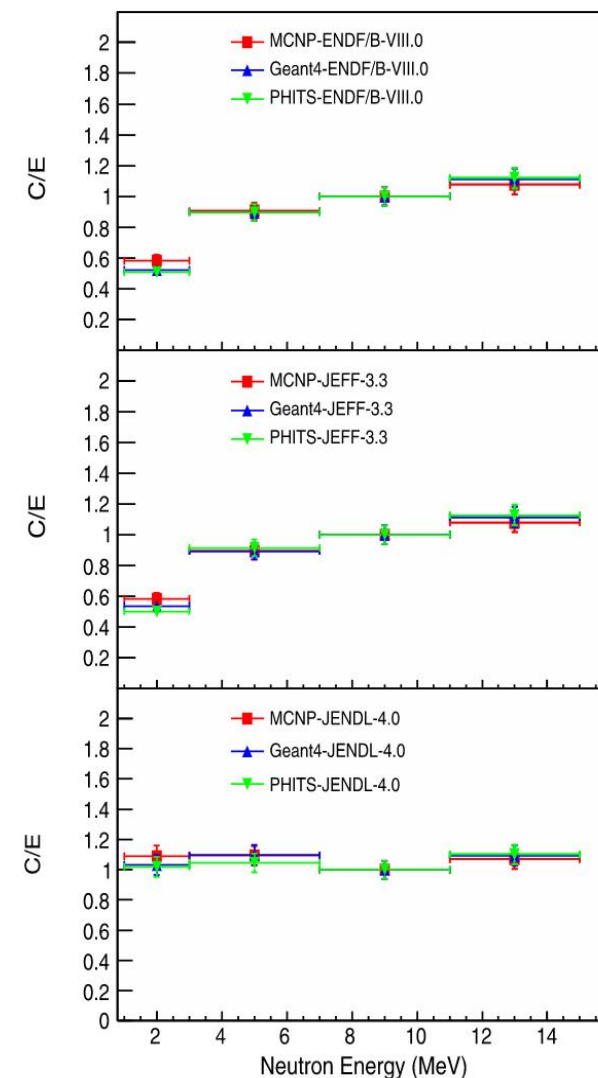
## ➤ MCNP、GEANT4、PHITS宏观检验分析结果对比



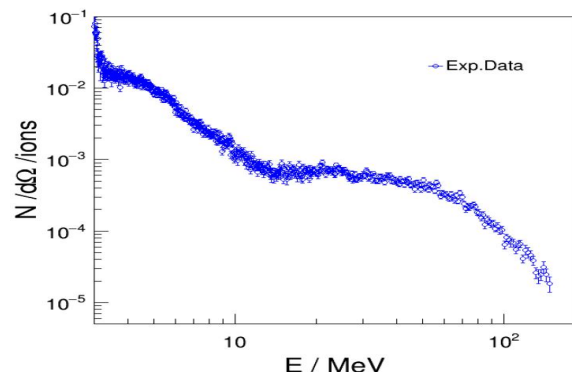
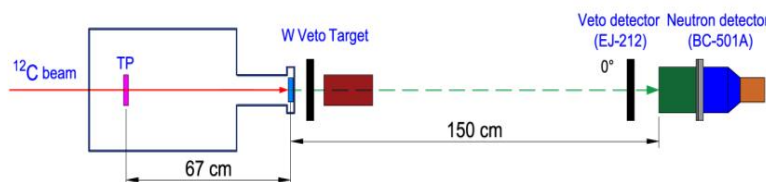
聚乙烯样品检验结果



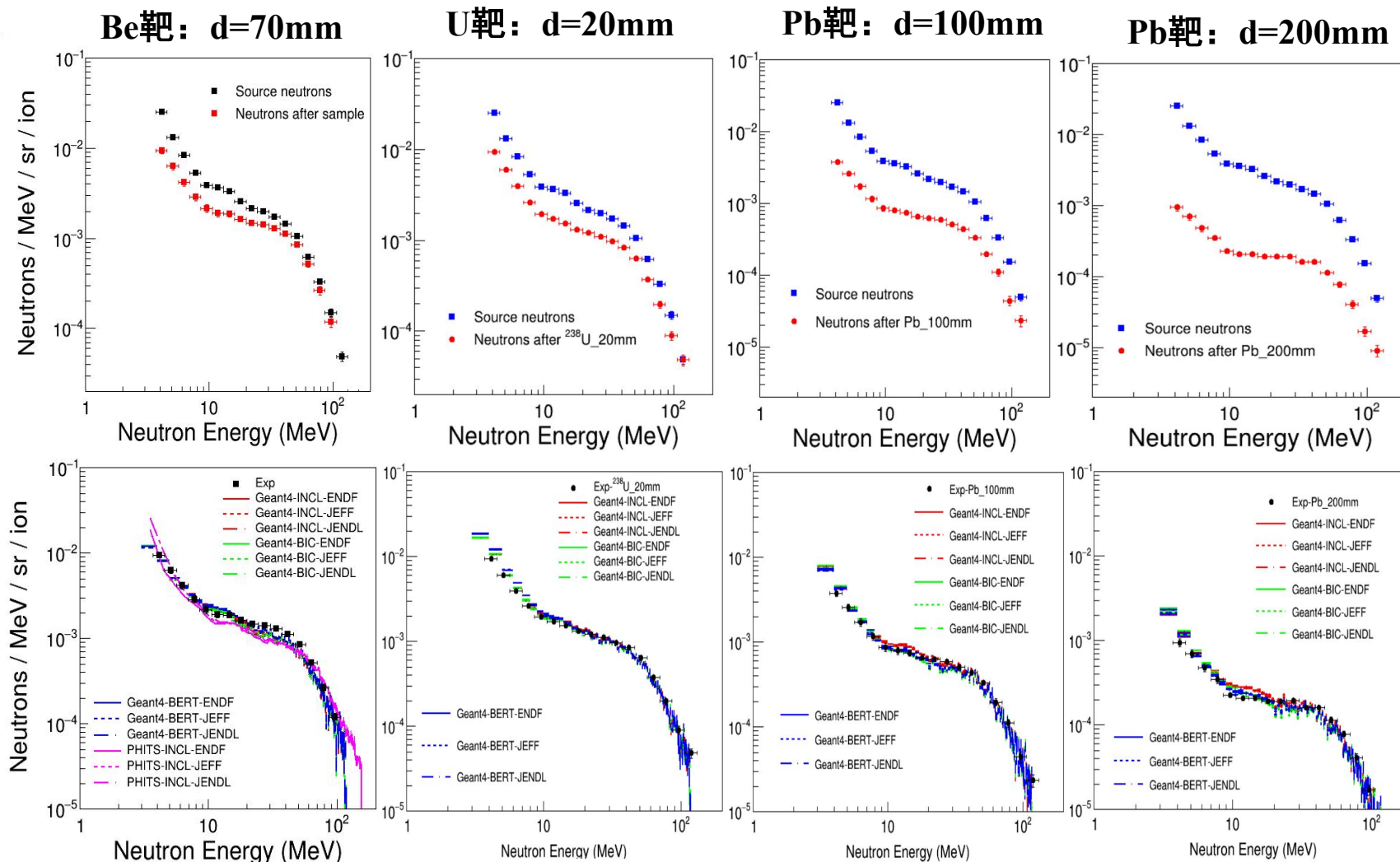
石墨样品检验结果



## ➤ 80.5 MeV/u $^{12}\text{C}$ + W+ Be、U、Pb中子输运实验测量



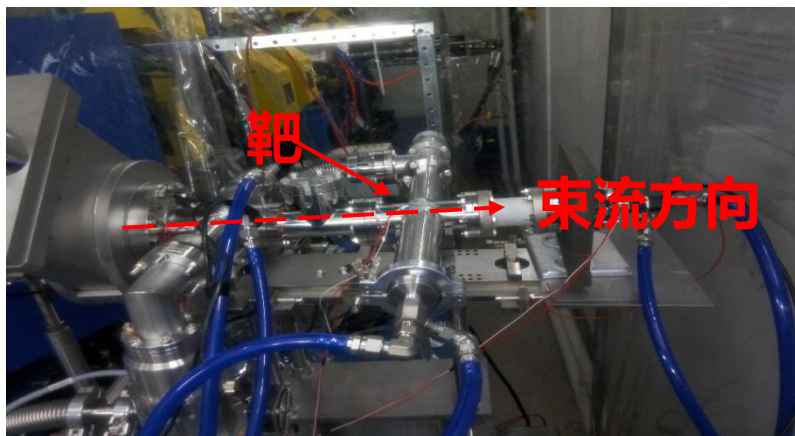
源中子能谱



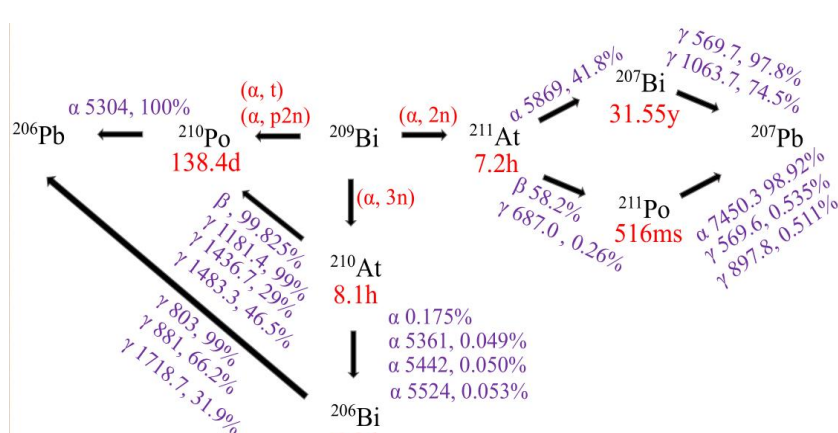
出射中子能谱



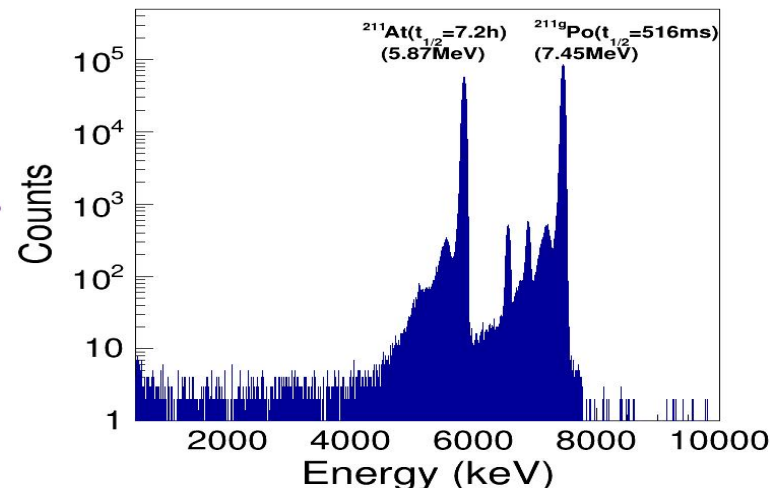
- 基于超导直线加速器提供的 $\alpha$ 粒子辐照铋，开展 $^{209}\text{Bi}(\alpha, x)^{211/210}\text{At}$ 核反应数据研究，采用硅与高纯锗探测器测量了衰变 $\alpha/\gamma$ ，获得了医用核素 $^{211}\text{At}$ 与杂质核素 $^{210}\text{At}$ 的产生截面。



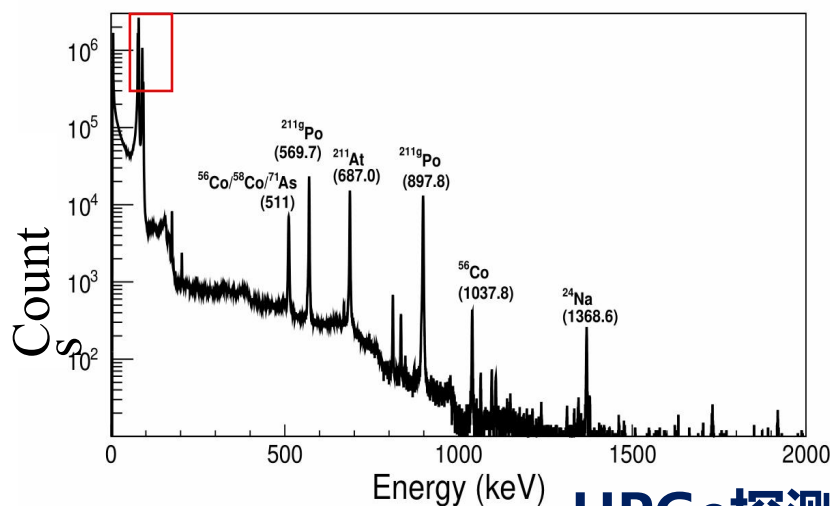
$\alpha$ 束辐照实验现场



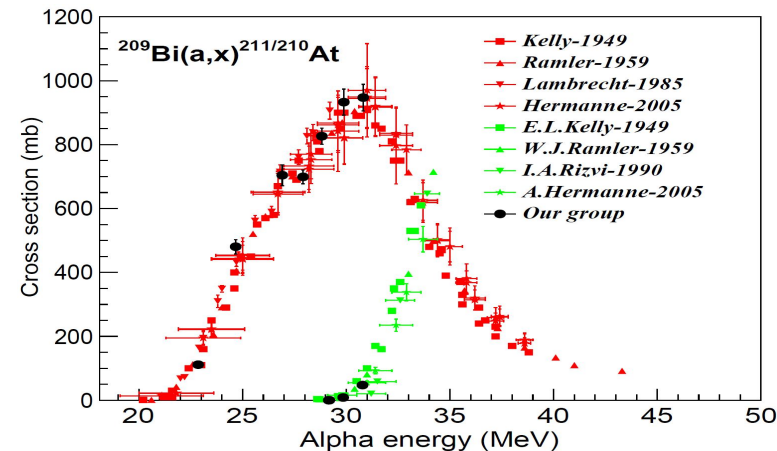
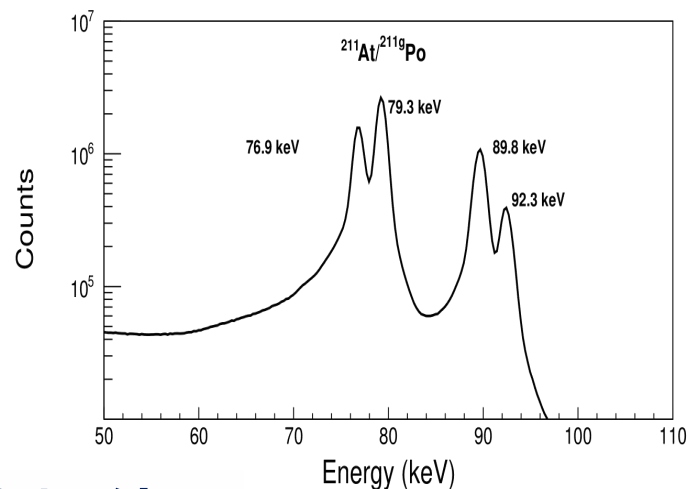
$^{209}\text{Bi}(\alpha, x)$ 核反应过程



硅探测器测量结果



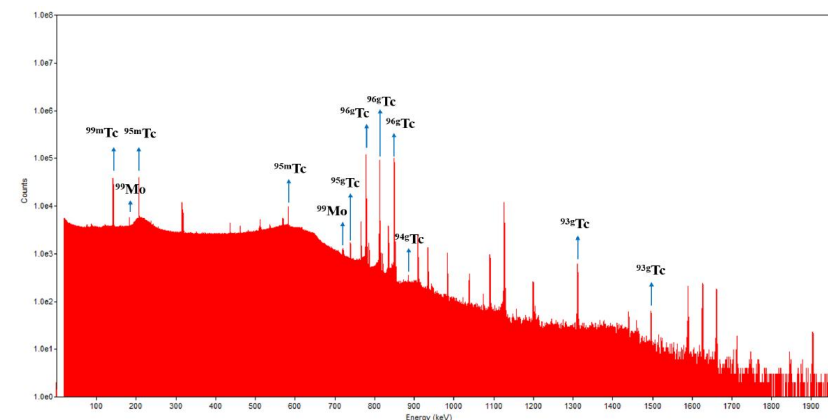
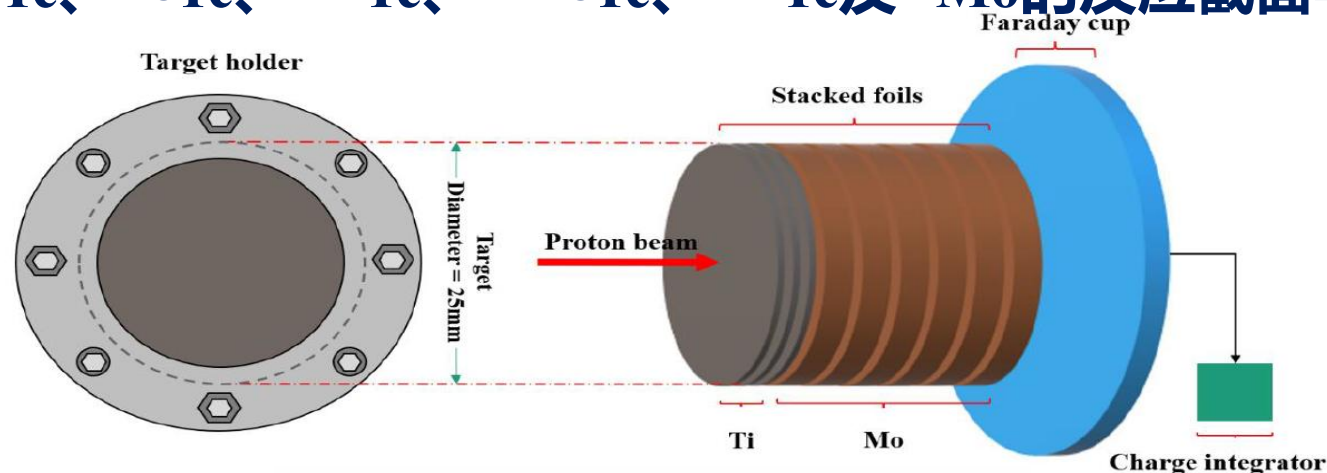
HPGe探测器测量结果



截面测量结果

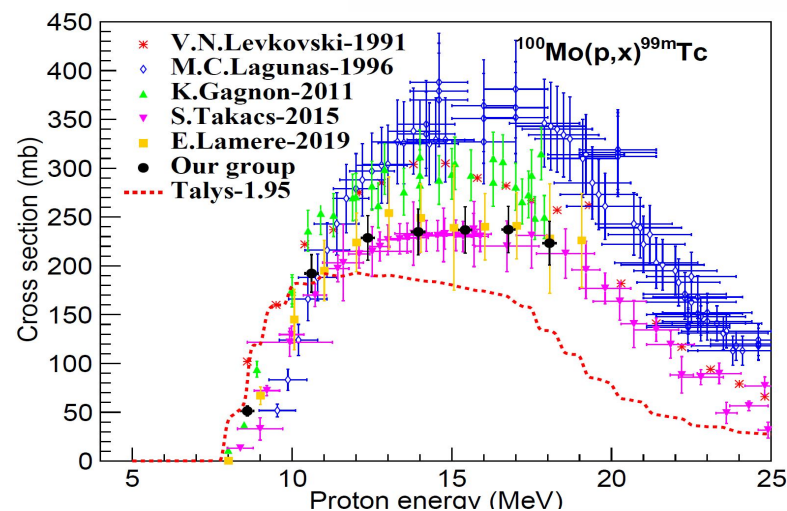


- 基于近代物理研究所超导直线加速器研究了8-20 MeV 质子轰击钼产生  $^{93m+g}\text{Tc}$ 、 $^{93m}\text{Tc}$ 、 $^{93g}\text{Tc}$ 、 $^{94m}\text{Tc}$ 、 $^{95g}\text{Tc}$ 、 $^{95m}\text{Tc}$ 、 $^{96m+g}\text{Tc}$ 、 $^{99m}\text{Tc}$  及  $^{99}\text{Mo}$  的反应截面与产额数据。

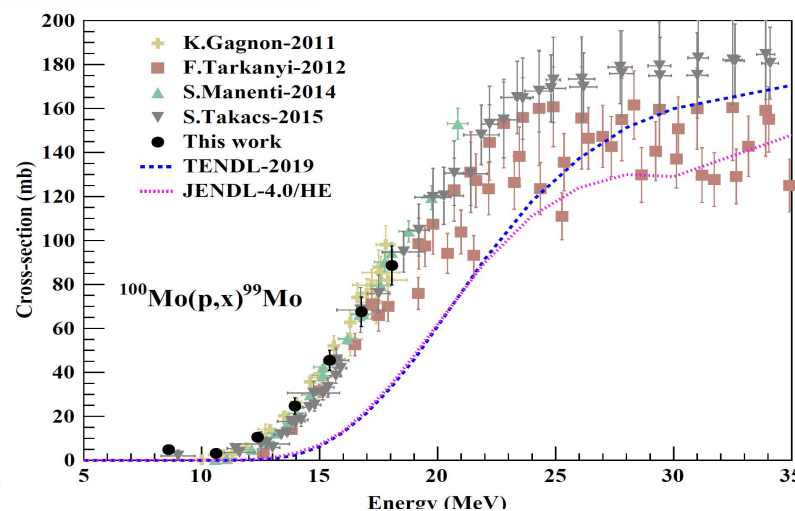


产额测量实验辐照方案

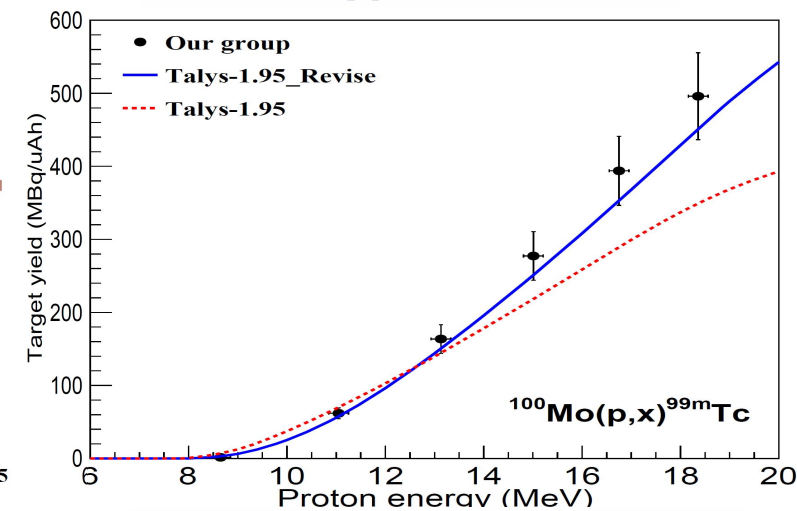
伽玛能谱测量结果



$^{100}\text{Mo}(p,x)^{99m}\text{Tc}$ 截面



$^{100}\text{Mo}(p,x)^{99}\text{Mo}$ 截面

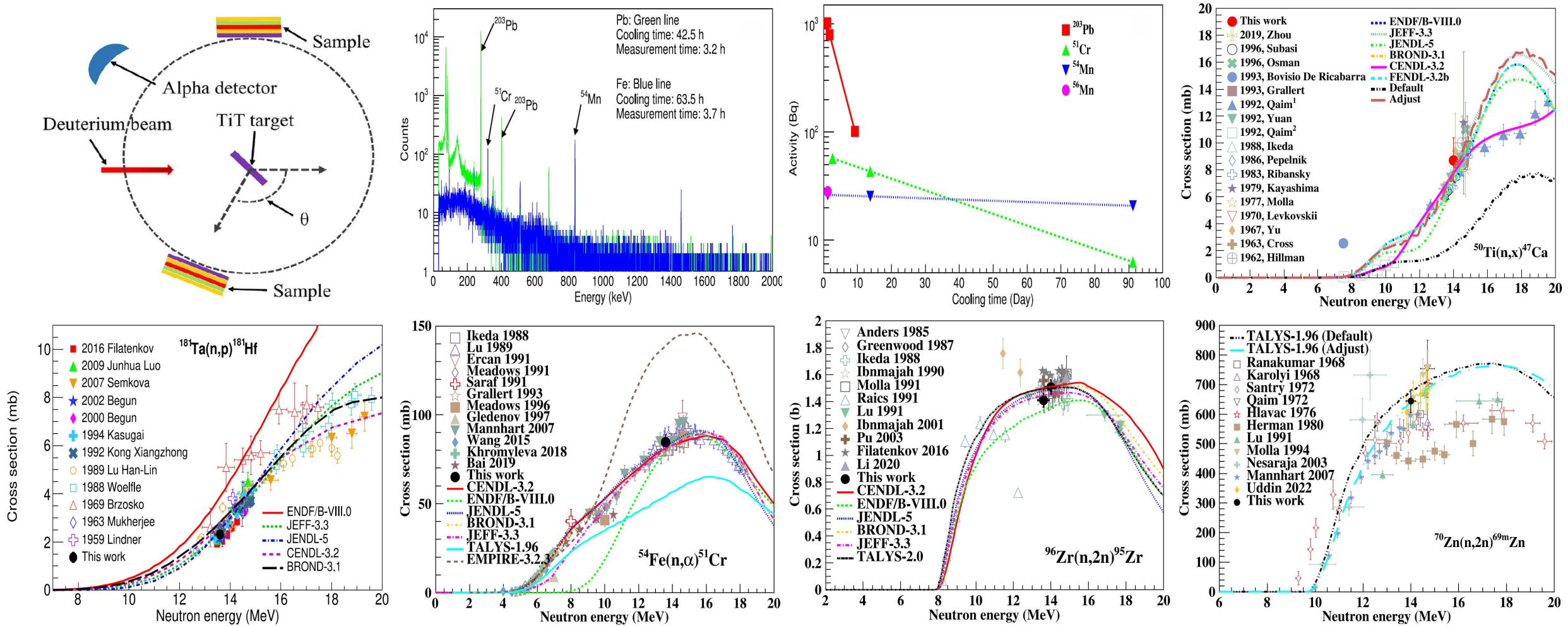


$^{100}\text{Mo}(p,x)^{99m}\text{Tc}$ 产额



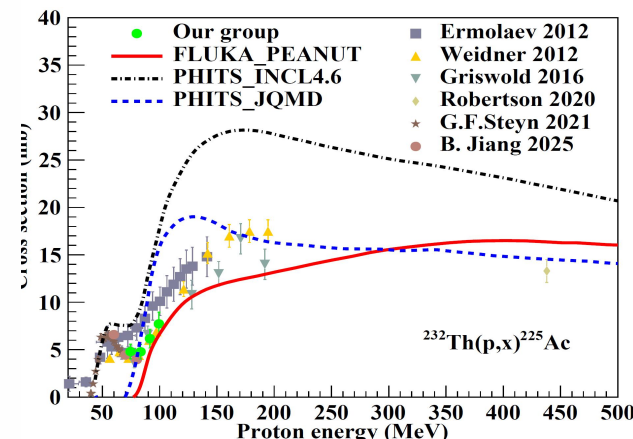
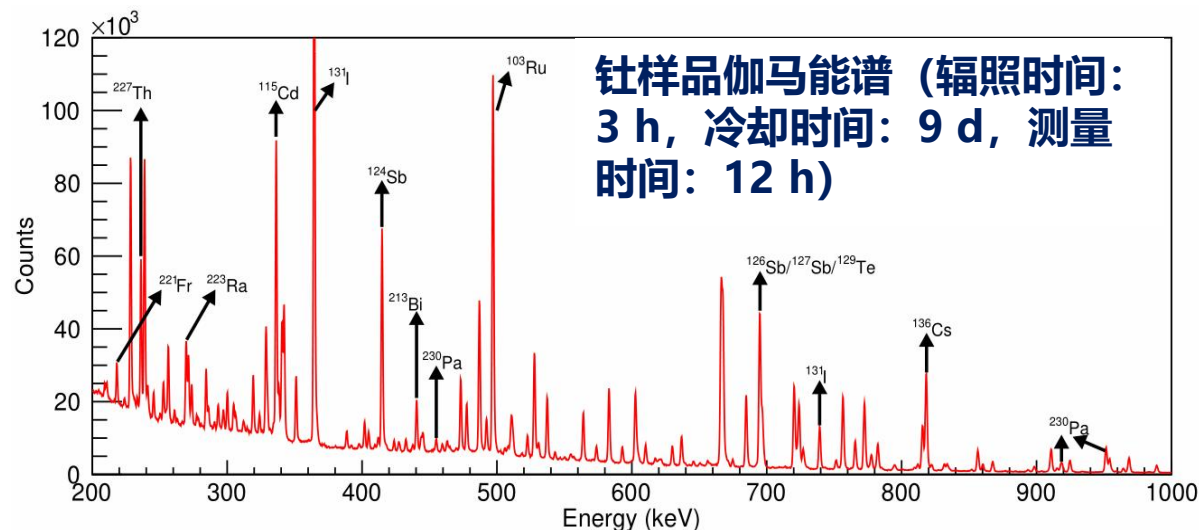
# 氦气中子诱发核反应数据研究

➤ 基于九院二所氦气中子源，测量了快中子诱发铁、钛、铌、锆、铅和铋等材料的放射性核素产生截面，发现部分评价数据及理论计算结果与实验数据存在较大差异。

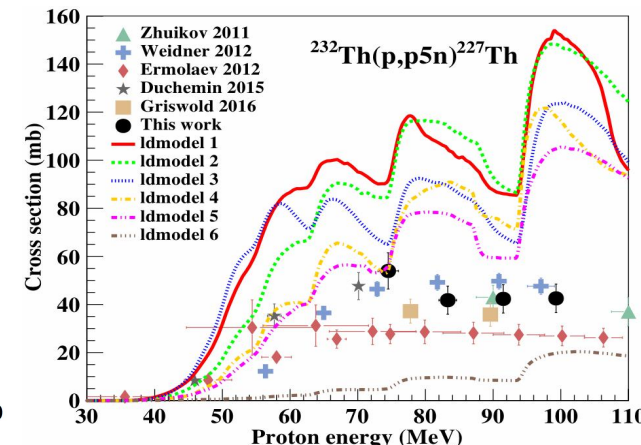




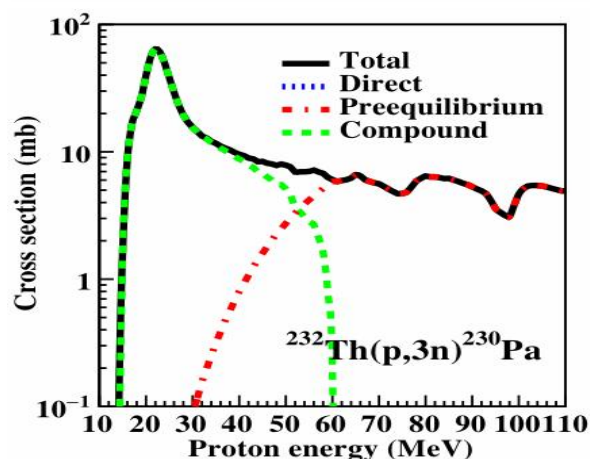
- 基于HIRFL测量了70~100 MeV质子诱发钍的放射性核素产生截面，但受限于理论模型精确性，医用核素产额计算结果存在较大不确定性。



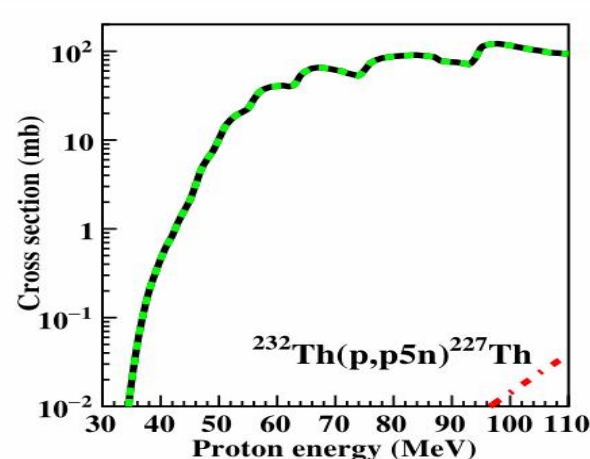
$^{225}\text{Ac}$ 截面



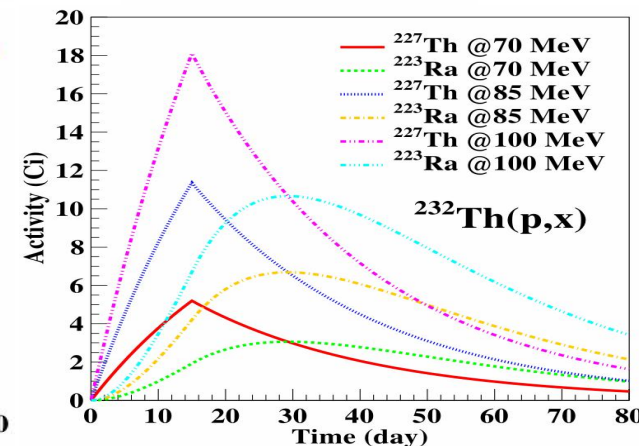
$^{227}\text{Th}$ 截面



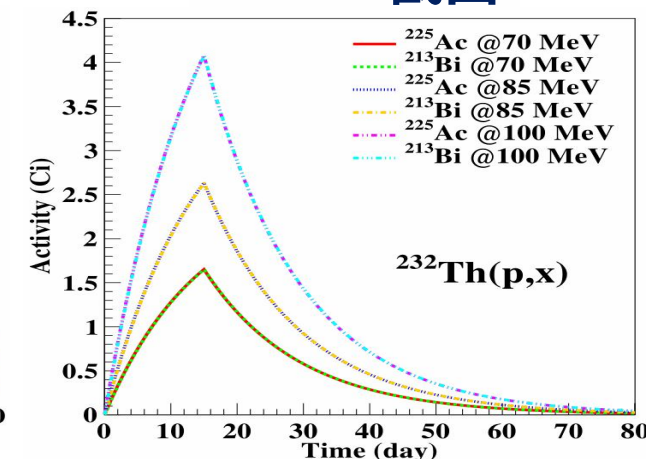
$^{230}\text{Pa}$ 产生截面计算



$^{227}\text{Th}$ 产生截面计算



$^{227}\text{Th}$ - $^{223}\text{Ra}$ 活度计算



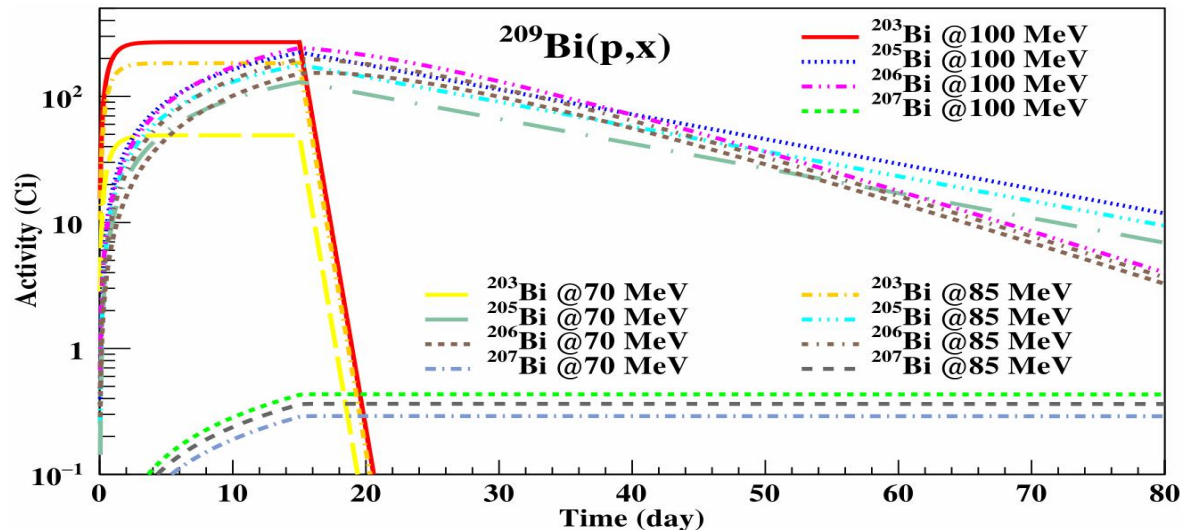
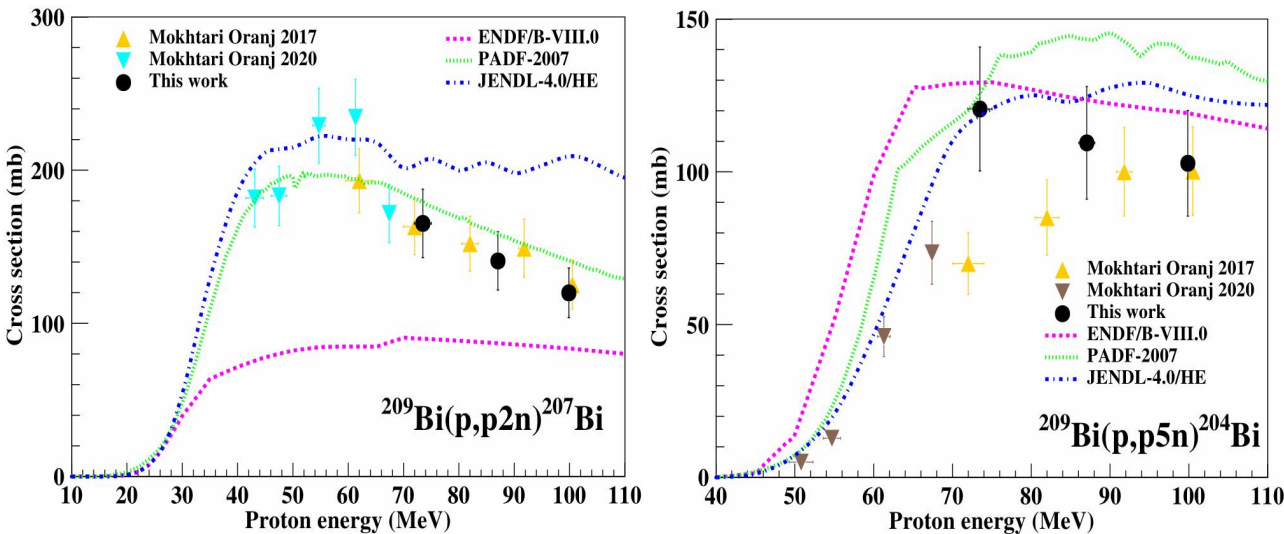
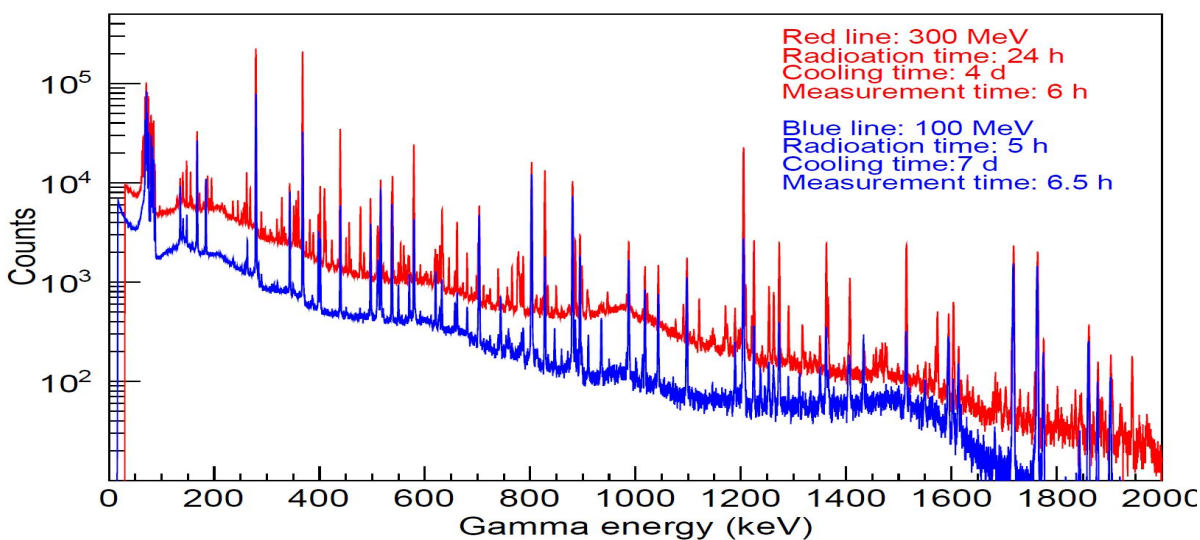
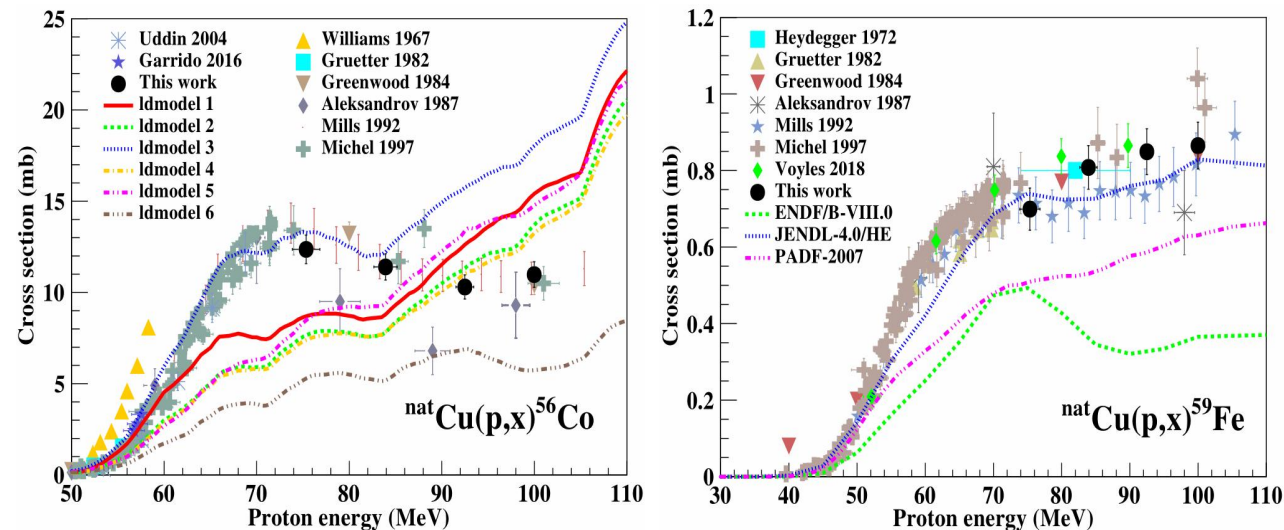
$^{225}\text{Ac}$ - $^{213}\text{Bi}$ 活度计算





# 常用结构材料等核反应数据研究

➤ 基于近物所和哈工大的高能粒子加速器，测量了质子与Be、C、Xe、Bi、Ar、Kr等重离子诱发铁、钛、铌、锆、铅、铋等材料的放射性核素产生截面。



## ➤ 带电离子束诱发核反应出射中子能谱测量：

- ✓ 蒙卡（GEANT4、PHITS、FLUKA）模拟计算结果基本可以重现实验测量结果；
- ✓ 不同能量、离子类型、靶核均存在差异；

## ➤ 14 MeV D-T中子积分实验：

- ✓ 不同数据库之间存在差异（宏观检验的必要性）；
- ✓ 基于相同数据库，蒙卡（MCNP、GEANT4、PHITS）模拟计算结果存在较小差异；

## ➤ 白光中子输运实验测量：

- ✓ GEANT4（数据库+理论模型）模拟计算结果与实验数据差异较小；

## ➤ 感生放射性实验测量：

- ✓ 常规核素实验数据相对较丰富，可校验模拟计算结果；

◆ **关键核素实验测量数据**是核数据库建立与校验的核心依据。

◆ **核数据库**至关重要，是ADS核能工程设计、安全运行的基础支撑。





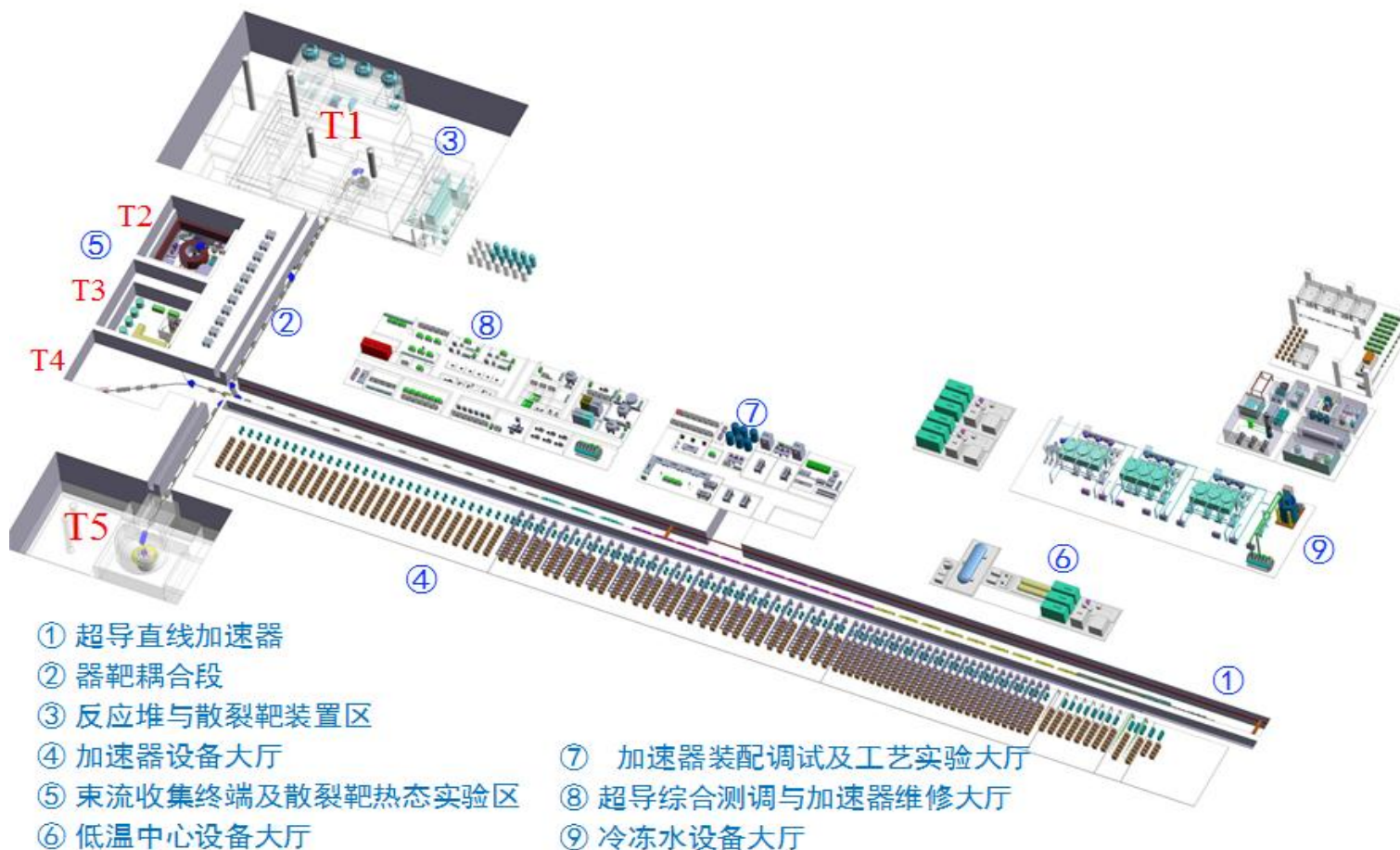
# **CiADS核数据实验终端 建设情况介绍**

- 加速器驱动嬗变研究装置（CiADS）和强流重离子加速器装置（HIAF）是“十二五”国家重大科技基础设施，两装置建于广东省惠州市惠东县黄埠镇。





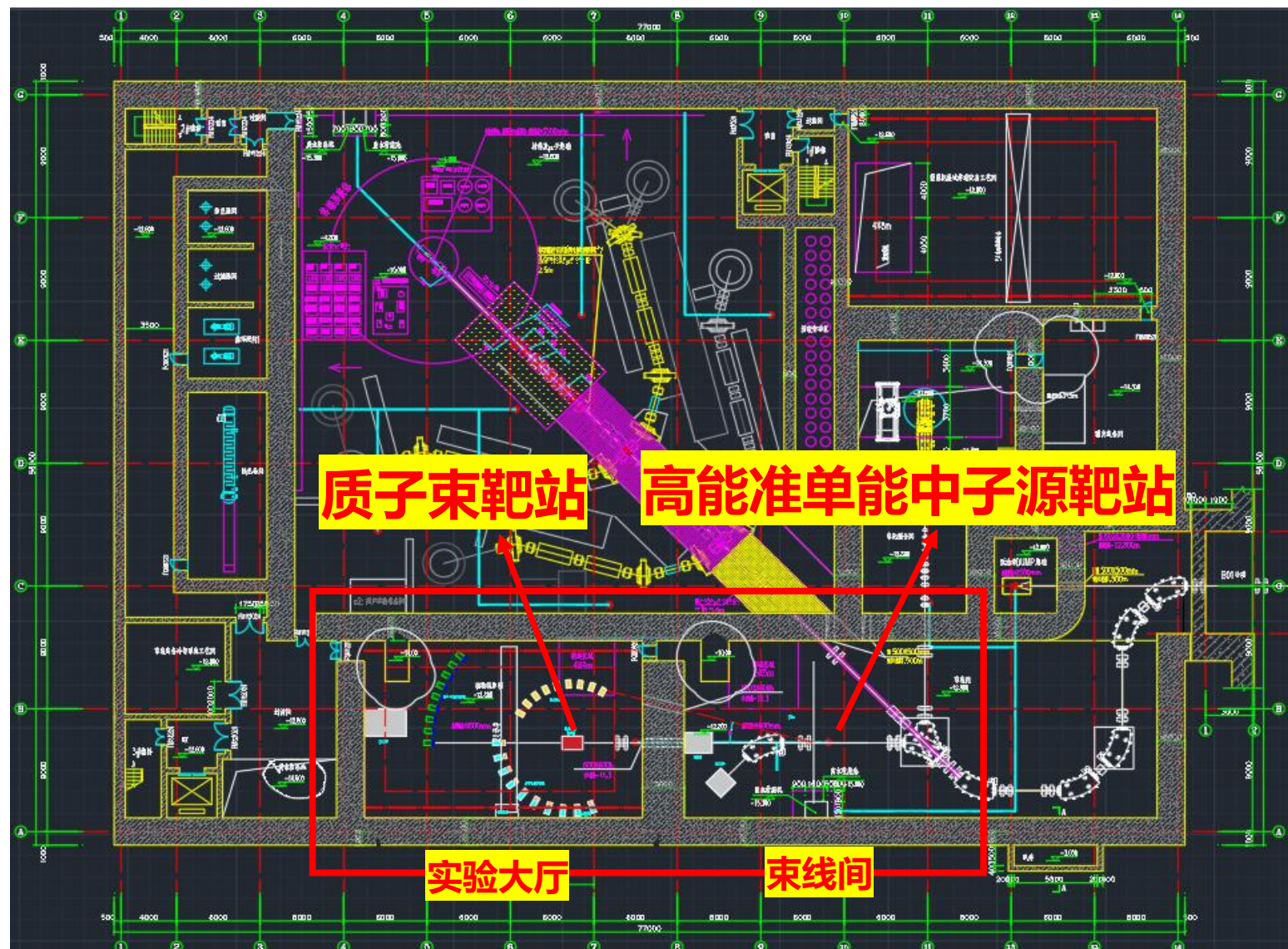
- 基于CiADS装置，建设**核数据实验平台**，针对新一代核裂变能关键核数据需求，建成专用实验平台，开展乏燃料再生循环等关键核数据实验测量，获得ADS专用核数据库。



CiADS装置布局图



## CiADS实验分总体

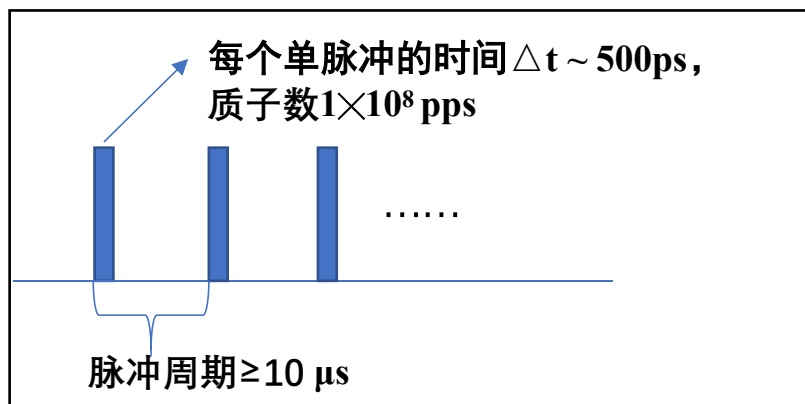


- 核数据实验终端
- ✓ 质子束靶站
- ✓ 高能准单能中子源靶站
- 高能质子散裂反应实验装置
- 中子核数据实验装置
- 核数据宏观检验实验装置
- 实验大厅内部空间:
  - $20\text{m} \times 12.5\text{m} \times 6.5\text{m}$

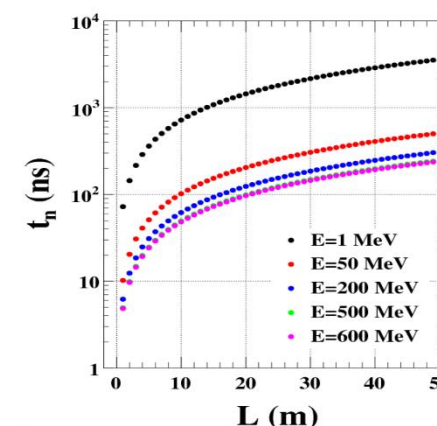
- 质子束流能量 50 – 600 MeV;
- 平均流强 $\leq 1\mu\text{A}$  (基建屏蔽) , 加速器最大供束流强 5 mA;
- 束斑尺寸可调: 2mm-1cm (FWHM) ;
- 束流模式: 连续束 / 脉冲束。

| 核数据<br>实验终<br>端 | 束流模式 | 束流能量         | 束流流强           | 束流占空比                                                  | 束流分布           |
|-----------------|------|--------------|----------------|--------------------------------------------------------|----------------|
|                 | 脉冲束  | 50 – 600 MeV | $< 5\text{mA}$ | 单脉冲 $\sim 40\text{ ps}$<br>频率 $\sim 1\text{kHz}$ (1ms) | 半高全宽<br>2~10mm |
|                 | 连续束  | 50 – 600 MeV | 最高5mA          | 100%                                                   | 半高全宽<br>2~10mm |

## ✓ 质子束时间结构需求



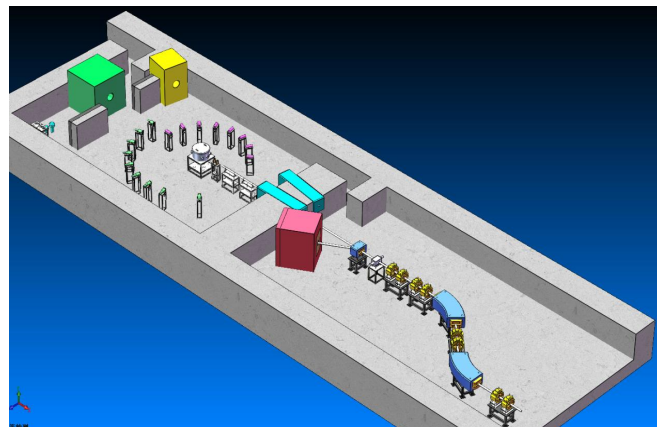
| 表1. 不同能量的中子在一定飞行时间距离下的飞行时间 |        |       |       |         |          |
|----------------------------|--------|-------|-------|---------|----------|
| E(MeV)                     | 1      | 10    | 100   | 600     | $\gamma$ |
| d=5m                       | 362ns  | 114ns | 40ns  | 24.18ns | 16.67ns  |
| d=10m                      | 723ns  | 229ns | 80ns  | 48.36ns | 33.33ns  |
| d=20m                      | 1446ns | 457ns | 160ns | 96.73ns | 66.67ns  |
| d=30m                      | 2169ns | 686ns | 240ns | 145.1ns | 100.0ns  |



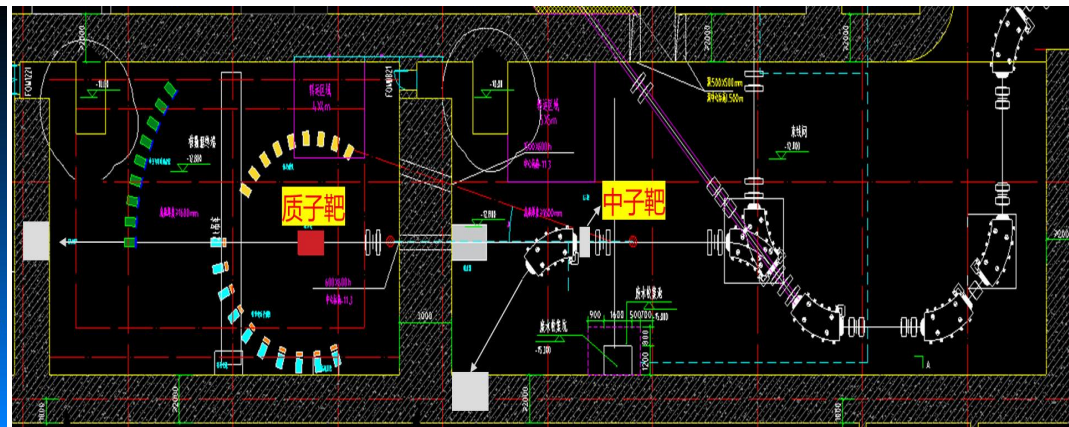


## 核数据实验平台总体设计

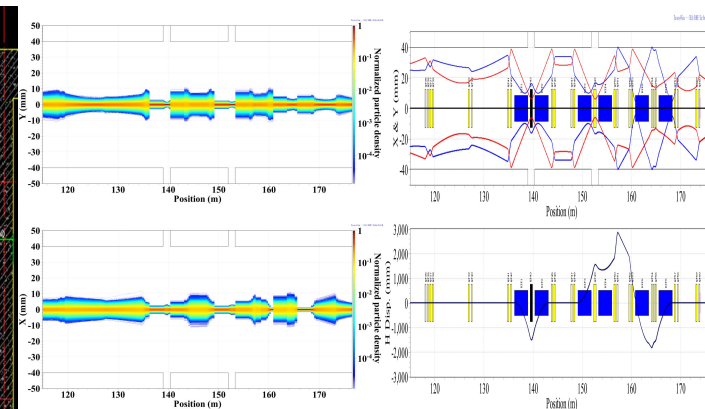
- 完成核数据实验平台总体设计，包括质子束流引出与调制装置、散裂反应实验装置、中子核数据实验装置、宏观检验实验装置，确定核数据实验终端建设需求和实验平台布局；



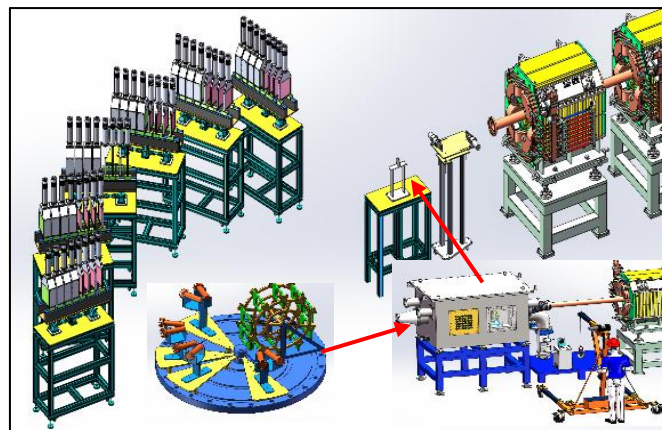
核数据实验平台总体设计



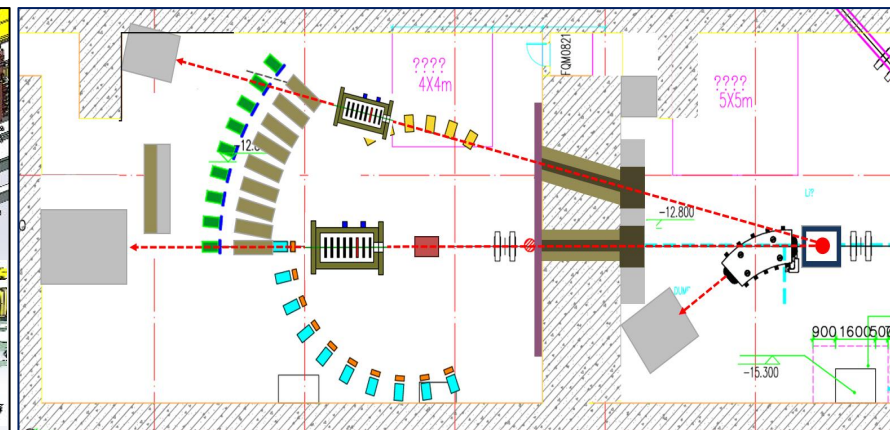
核数据实验终端建设提资土建图



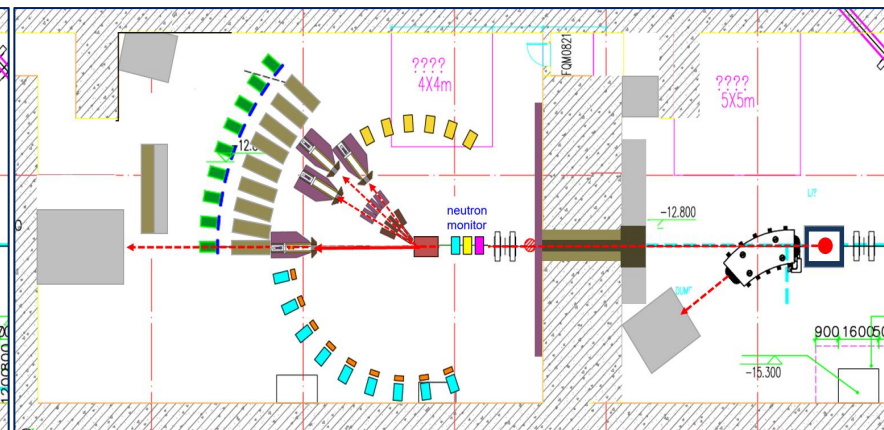
质子束流引出与调制装置束流光学



散裂反应实验装置设计



中子核数据实验装置设计

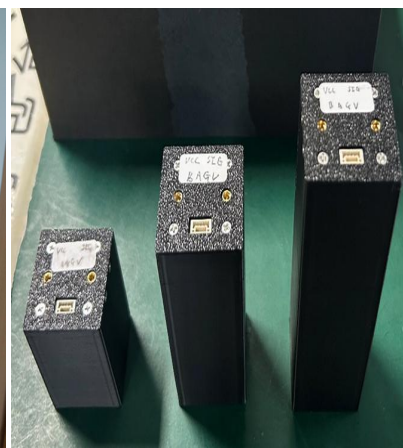
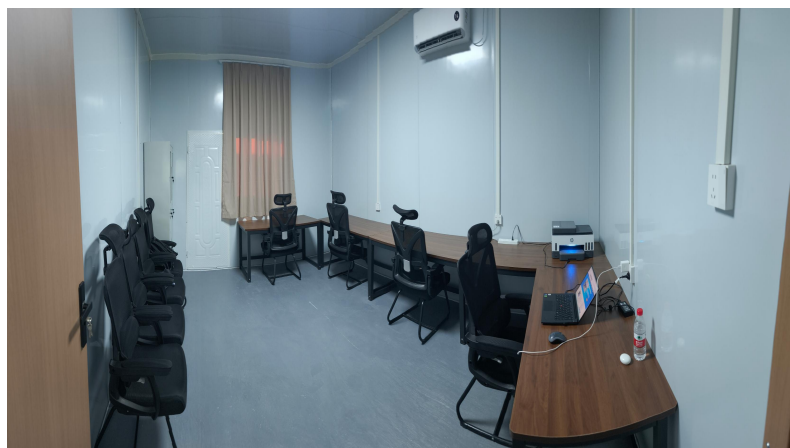


核数据宏观检验实验装置设计



# CiADS核数据实验终端建设进展

- 完成核数据实验终端土建建设提资;
- 完成实验终端总体方案与实验系统物理设计;
- 完成实验平台相关设备研制与实验室搭建等。



装置区实验室

探测器系统搭建、研制与测试

服务器系统搭建



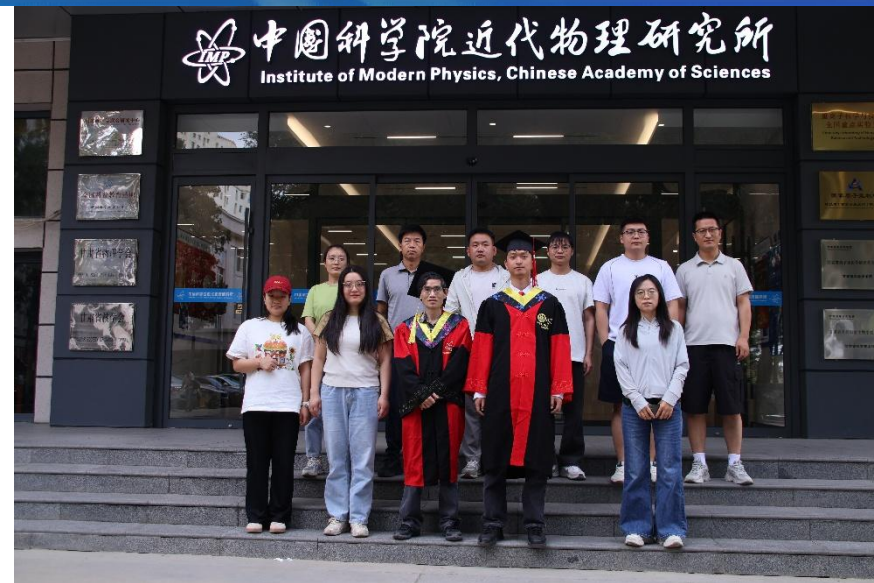
- ✓ **核数据实验终端包括：**质子束流引出与调制装置、质子散裂反应实验装置、中子核数据实验装置、核数据宏观检验实验装置，及平台配套设施等；
- ✓ **束流模式：**质子束、中子束（连续束/脉冲束），能量50~600 MeV，流强1uA；
- ✓ **散裂反应实验装置：**真空靶室系统，带电粒子望远镜系统，带电粒子飞行时间谱仪系统及配套核电子学与数据获取系统；
- ✓ **中子核数据实验装置：**高能准单能中子源，低本底高纯锗谱仪系统、裂变电离室、中子源参数监测系统；
- ✓ **核数据宏观检验实验装置：**中子飞行时间谱仪系统，低中子本底局部屏蔽系统。
- ✓ **计划2027年开始核数据相关实验测量。**

**欢迎各位老师依托本实验平台开展物理实验！**





**感谢各位老师的  
聆听与关注!**



**敬请批评指正，谢谢！  
欢迎各位老师依托本实验平台开展物理实验！**

