

CSNS中子辐照 ^{232}Th 裂变产额测量实验进展

汇报人：刘贤亮

中国工程物理研究院核物理与化学研究所

2026年07月16日

责任 执行 创新 卓越
自主创新 军民融合 三元发展
建成世界科技领域有重要影响力的研究所



目录



01 研究意义



02 实验原理



03 实验内容



04 能谱解谱



05 修正因子



06 初步结果与理论模拟

01 研究意义

支撑钍基熔盐堆设计 · 提高预测可靠性 · 完善核数据库

支撑钍基熔盐堆在线燃料处理系统设计与燃料循环评估

🔹 在线燃料处理系统的核心挑战

裂变产物积累会降低反应性，是工程化发展的关键技术挑战。在线燃料系统需在反应堆运行中持续去除裂变产物并调节燃料盐成分。

🌐 中子经济性与毒物积累

裂变产物衰变生成的稀土元素（如Nd、Sm等）具有强中子毒性，会显著降低中子利用效率，必须通过化学分离手段持续去除。

📊 裂变产额数据的重要性

裂变产额直接决定裂变产物及毒物核素的生成速率，是评估毒物积累、确定分离效率及燃料循环长期运行特性的重要基础。



图示：2兆瓦液态燃料钍基熔盐实验堆厂房

提高钍燃料循环反应性演化与衰变热预测的可靠性

☒ 裂变产额的核心作用

裂变产额不仅决定裂变产物的组成结构，还直接影响衰变链及其衰变热释放行为，是反应堆物理分析的基础。

💧 反应性演化与衰变热预测

准确的裂变产额数据能提升对毒物核素积累规律的预测能力，为反应堆停堆后的衰变热释放规律计算提供可靠参数。

🛡️ 工程设计与安全支撑

为余热排出系统设计、安全分析及工程设计优化提供重要的数据支撑，确保反应堆运行安全



图示：2兆瓦液态燃料钍基熔盐实验堆本体

完善钍燃料循环相关核数据库并降低核数据不确定度

📊 现状：数据匮乏与差异

针对 ^{232}Th 的裂变反应，实验数据相对匮乏，部分产物不确定度较大，且不同核数据库间存在显著差异。

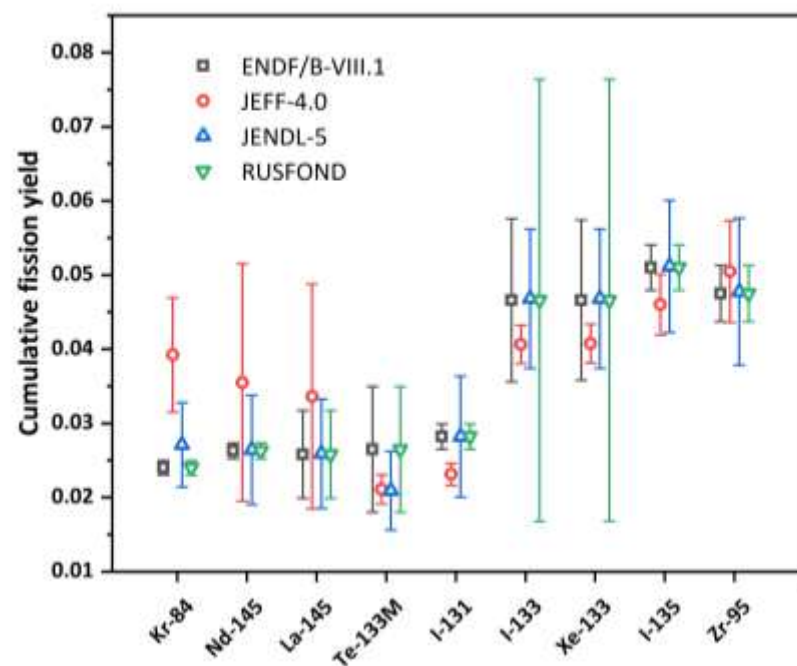
⚠️ 核心影响：计算可靠性风险

现有数据差异直接影响钍燃料循环反应堆的物理计算结果，增加了工程设计的不确定性与风险。

🔬 研究意义：高精度测量与完善

开展高精度实验测量，旨在降低数据的不确定性，完善核数据库，提升反应堆物理计算与工程设计的可靠性。

不同数据库中的 ^{232}Th 裂变产额

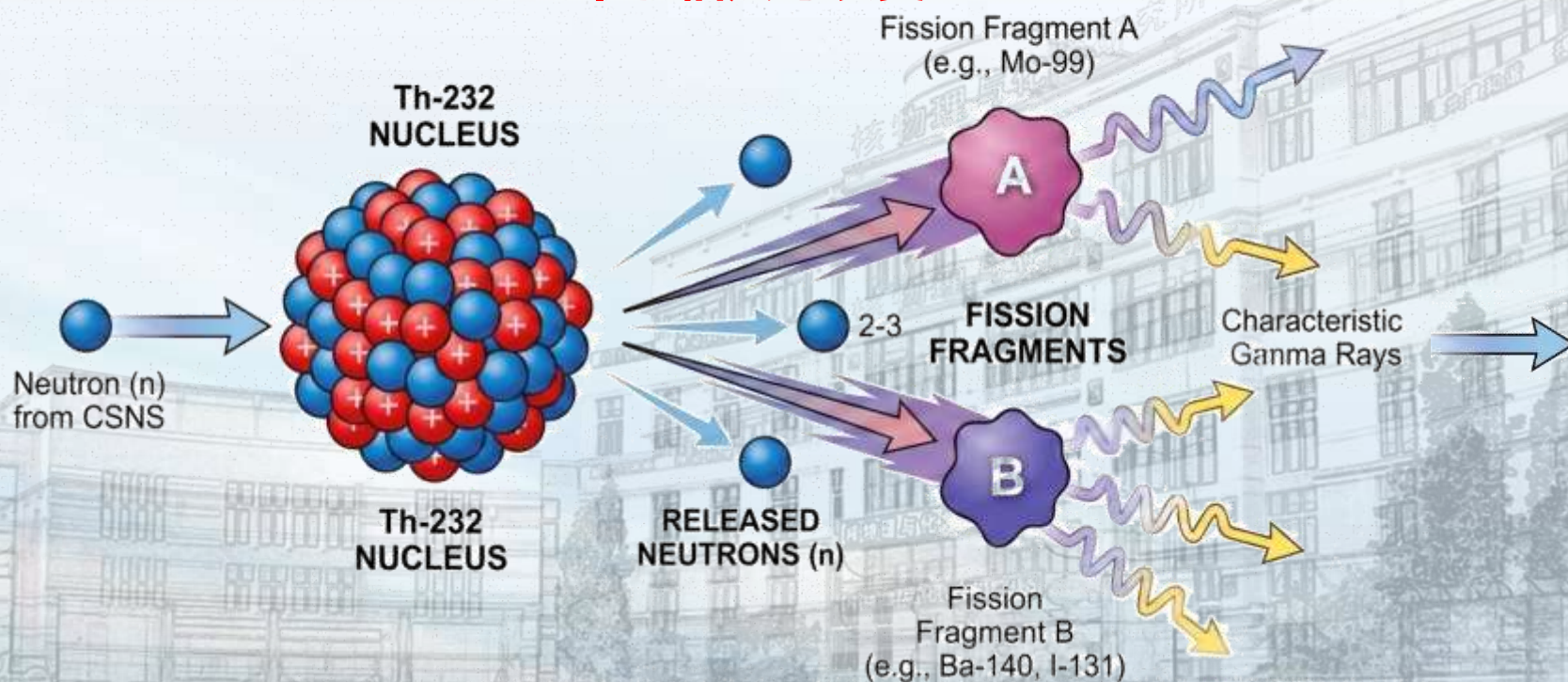


02 实验原理



直接伽马法：CSNS 中子轰击 ^{232}Th 原子核诱发裂变，生成的放射性裂变碎片退激时释放特征 γ 射线；通过测量特征 γ 射线的强度反推对应核素的生成量，即可得到中子诱发裂变产额。

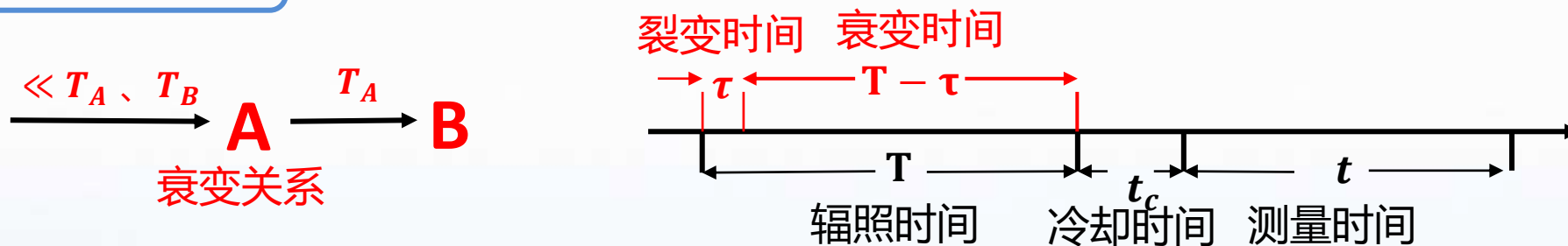
中子辐照与裂变



HPGe累积测量



中子辐照阶段



将辐照时间等量的分为独立的 n 份(即 $T=n\tau$), 计算 N_A 到辐照结束时的变化:

以第一个时间 τ 为例, 时间 τ 内:

$$dN_{A1} = N_{f1}Y_A dt - \lambda_A N_{A1} dt \xrightarrow{t=0 \text{ 时, } N_A=0} N_{A1}(t) = \frac{N_{f1}Y_A}{\lambda_A} (1 - e^{-\lambda_A t})$$

时间 $T - \tau$ 内:

$$dN_{A1} = -\lambda_A N_{A1} dt \xrightarrow{t=0 \text{ 时, } N_A = \frac{N_{f1}Y_A}{\lambda_A} (1 - e^{-\lambda_A \tau})} N_{A1}(t) = \frac{N_{f1}Y_A}{\lambda_A} (1 - e^{-\lambda_A \tau}) \times e^{-\lambda_A t}$$

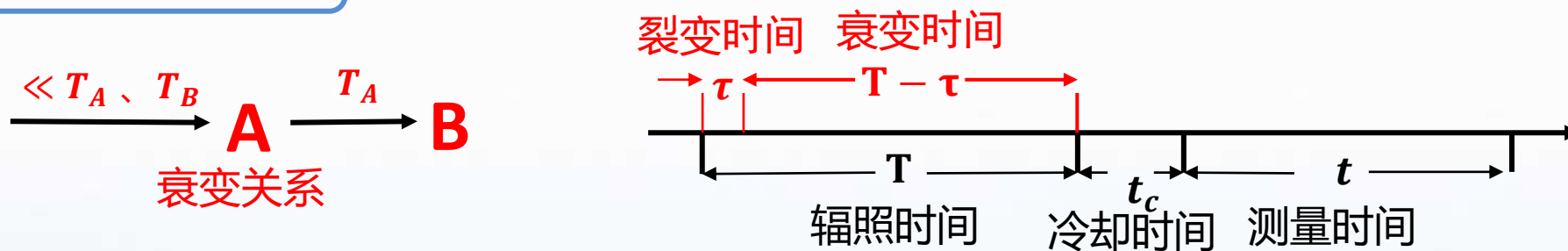
$\xrightarrow{t=\tau} N_{A1} = \frac{N_{f1}Y_A}{\lambda_A} (1 - e^{-\lambda_A \tau})$

$\xrightarrow{t=T-\tau} N_{A1} = \frac{N_{f1}Y_A}{\lambda_A} (1 - e^{-\lambda_A \tau}) \times e^{-\lambda_A (T-\tau)}$
停止辐照时

在 $t=T$ 时辐照结束, 此时 N_A 的总数为:

$$N_A = \sum_{i=1}^n N_{Ai} = \frac{Y_A}{\lambda_A} (1 - e^{-\lambda_A \tau}) \sum_{i=1}^n N_{fi} \times e^{-\lambda_A (T - i\tau)}$$

冷却与测量阶段



在冷却时间 t_c 内，此时 N_A 的变化为：

$$dN_A = -\lambda_A N_A dt$$

$$\xrightarrow{t=t_c} N_A = \frac{Y_A}{\lambda_A} (1 - e^{-\lambda_A \tau}) \sum_{i=1}^n N_{fi} \times e^{-\lambda_A (T - i\tau)} \times e^{-\lambda_A t_c}$$

在测量时间 t 内，测量到产物 A 释放的特征射线总数 $N_{A\gamma}$ 为：

$$\begin{aligned} \frac{N_{A\gamma}}{f\eta_\gamma I_\gamma \epsilon_\gamma \epsilon_a} &= \int_{t_c}^t \lambda_A N_A(t) dt \\ &= Y_A (1 - e^{-\lambda_A \tau}) e^{-\lambda_A t_c} (1 - e^{-\lambda_A t}) \sum_{i=1}^n N_{fi} \times e^{-\lambda_A (T - i\tau)} \end{aligned}$$

比值法计算产额

假设在时间 τ 内在实验室某处监测到的中子计数率为 $N_{ac}(k)$ ，样品处中子的转换系数为 H 。那么这段时间的样品裂变率 N_{fk} 与检测片中的反应率 N_{ek} 为：

$$N_{fk} = HN_{ac}(k)\sigma_f N_s$$

$$N_{ek} = HN_{ac}(k)\sigma_e N_e$$

式中， σ_f 为裂变总截面； N_s 为样品中靶核核子数密度； σ_e 为监测片的反应截面； N_e 为监测片中靶核核子数密度。最终探测器测量到的活化核与裂变产物A所释放的特征峰净计数之比为：

$$\frac{N_{e\gamma}}{N_{A\gamma}} = \frac{\sigma_e N_e}{\sigma_f Y_A N_s} \cdot \frac{\frac{1}{\lambda_e} J_e K_e \sum_{k=1}^n N_{ac}(k) e^{-\lambda_e(T-k\tau)}}{\frac{1}{\lambda_A} J_A K_A \sum_{k=1}^n N_{ac}(k) e^{-\lambda_A(T-k\tau)}} \cdot \frac{[f\eta\epsilon_d\epsilon_a c]_e}{[f\eta\epsilon_d\epsilon_a c]_A}$$

由此可以得到A的累积产额计算公式：

$$Y_A = \frac{\sigma_e N_e}{\sigma_f N_s} \cdot \frac{\frac{1}{\lambda_e} J_e K_e \sum_{k=1}^n N_{ac}(k) e^{-\lambda_e(T-k\tau)}}{\frac{1}{\lambda_A} J_A K_A \sum_{k=1}^n N_{ac}(k) e^{-\lambda_A(T-k\tau)}} \cdot \frac{[f\eta\epsilon_d\epsilon_a c]_e}{[f\eta\epsilon_d\epsilon_a c]_A} \cdot \frac{N_{A\gamma}}{N_{e\gamma}}$$

03 实验内容

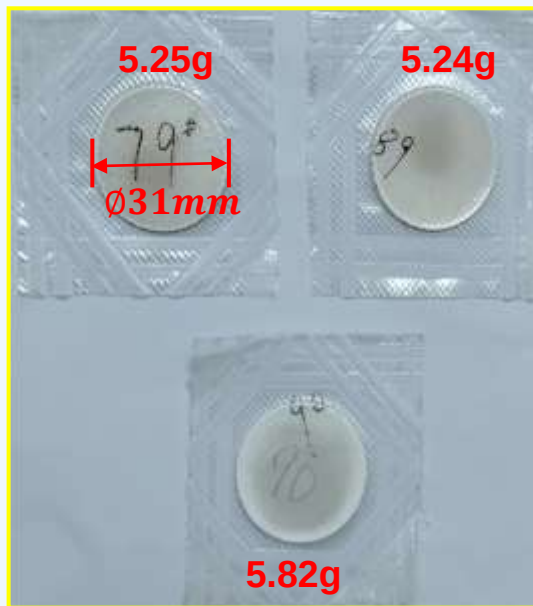


样品与辐照位置

实验样品

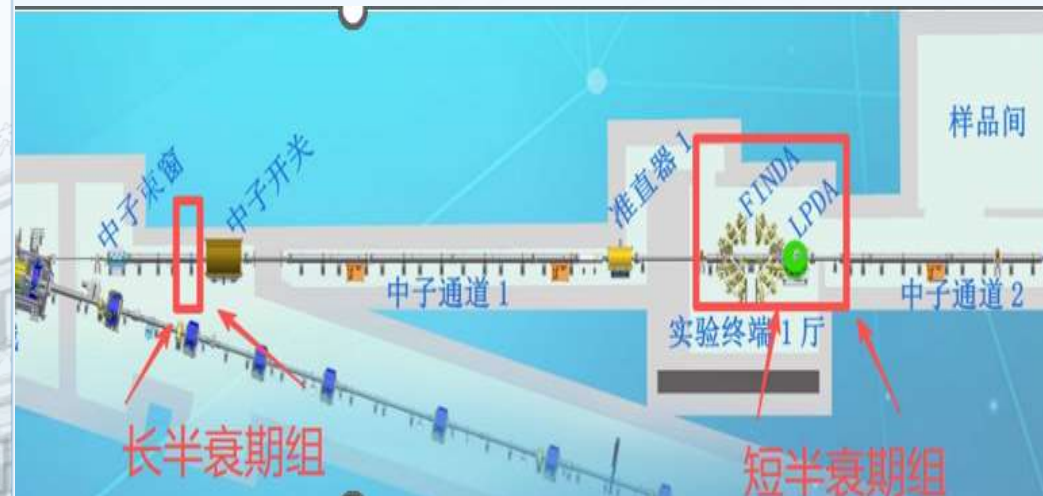


长半衰期组



短半衰期组

辐照位置



- 长半衰期组：共2个塑封样品，置于辐照平台1号位持续辐照（互为对照）。
- 短半衰期组：共4个塑封样品，置于实验终端1厅交替辐照（每次2个）。

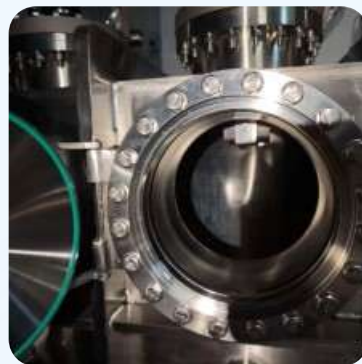
长半衰期组：持续辐照实验

实验概况

2个 ^{232}Th 样品互为对照，进行长时间的持续辐照实验。

时间周期

-  1月26日：样品放置就位
-  1月30日：开始持续辐照
-  2月4日：辐照结束，取出样品
-  周期：约5天



偏离位

1月26日样品置于辐照平台1#号位的偏离位，此时未进行辐照。



工作位

样品在辐照设备中的实际运行状态，于1月30日上午10:00放入工作位进行持续辐照。

短半衰期组：交替辐照与测量

实验方案概述

针对短半衰期产物的特性，我们将4个样品分为两批，在实验终端1厅交替进行辐照与测量，以确保数据的时效性。

- 交替策略：辐照与测量并行
- 批次安排：分为两批进行轮换作业
- 目标：最大化利用束流时间与测量条件，保证实验效率

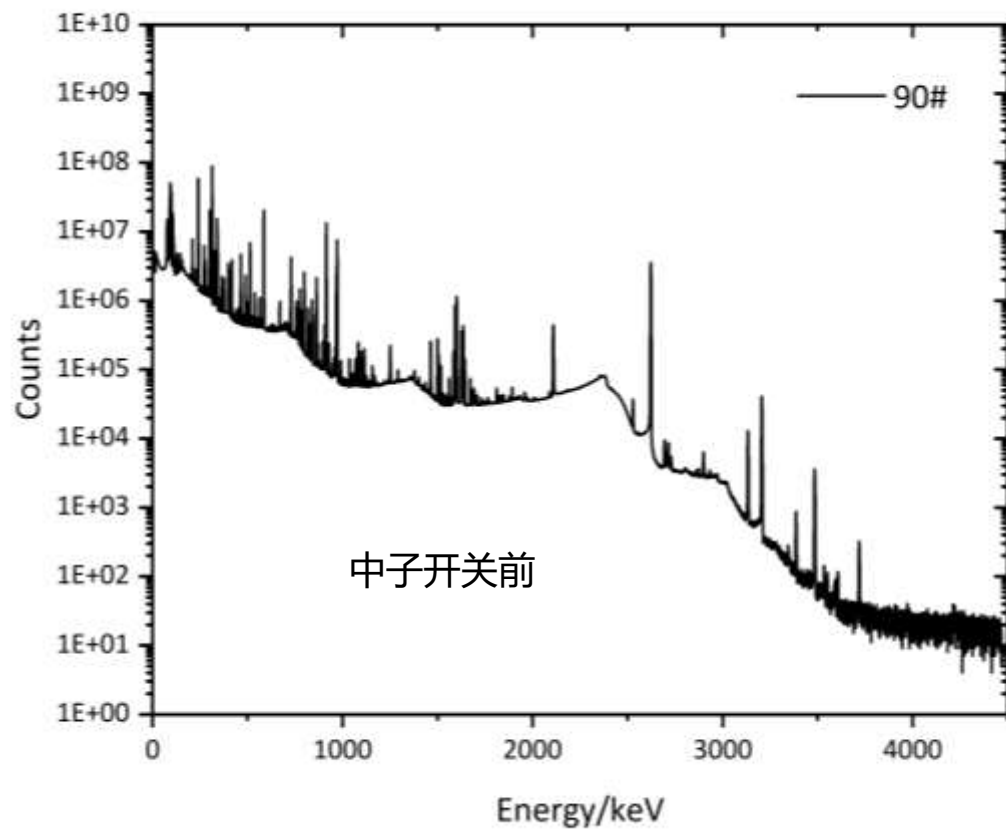
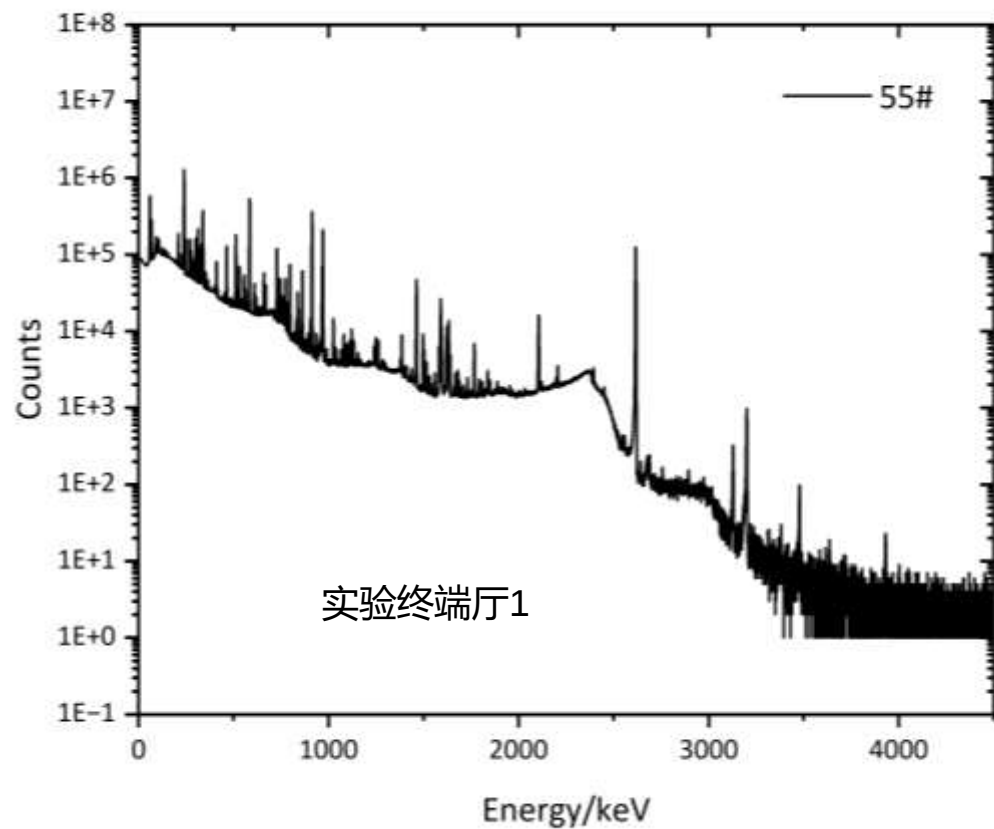
实验时间安排表

日期	样品	状态	样品	状态
1.30	#55/#64	辐照	#68/#88	测量
1.31	#68/#88	辐照	#55/#64	测量
				
2.3	#55/#64	辐照	#68/#88	测量
2.4	#68/#88	辐照	#55/#64	测量

实验现场



特征伽马谱测量

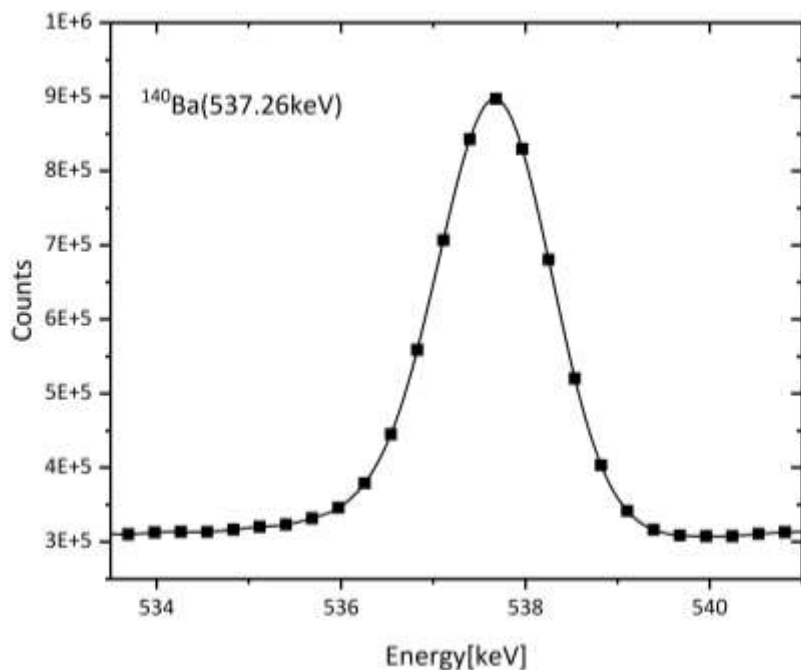


04 能谱解谱

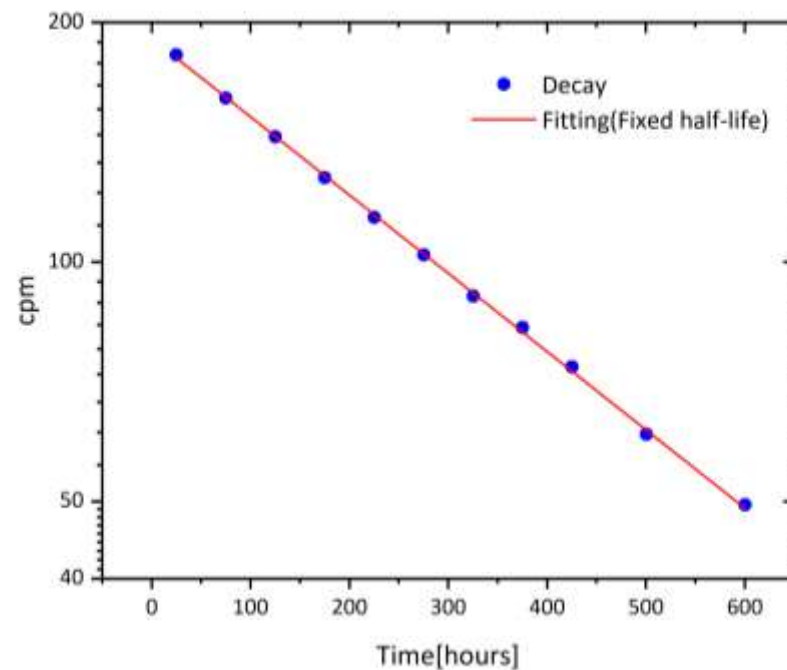


特征峰区无明显干扰

^{140}Ba 的特征峰区



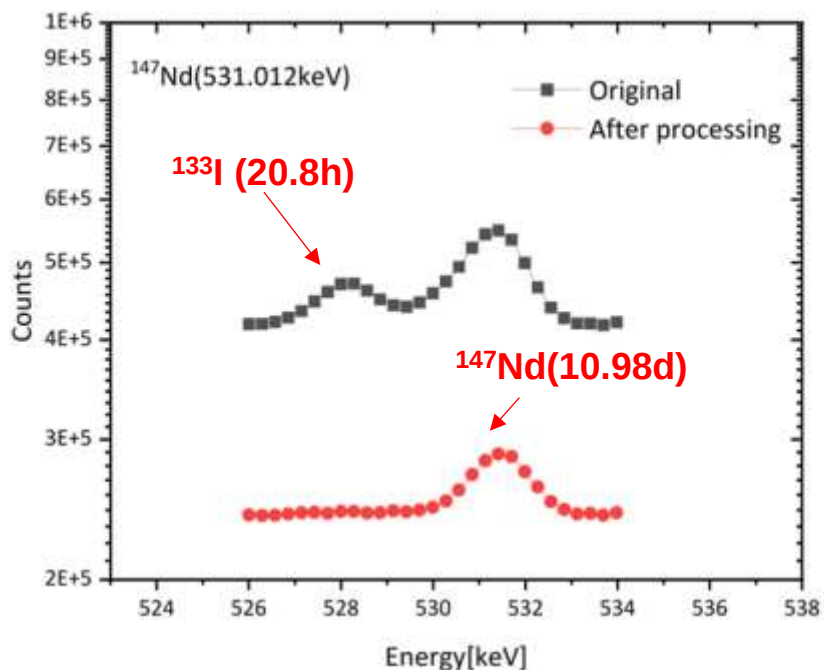
衰变曲线



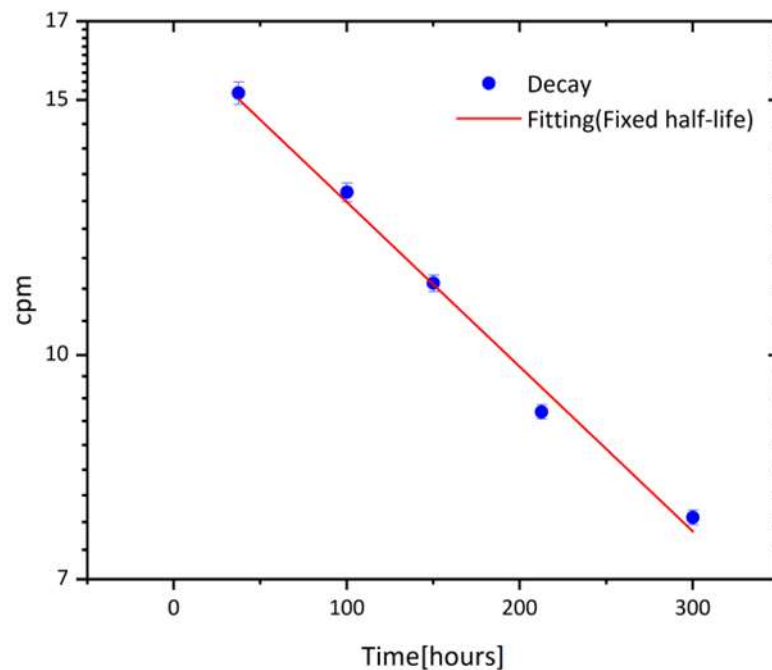
💡 结论：辐照时间充足，特征峰净计数超40W，统计精度较高；实验数据与固定半衰期的衰变曲线拟合良好，可支持后续深入分析。

干扰峰半衰期差异较大

^{147}Nd 的特征峰区



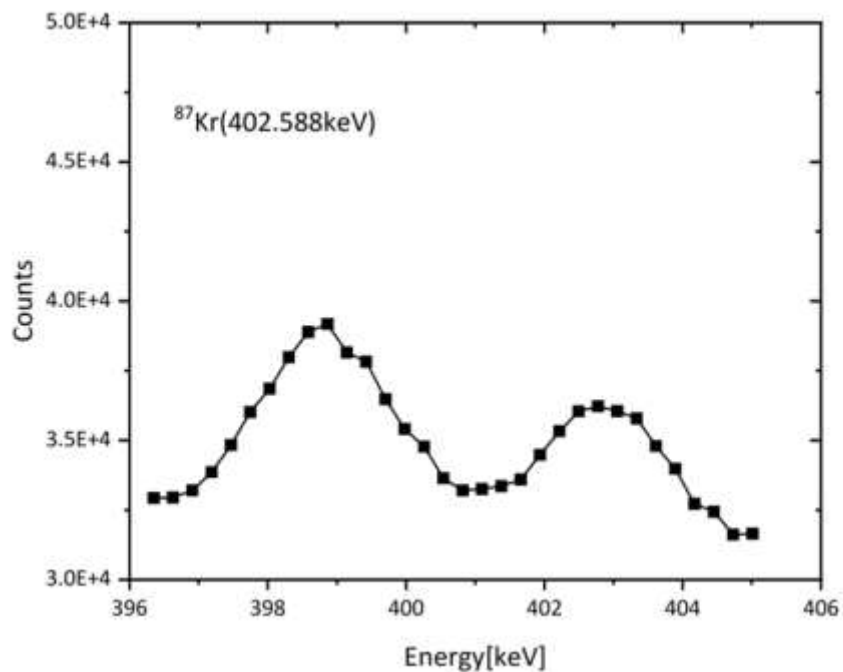
衰变曲线



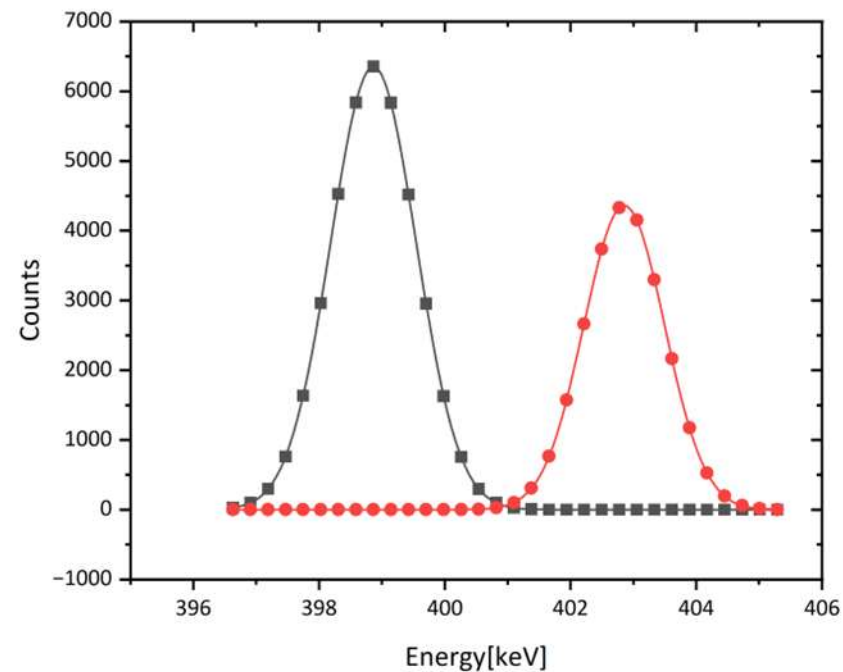
💡 结论：特征峰区存在 ^{133}I 干扰，但可利用半衰期的差异，通过延长冷却时间进行有效区分。处理后的实验数据与固定半衰期的衰变曲线拟合良好，可支持后续裂变产额计算。

半衰期差异不大或计数低

^{87}Kr 的特征峰区



分峰拟合处理



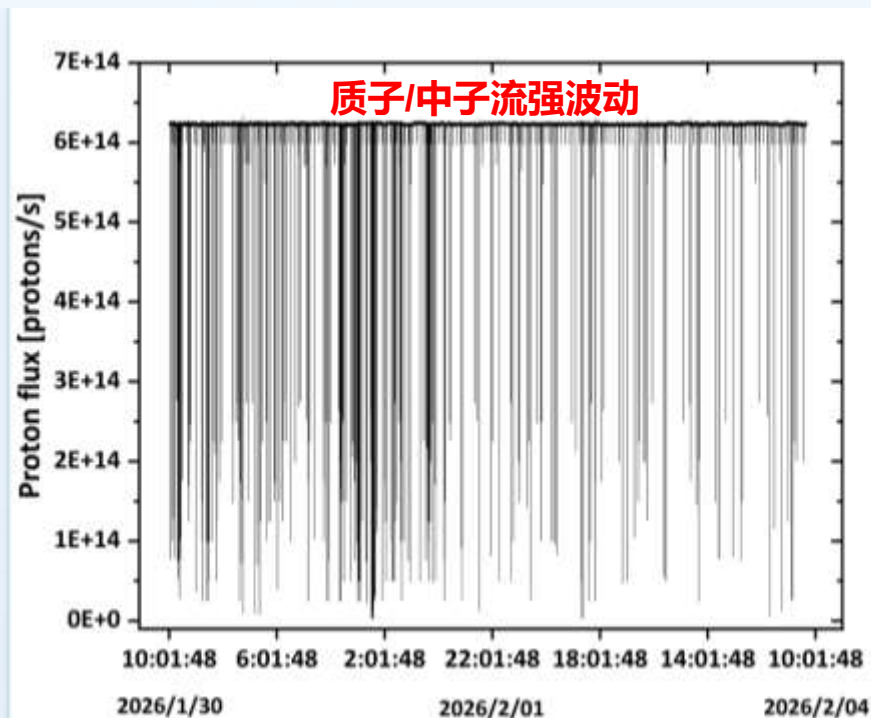
结论：半衰期差异不大或特征峰计数较低时，通过分峰拟合方法可有效分离邻近干扰峰。

05 修正因子



衰变因子修正

辐照过程中的质子流强



$$N_A = \sum_{i=1}^n N_{Ai} = \frac{Y_A}{\lambda_A} (1 - e^{-\lambda_A \tau}) \sum_{i=1}^n N_{fi} \times e^{-\lambda_A (T - i\tau)}$$

辐照过程中，产物在生成的同时也在不断衰变，在时间 τ 内，裂变总数 N_{fi} 与中子能谱和中子流强有关。在辐照过程中，认为中子能谱基本不变，而中子流强与质子流强成正比例关系。

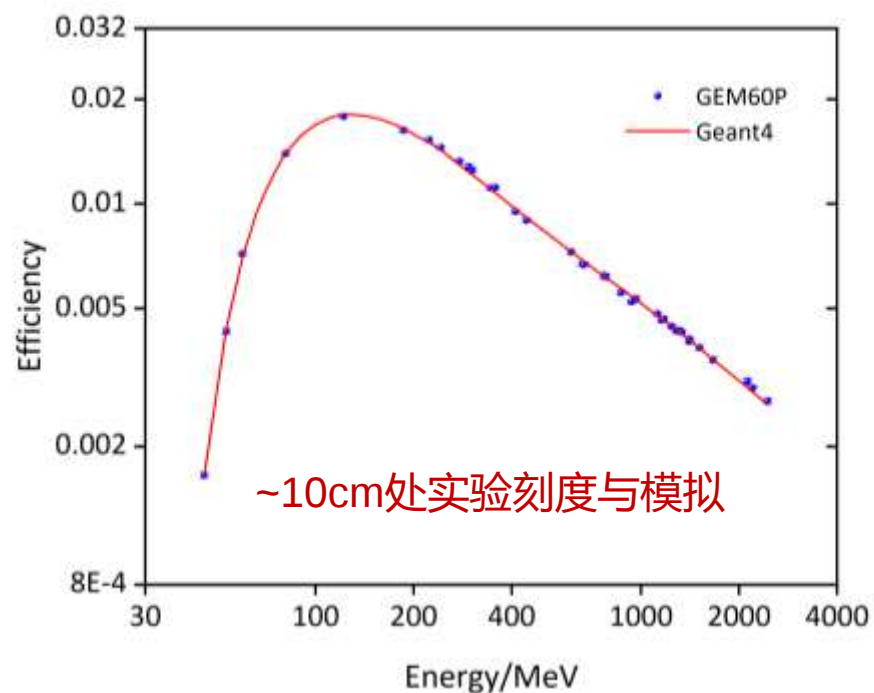
$$\phi_p = k \cdot \phi_n$$

因此，中子流强波动可以通过质子流强波动来衡量，且比例系数 k 可通过比值约掉，进而实现对辐照过程中衰变的修正。

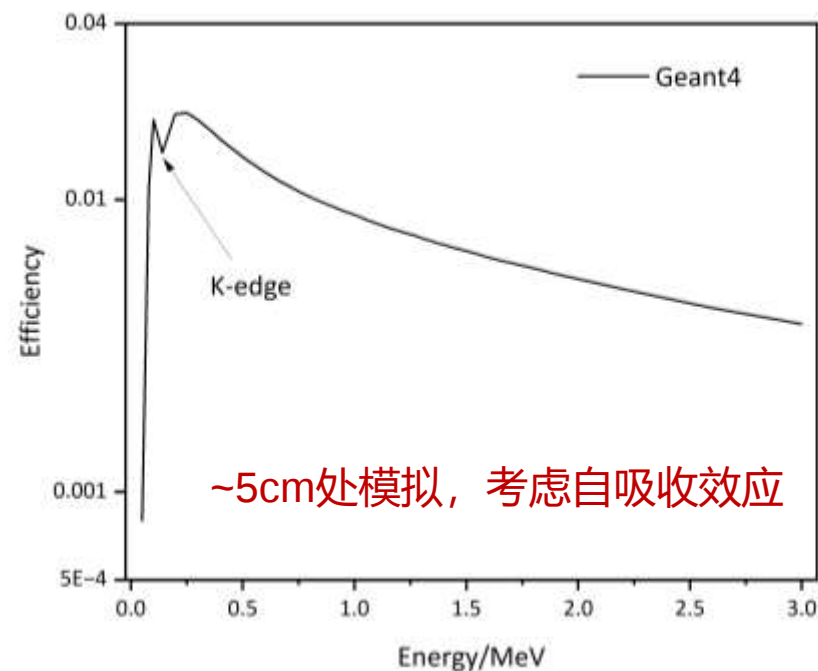
🔗 结论：稳态运行的中子辐照过程中，中子通量的波动可以通过质子流强波动来反映，并计算出产物的衰变因子。

符合相加效应与自吸收修正

利用实验刻度点对Geant4精确建模



Geant4模拟探测效率曲线

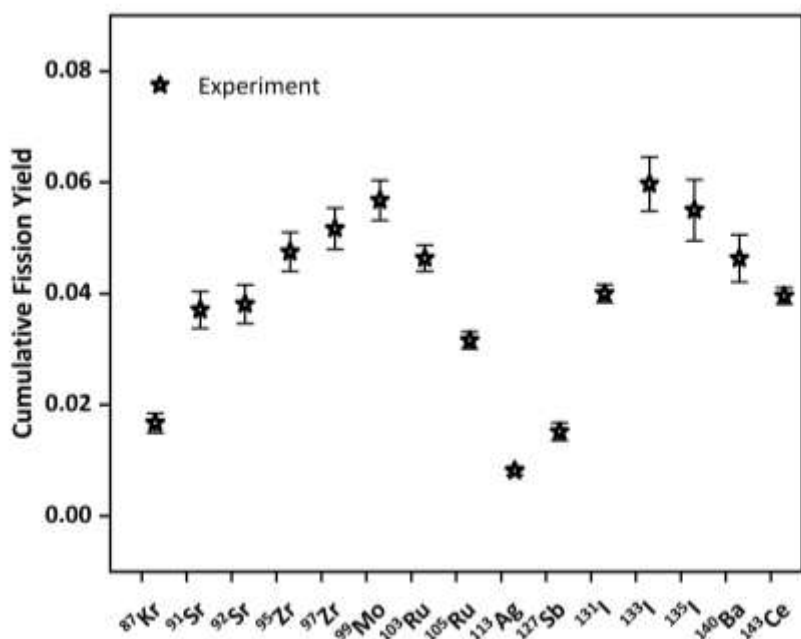


结论：可通过Geant4模拟，在低支架测量时规避符合相加效应对效率刻度的影响，同时提高自吸收系数的准确度

06 初步结果与理论模拟



初步结果



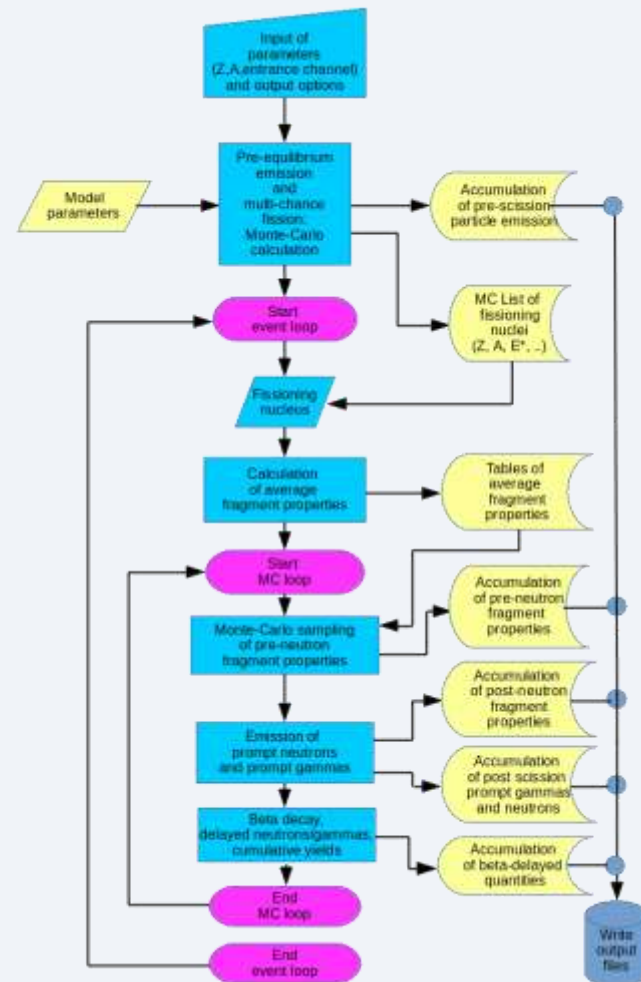
宏观检验

GEF 理论模拟模型

```
E:\CSNS_Th232\GEF-Full-Y2025-V1-4>GEF.exe

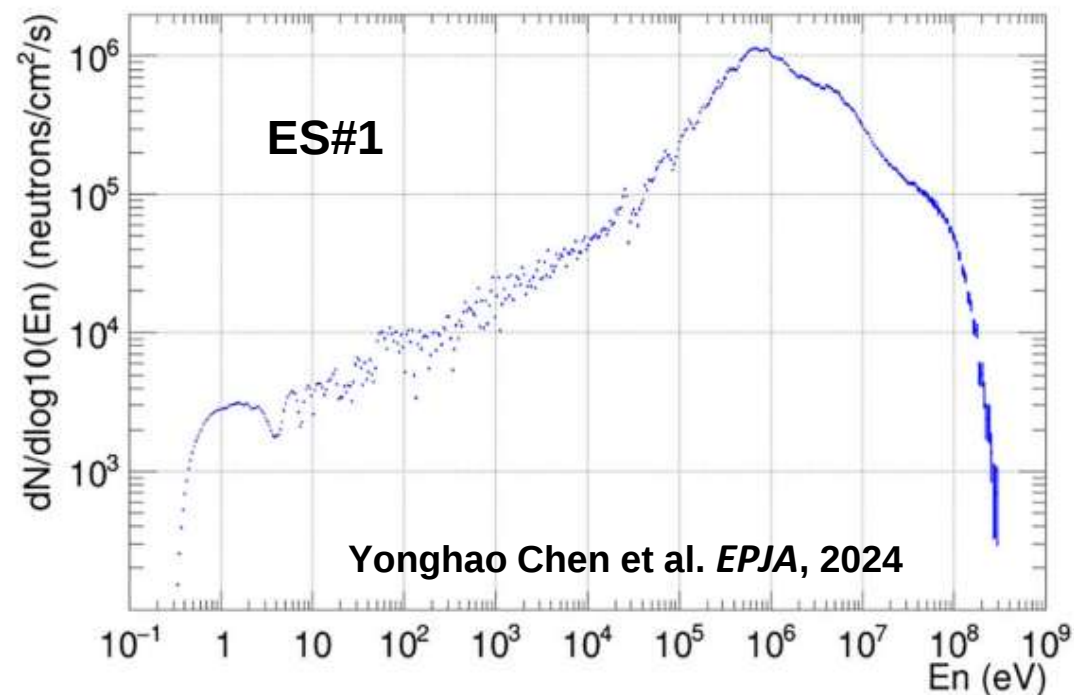
*****
* Model code for a general description of fission observables *
* G E F *
* Version 2025/1.4 *
* Copyright 2009,2010,2011,2012,2013,2014,2015,2016,2017,2018,2019, *
* 2020,2021,2022,2023,2024,2025,2026 *
* *
* W.-H. Schmidt and B. Jurado *
*****

GEF 2025/1.4 compiled on 2026-05-31 at 07:37:02.
```



小结与后续计划

- 实验测量已完成，通过解谱对数据进行了初步的处理。
- 利用Geant4并结合实验测量，对探测效率、自吸收系数等进行了精确计算。
- 初步处理的结果不确定度较大，最大约10%。
- 拟将中子能谱数据导入GEF程序，计算 ^{99}Mo 、 ^{140}Ba 等裂变产物产额及不确定度，并与实验测量数据进行比较。
- 后续准备在川大720所、九院2所进行D-D、D-T中子实验，结合裂变电离室进行绝对测量。



谢谢!

欢迎各位专家批评指正，欢迎提问和交流

