

基于白光中子源的 ^{159}Tb 中子辐射俘获截面测量

报告人：陈玄博

GTAF课题组：张奇玮 栾广源 吴鸿毅 罗湔天 陈玄博 王雨晴 季玉桐

中国原子能科学研究院 核数据全国重点实验室

时间：2026. 7. 16

目录

CONTENTS

01

背景介绍

02

^{159}Tb 中子辐射俘获反应截面测量实验

03

实验数据处理

04

共振参数分析

05

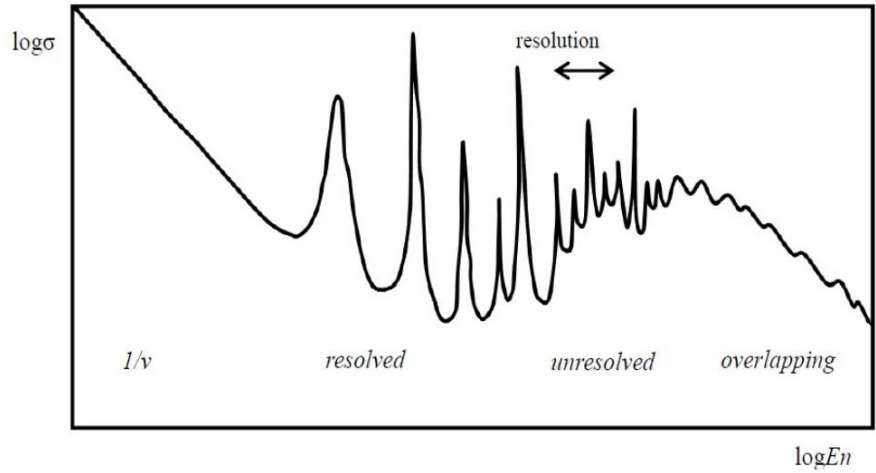
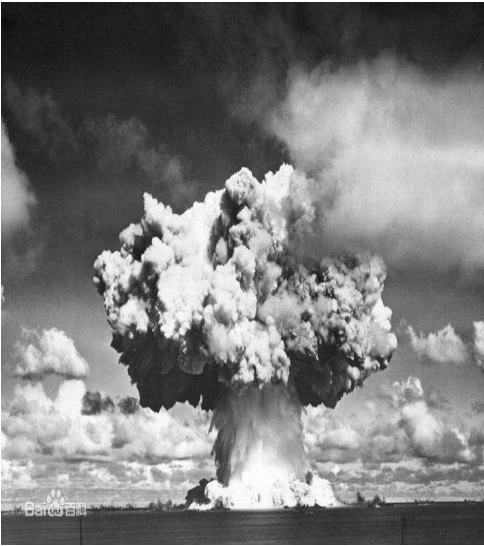
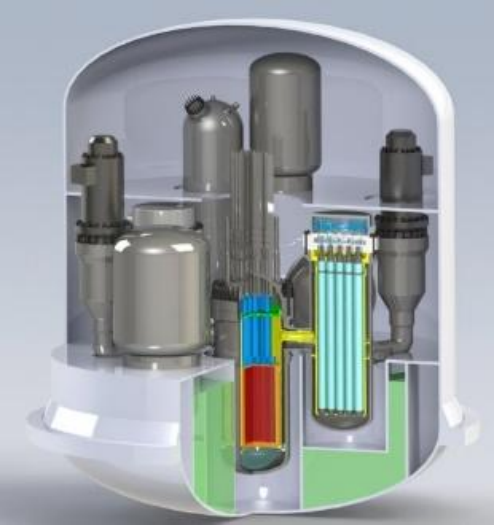
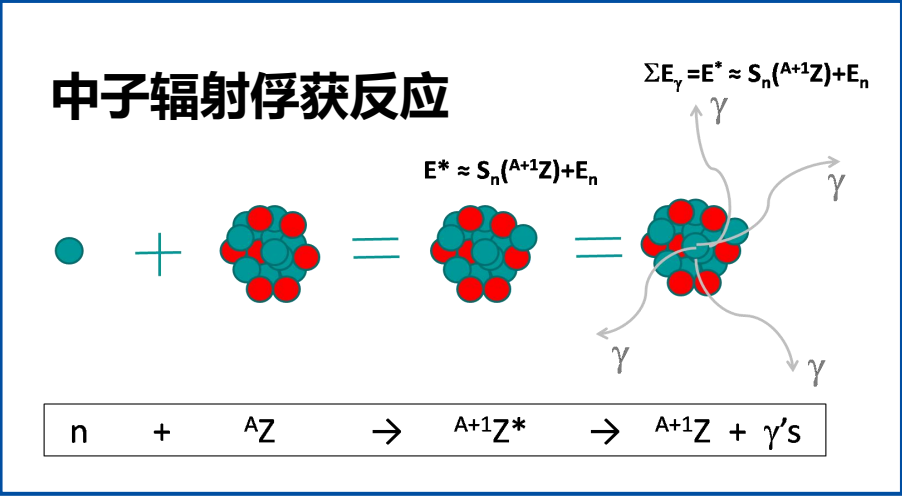
总结与展望

01

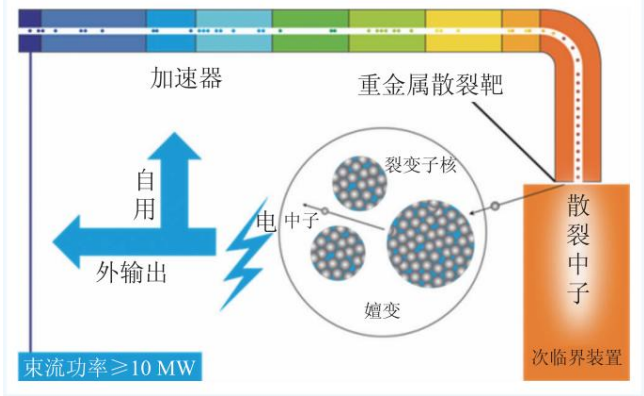
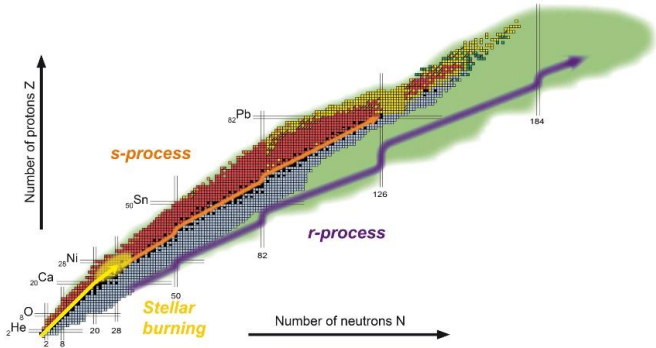
背景介绍

中子辐射俘获反应截面测量意义

中子辐射俘获反应是重要的中子反应之一，在核能利用、核装置设计、核天体物理等方面均有应用。



中子辐射俘获反应截面激发曲线



中子辐射俘获反应的测量方法

测量方法

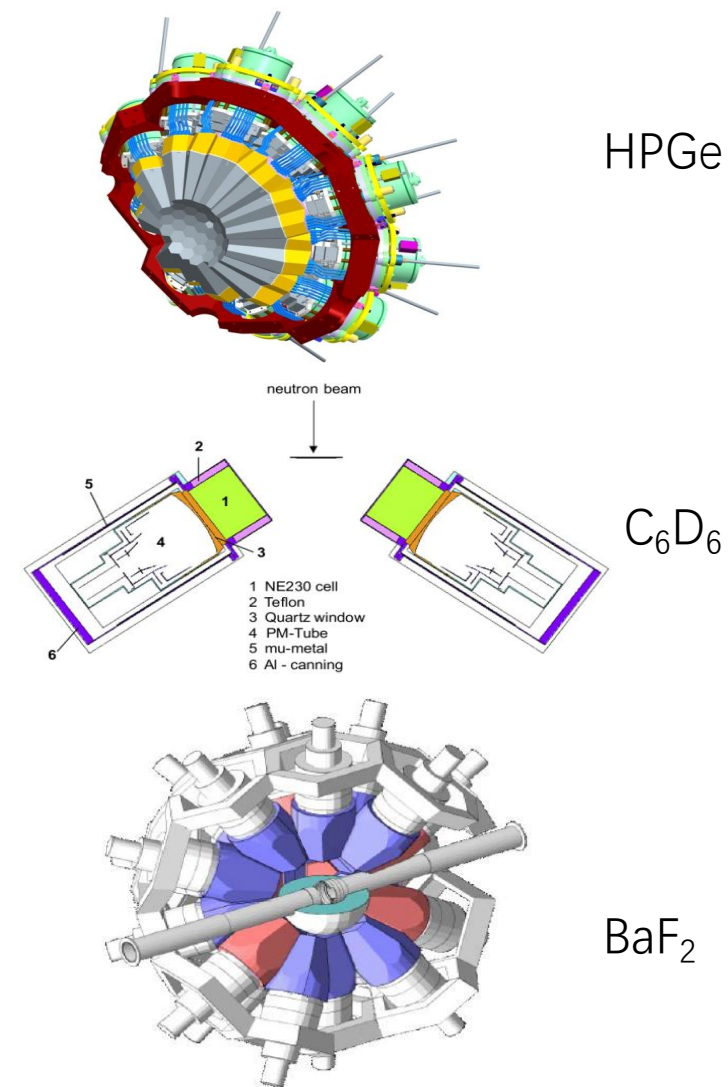
离线测量（活化法）：

将样品置于中子场中辐照，通过测量产物核特征 γ 射线活度，结合半衰期、 γ 分支比和中子注量反推出俘获截面。

在线测量：

1. 高分辨率 γ 射线探测系统
2. 总能量型 γ 射线探测系统
3. **全吸收型** γ 射线探测系统

特点：探测器效率接近100%、低中子灵敏度、退激路径与探测效率无关（稀有样品、放射性样品及小反应截面样品）



1、背景介绍

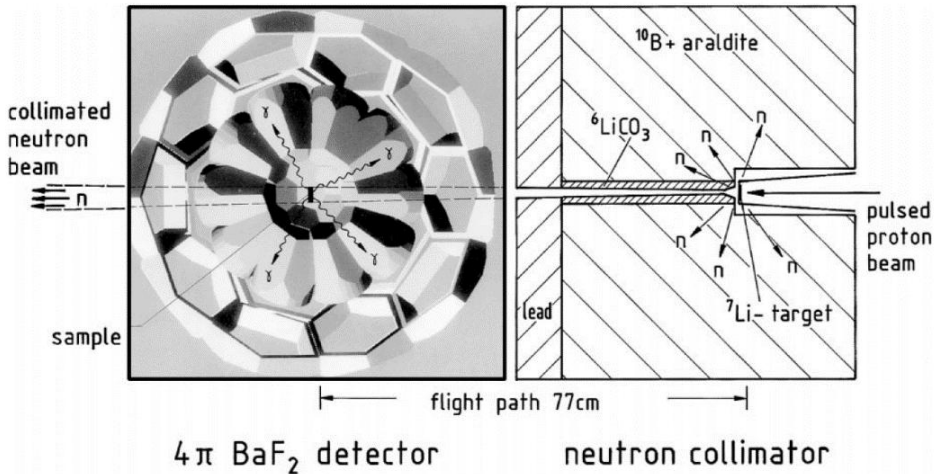
中子辐射俘获反应的测量方法

γ 全吸收型BaF₂探测器

上世纪80年代，BaF₂的发光成分被人们发现。BaF₂闪烁体具有如下几种优点：

- (1) 拥有较低的中子灵敏度，不易因中子反应产生本底。
- (2) 快成分的发光衰减时间仅有0.6ns，适合开展TOF方法。
- (3) BaF₂为固体晶体，化学性质稳定，不易潮解，形状尺寸加工较为容易。

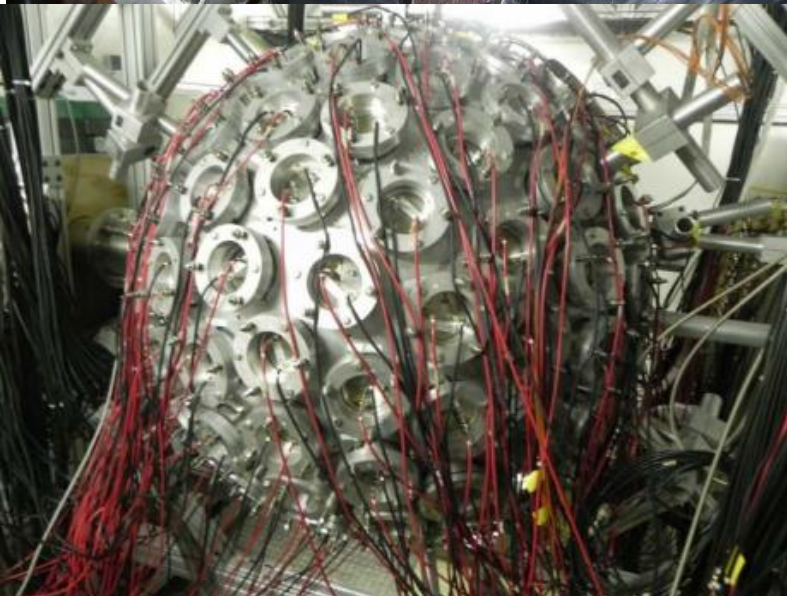
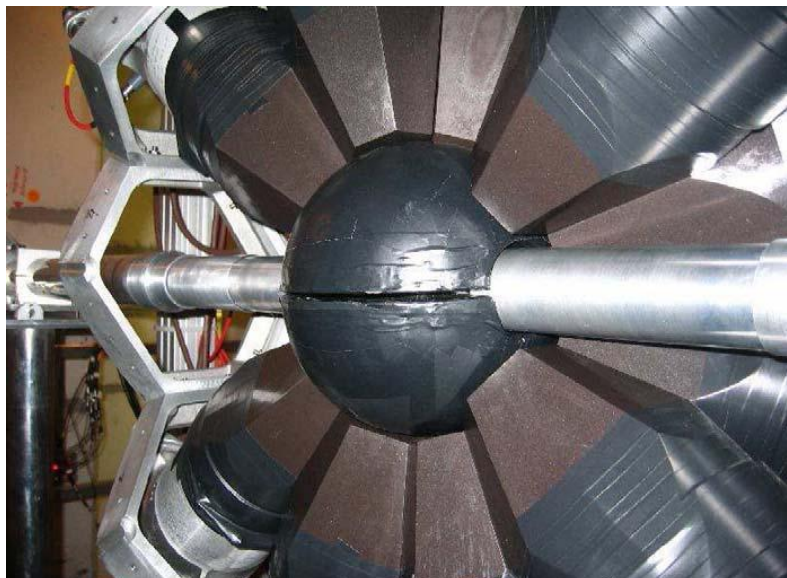
晶体	密度 (g·cm-3)	熔点 (K)	折射系数	峰值发射波长 (nm)	发光衰减时间 (ns)	光输出 (%)	潮解性
NaI(Tl)	3.67	924	1.85	415	230	100	强
CsI(Tl)	4.51	894	1.79	550	100	45	微
BGO	7.13	1323	2.15	480	300	10~14	不
BaF2	4.89	1553	1.51(S) 1.49(F)	325(S) 225(F)	620(S) 0.6(F)	20(S) 4(F)	不
PbWO4	8.28	1396	2.16	440	6	0.5	不
GSO(Ce)	6.71	2223	1.85	450	60	30	不
YAP(Ce)	5.35	2148	1.94	390	35	40	不
LSO(Ce)	7.41	2323	1.82	440	40	75	不



德国Karlsruhe 实验室的 γ 全吸型

BaF₂探测器

中子辐射俘获反应的测量方法



CERN的n_TOF上的TAC装置

晶体数量：40块

几何形状：内径10cm，厚度15cm的球壳

能量分辨率：对应0.662MeV处，12%~16%

^{197}Au 、 $^{233,234,238}\text{U}$ 、 ^{232}Th 、 ^{237}Np 、 ^{240}Pu 、 $^{241,243}\text{Am}$ 、 ^{244}Cm et.al
Guerrero et al., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 2009.

阿拉莫斯实验室LANSCE上的DANCE装置

晶体数量：160块

几何形状：内径17cm，厚度15cm的球壳

能量分辨率：对应1MeV处，约为14%

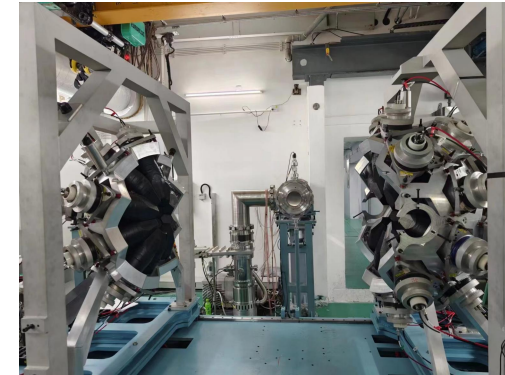
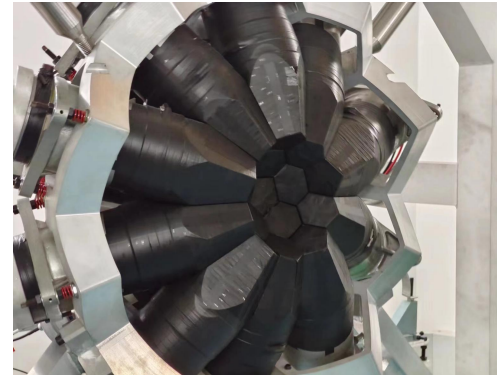
^{235}U 、 ^{238}U 、 ^{237}Np 、 $^{238,239,242}\text{Pu}$ 、 ^{241}Am 、 ^{63}Ni 、 ^{151}Sm et.al
Reifarh et al., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*, 2005

2、 ^{159}Tb 中子辐射俘获反应截面实验测量

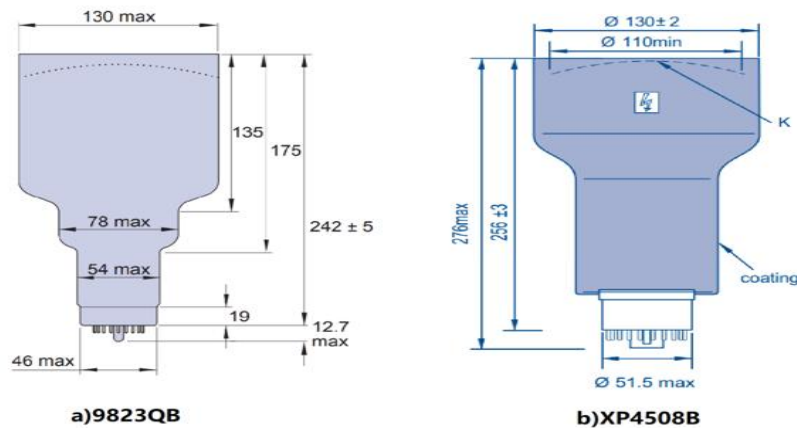
GTAF装置简介

GTAF装置由40个探测单元组成，其中包含12块五棱锥台形晶体和28块六棱锥台形晶体。该探测器能够覆盖95.2%的立体角。对50 keV到9 MeV的探测效率可以达到85%以上。

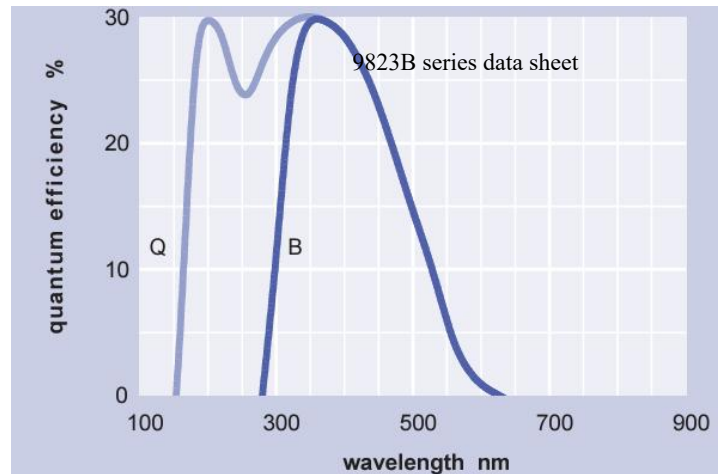
探测单元使用的光电倍增管为ET 9823QB，该光电倍增管采用了石英玻璃作为窗口，贴合 BaF_2 晶体的发光波长（225ns和325ns）。



GTAF装置照片



更新PMT



9823QB的光响应效率

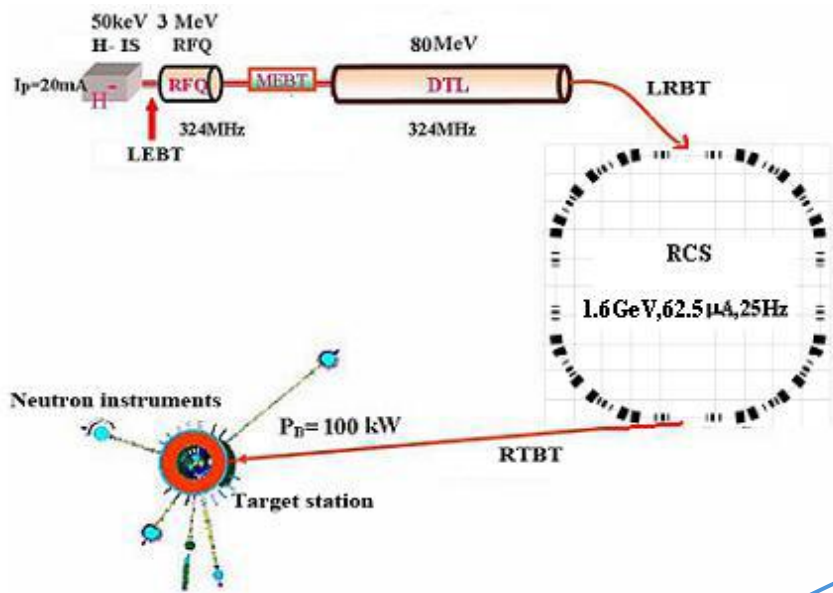


GTAF 使用的 PMT 实物

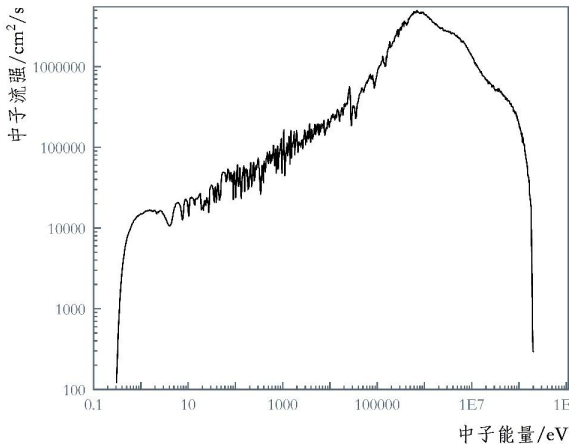
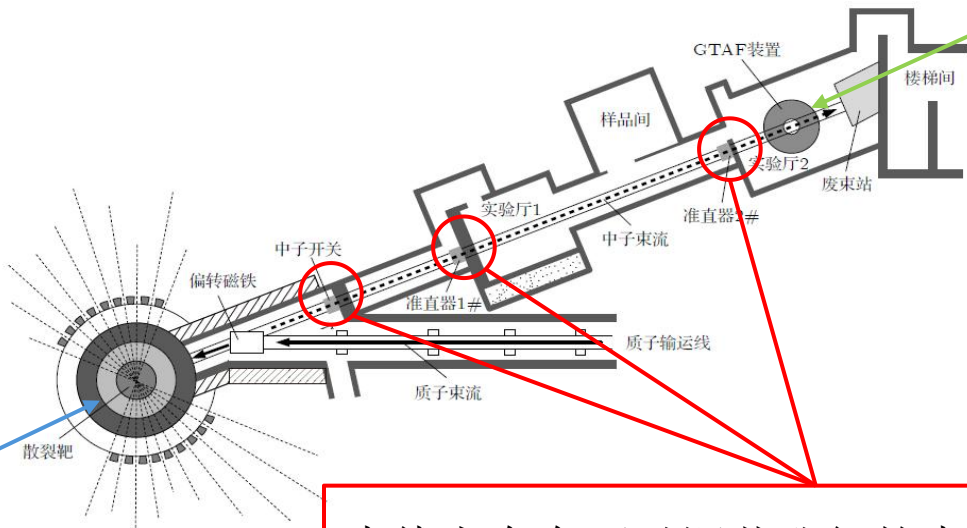
2、 ^{159}Tb 中子辐射俘获反应截面实验测量

中国散裂中子源Back-n束线

中国散裂中子源于2018年建成，由直线加速器、快循环质子同步加速器、靶站组成。



GTAF装置放置于距离质子打靶处约76m处。



Back-n束线中子能量范围为eV能区到MeV能区，中子束流为两个间隔410ns，形状为半高宽40ns的抛物线束团。

束线上存在可以调节孔径的中子开关和两个准直器，通过三个孔径可以控制束斑大小。本次实验使用30mm的束斑。

中子束斑尺寸	中子开关孔径	准直器1孔径	准直器2孔径
Φ30mm	Φ12mm	Φ15mm	Φ40mm
Φ60mm	Φ50mm	Φ50mm	Φ58mm

02

^{159}Tb 中子辐射俘获反应截面测量实验

Tb中子辐射俘获反应截面测量现状

测量意义

核工程应用

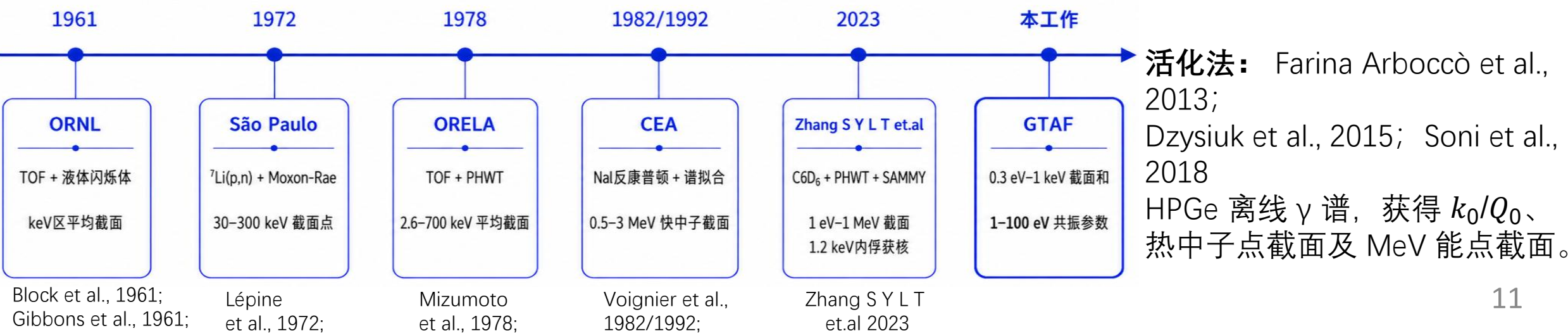
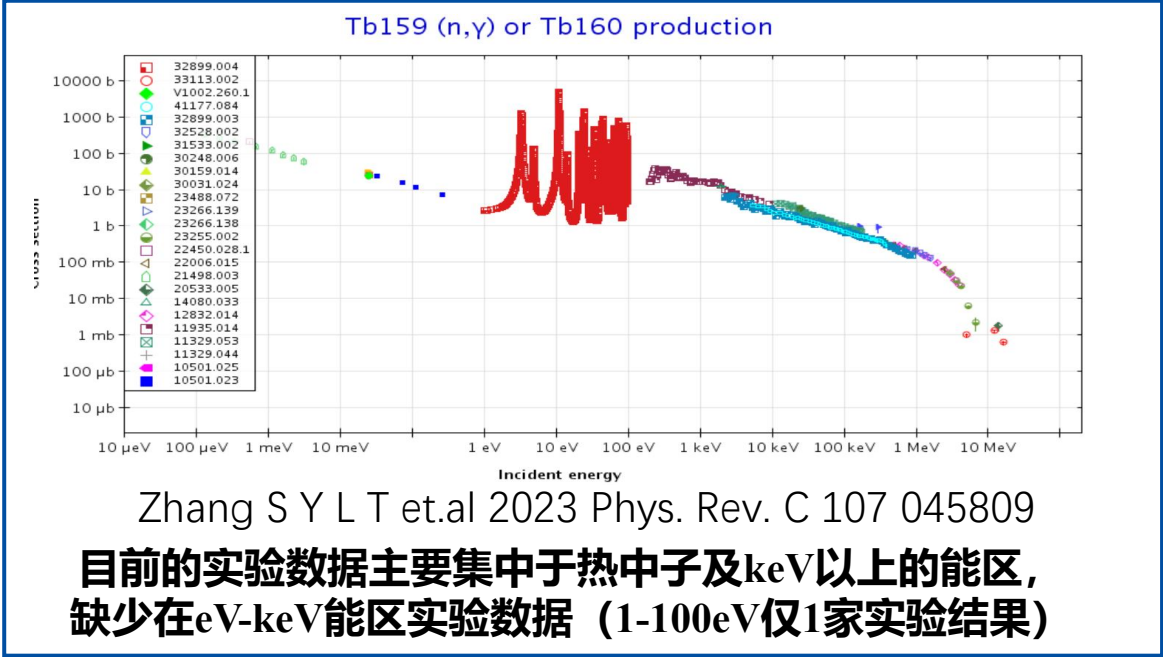
反应堆设计、屏蔽计算、活化分析和数据库评价所需基础核数据

核天体物理

稀土区 s过程核合成及反应网络计算的重要输入

核数据评价

低能共振参数可约束评价库中的截面重构与共振行为

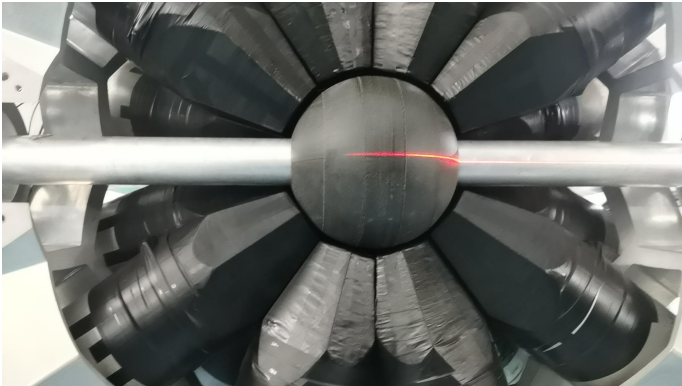


2、¹⁵⁹Tb中子辐射俘获反应截面实验测量

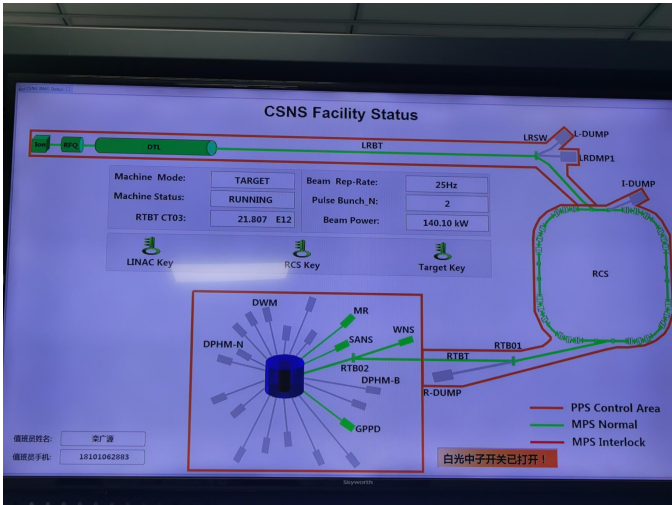
实验样品及相关参数

实验中使用的样品及参数：

样品	直径 / mm	厚度/ mm	用途
natTb	40	0.04、0.25、1	目标样品，提取俘获产额与截面
natC	40	1.02	散射相关本底评估
空样品	/	/	空样品本底测量
Au	40	0.097	方法验证与能量刻度辅助检验



中子吸收体及真空管道



白光束流条件

03

实验数据处理

死时间因子修正

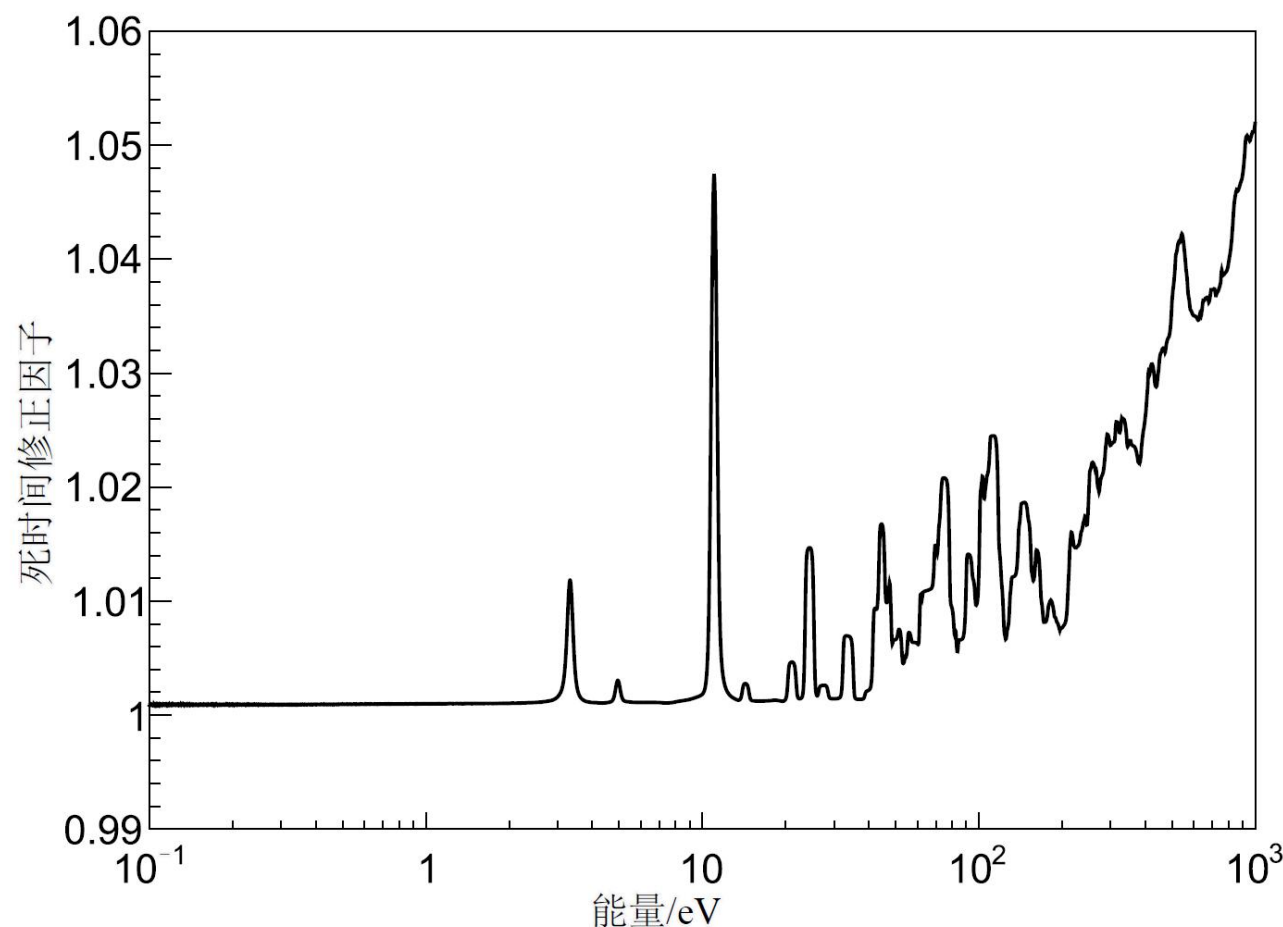
由于高计数率区域存在计数损失，从而导致部分真实事件未被完整记录，这一效应称为死时间效应。

延长型模型假设在死时间间隔内到达的事件将延长系统的失活时间，其计数率关系可表示为： $m = ne^{-n\tau}$

n 和 m 分别为真实计数率和观测计数率， τ 为系统死时间。

故由 TOF 谱估计瞬时计数率 $R(t)$ ，本工作取 $\tau = 200$ ns，对原始 TOF 谱逐 bin 修正。

其修正因子可表示为： $C_{dead}(t) = e^{R(t)\tau}$



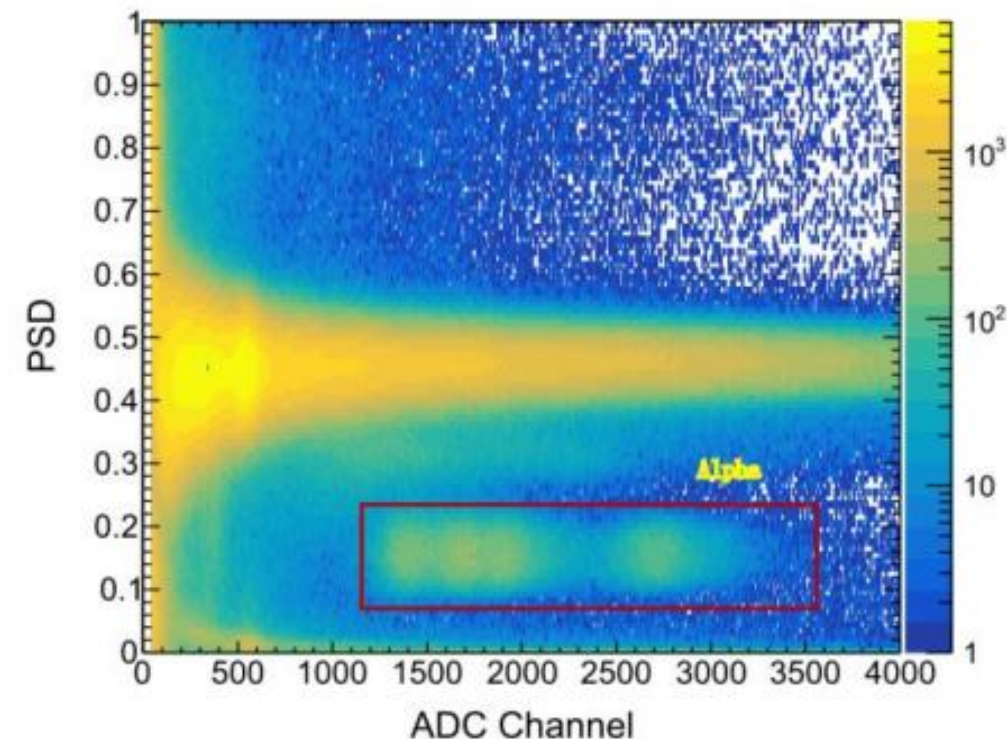
^{159}Tb 死时间修正因子

PSD筛选

BaF₂晶体中含有难以去除的Ba同族元素Ra，会放出4种能量的α粒子，是实验测量的本底。γ射线引起快成分发光相较于α粒子比例大，故采用PSD方法区分α粒子和γ射线的效应。PSD的计算方法为：

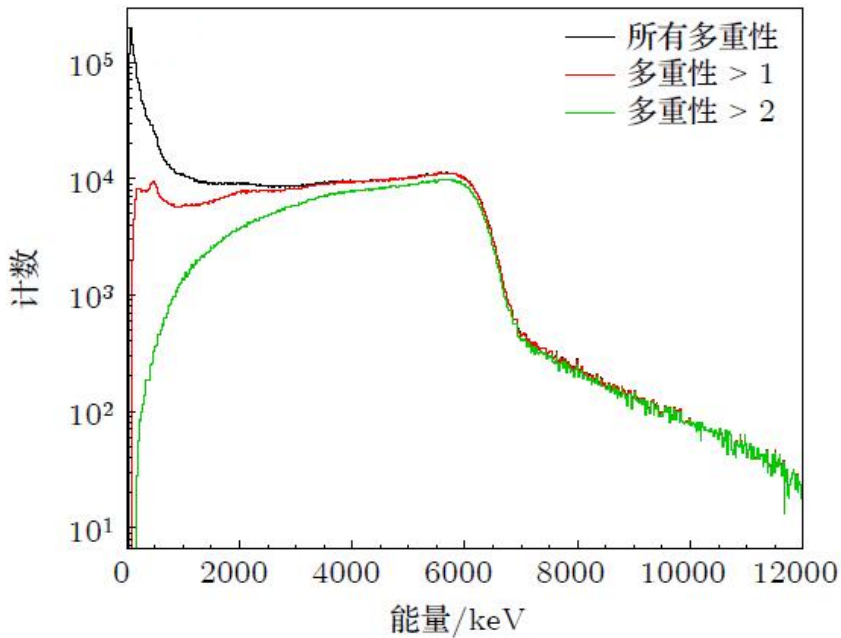
$$PSD = \frac{E_{T_{short}}}{E_{T_{long}}}$$

$$T_{long} = 120ns, T_{short} = 40 ns$$

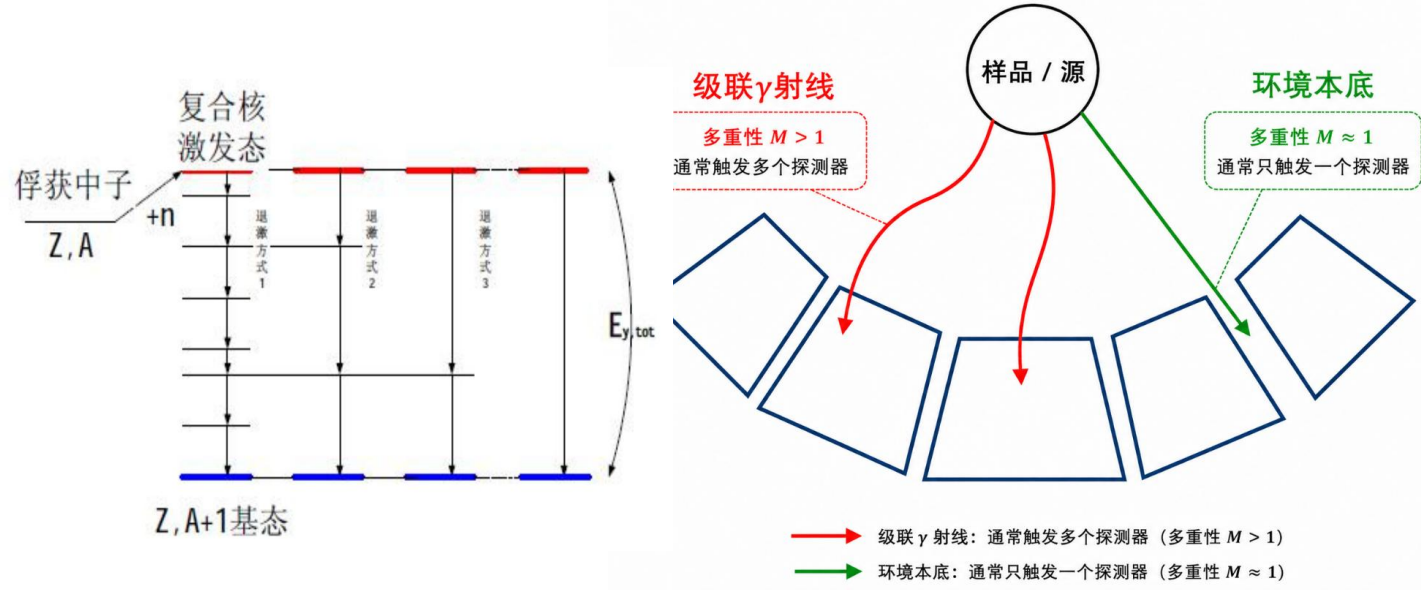


晶体多重性筛选

晶体多重性指的是同一时间窗口内被触发的探测单元数量。



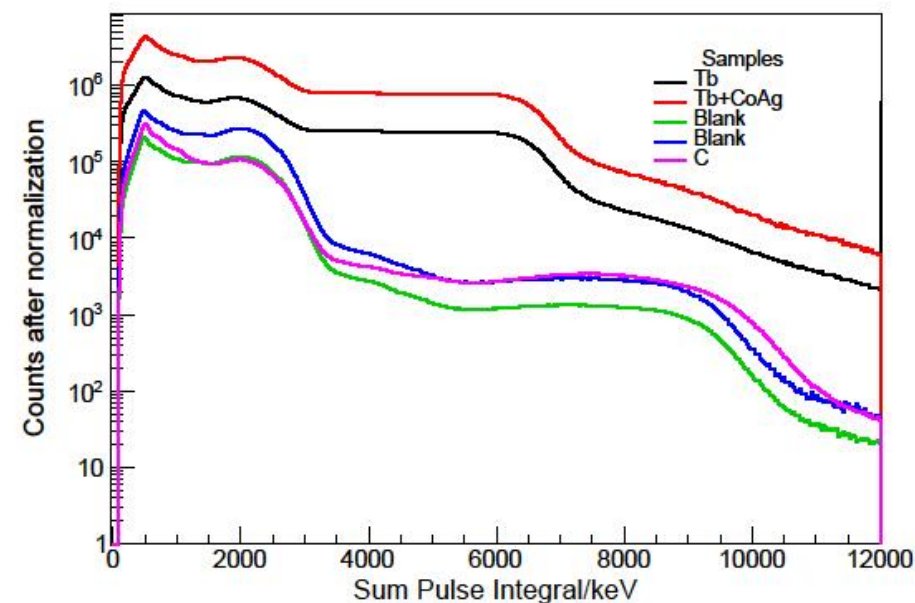
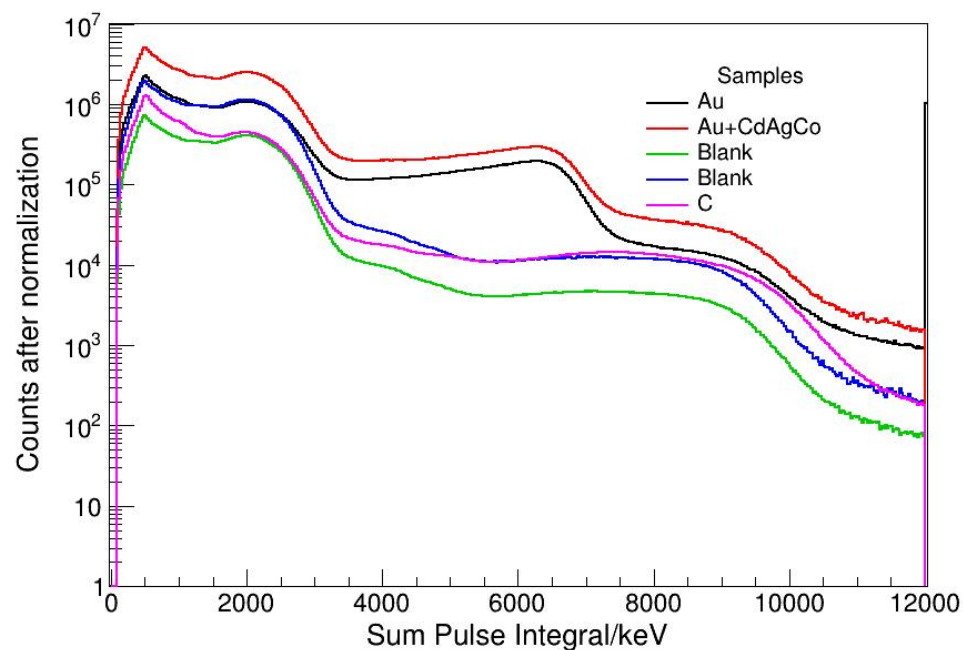
¹⁵⁹Tb最强共振峰的多重性分布



俘获级联 γ 射线通常会触发多个晶体，而环境本底和电子学噪声多表现为单晶体响应，因此去除多重性为 1 的事件可有效降低偶然符合和环境本底。

加和能量筛选

^{159}Tb 样品的中子结合能为6.35 MeV。最终选择加和能为3.5~7.5 MeV区分出样品的高能和低能本底。



通过选取接近 (n, γ) 反应 Q 值的总 γ 能量窗口, 可有效抑制低能环境本底、高能宇宙射线本底以及部分散射中子本底。

3、实验数据处理

本底扣除

空本底扣除

通过测量空靶架，可以得到与靶无关的本底。

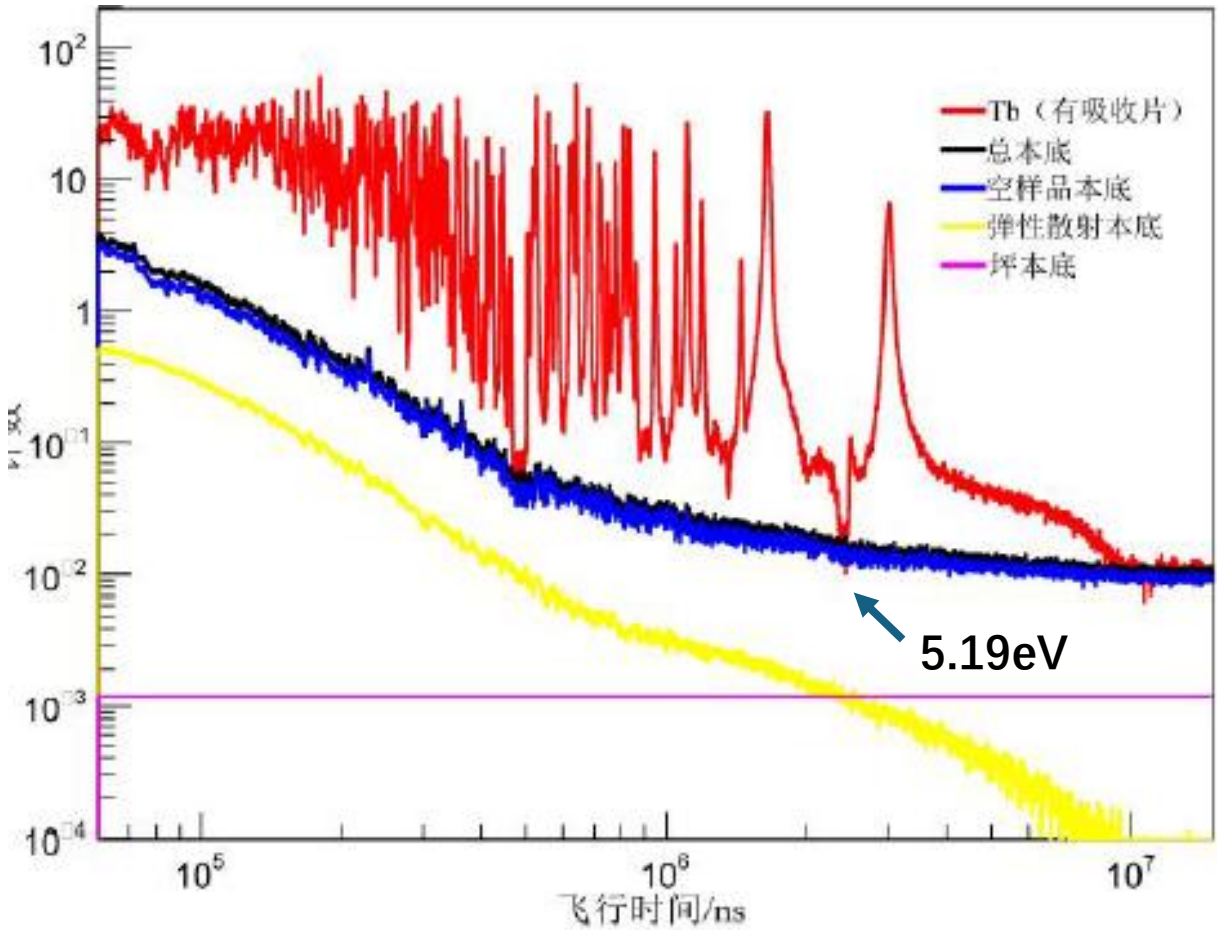
坪本底扣除

实验环境中存在散射中子活化的长寿命衰变核素，放出 γ 射线，这一部分本底被称作坪本底。

散射本底扣除

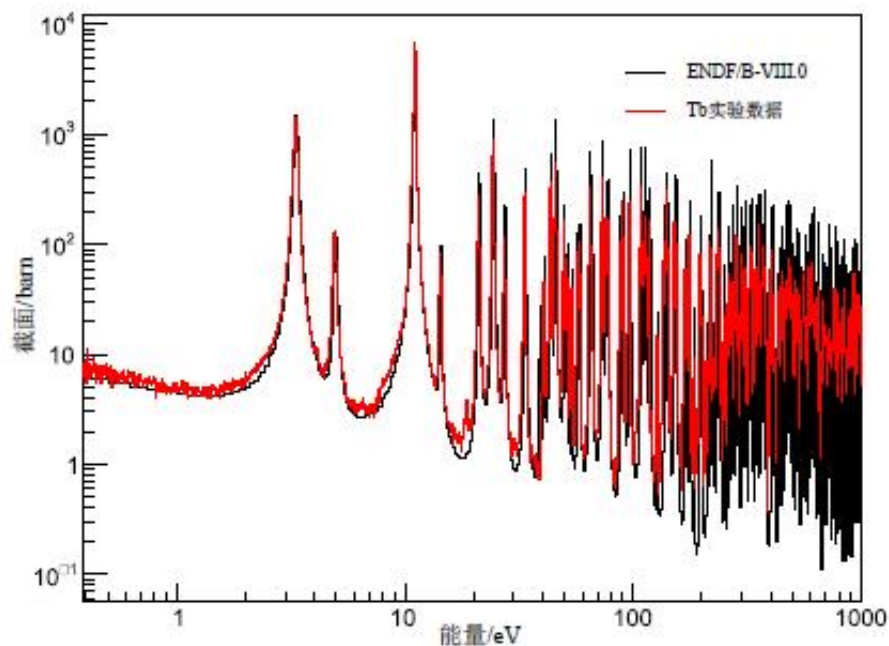
C样品的中子散射反应截面远远大于其中子辐射俘获截面，因此能够通过测量C样品的效应谱来获得因散射中子活化产生的本底。

本工作使用了Cd（厚度1 mm）、Ag（厚度0.4 mm）、Co（厚度1 mm）三种吸收片。



靶核	吸收范围/eV
Cd	<0.3eV
Ag	5.19
Co	132

实验结果与ENDF/B-VIII.0比较



^{159}Tb 实验截面与ENDF/B-VIII.0 评价库对比

由于40um样品统计不足，1mm样品多个峰饱和，最终选取250um厚度样品进行展示。

^{159}Tb 在低能部分存在2个ENDF/B-VIII.0上不存在的共振峰结构，且已经排除了样品杂质及束流结构的影响。

共振曲线上截面较低的区域，实验结果均略高于评价值，这种现象可能由如下几种因素产生：

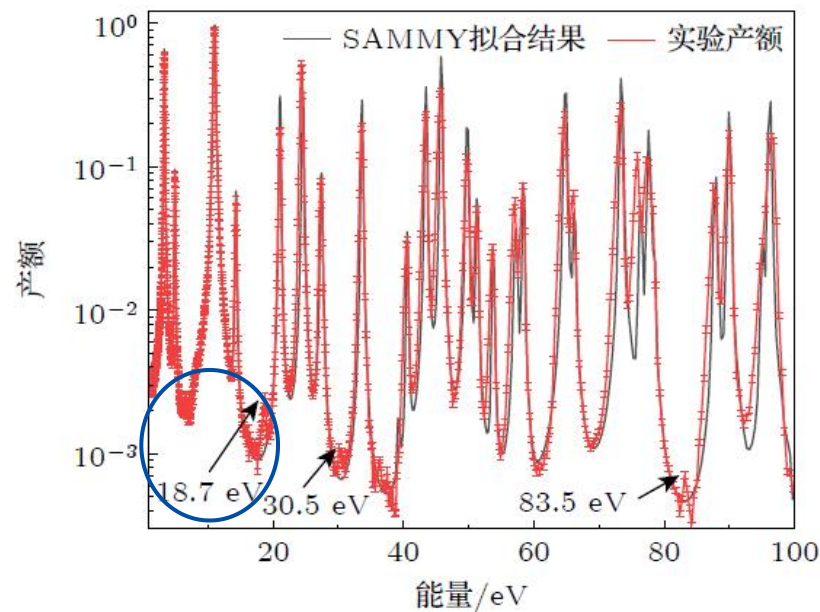
- (1) 待测样品在共振能区中子散射截面与C样品数据不一致。
- (2) 实验时长较短，统计涨落大。
- (3) 数据处理使用的中子能谱形状具有较大不确定度。

04

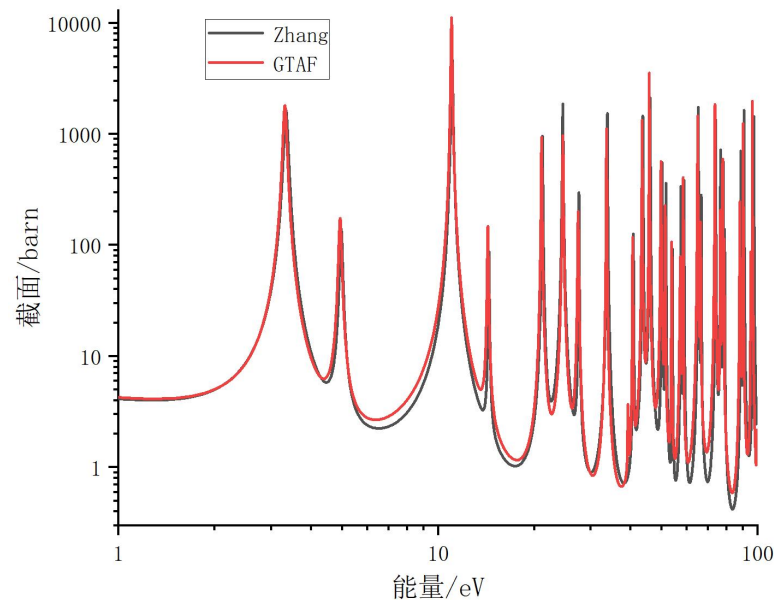
共振参数分析

4、共振参数分析

SAMMY程序拟合结果--¹⁵⁹Tb



SAMMY拟合结果(产额)



SAMMY拟合截面
与EXFOR结果对比

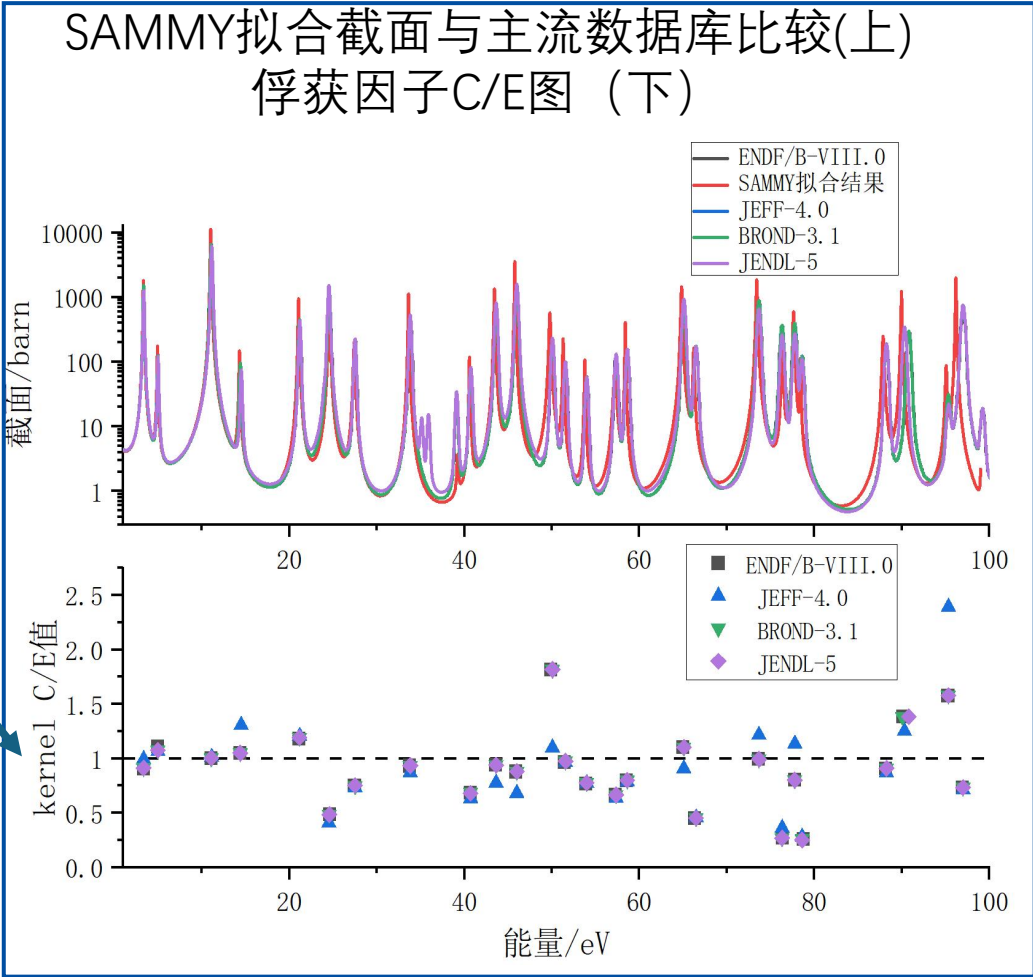
湖南稀土金属材料研究院 产品分析检测结果报告单			
产品名称：	金属铈	分析日期：	2023.11.17
分析编号：	JSS20231117-1	送样单位：	稀土金属研究所
规格：		备注：	
分析结果：			
RE	>99.5 (%)	Tb/RE	>99.9 (%)
La	4.16 (ug/g)	Si	0.033 (%)
Ce	4.27 (ug/g)	Ca	0.049 (%)
Pr	3.48 (ug/g)	Fe	0.066 (%)
Nd	3.26 (ug/g)	Al	0.018 (%)
Sm	3.13 (ug/g)	Ni	0.014 (%)
Eu	4.87 (ug/g)	/	/
Gd	18.96 (ug/g)	/	/
Tb	基体	/	/
Dy	33.56 (ug/g)	/	/
Ho	4.13 (ug/g)	/	/
Er	3.74 (ug/g)	/	/
Tm	2.73 (ug/g)	/	/
Yb	1.89 (ug/g)	/	/
Lu	2.19 (ug/g)	/	/
Y	2.49 (ug/g)	/	/

样品成分含量

经过对样品中杂质核素的分析及与¹⁹⁷Au的对比可知：18.7eV处可能存在未收录共振峰，30.5eV处可能由统计引起，83.5eV可能为¹³⁵Ba贡献。

4、共振参数分析

SAMMY程序拟合结果--¹⁵⁹Tb



俘获因子

$$K = g \frac{\Gamma_n \Gamma_\gamma}{\Gamma_n + \Gamma_\gamma}$$

ENDF/B-VIII.0				GTAF			
E_n (eV)	Γ_n (meV)	Γ_γ (meV)	K (meV)	E_n (eV)	Γ_n (meV)	Γ_γ (meV)	K (meV)
3.339	0.37	89	0.23	3.32 ± 0.07	0.34 ± 0.002	92.01 ± 0.51	0.209 ± 0.0010
4.98	0.08	97	0.03	4.95 ± 0.09	0.09 ± 0.001	103.67 ± 1.40	0.0333 ± 0.0004
11.07	7.84	90	4.51	11.04 ± 0.10	7.87 ± 0.035	89.03 ± 0.416	4.52 ± 0.0189
14.4	0.14	97	0.09	14.35 ± 0.13	0.15 ± 0.002	119.70 ± 2.61	0.0944 ± 0.0015
21.17	1.95	96	0.72	21.12 ± 0.16	2.32 ± 0.022	111.45 ± 1.17	0.852 ± 0.0095
24.55	4.48	102	2.68	24.64 ± 0.18	2.12 ± 0.025	142.39 ± 1.93	1.30 ± 0.0312
27.51	0.82	102	0.51	27.45 ± 0.22	1.03 ± 0.014	183.93 ± 2.89	0.384 ± 0.0067
33.81	4.13	98	1.49	33.73 ± 0.18	3.85 ± 0.039	93.81 ± 1.18	1.39 ± 0.0127
40.72	0.79	101	0.29	40.67 ± 0.27	0.53 ± 0.012	110.19 ± 5.60	0.199 ± 0.0030
43.63	4.72	98	2.81	43.55 ± 0.20	4.38 ± 0.073	116.23 ± 2.83	2.64 ± 0.0443
45.99	10.96	93	6.13	45.89 ± 0.19	9.69 ± 0.134	78.01 ± 1.85	5.39 ± 0.0799
50.06	1.84	97	1.13	49.90 ± 0.27	3.34 ± 0.048	188.53 ± 4.30	2.05 ± 0.0116
51.55	1.40	96	0.52	51.45 ± 0.22	1.36 ± 0.029	113.83 ± 5.04	0.502 ± 0.0105
53.98	0.50	78	0.31	53.89 ± 0.24	0.38 ± 0.009	109.72 ± 5.12	0.238 ± 0.0043
57.34	2.07	99	0.77	57.27 ± 0.33	1.37 ± 0.035	303.23 ± 11.6	0.514 ± 0.0087
58.63	1.57	96	0.96	58.54 ± 0.23	1.34 ± 0.025	84.41 ± 3.78	0.765 ± 0.0120
65.08	9.12	93	5.20	64.96 ± 0.29	9.78 ± 0.158	151.12 ± 2.65	5.74 ± 0.101
66.48	3.60	98	1.30	66.33 ± 0.23	0.38 ± 0.040	147.58 ± 7.80	0.589 ± 0.0069
73.66	14.4	94	7.80	73.58 ± 0.28	13.7 ± 0.222	137.17 ± 2.88	7.76 ± 0.130
76.3	9.87	93	3.35	76.36 ± 0.37	2.45 ± 0.0781	151.66 ± 11.1	0.904 ± 0.0351
77.75	6.24	95	3.66	77.73 ± 0.31	4.83 ± 0.108	163.52 ± 5.02	2.94 ± 0.0498
78.6	2.93	85	1.06	78.71 ± 0.20	0.74 ± 0.0297	86.02 ± 7.81	0.276 ± 0.0150
88.24	3.20	83	1.93	88.13 ± 0.39	2.84 ± 0.0742	212.49 ± 7.28	1.75 ± 0.0367
90.8	10.53	106	3.59	90.14 ± 0.28	15.2 ± 0.272	102.46 ± 2.96	4.97 ± 0.124
95.31	0.54	97	0.34	95.28 ± 0.23	0.86 ± 0.0361	179.47 ± 12.0	0.535 ± 0.0355
97	37.33	97	10.11	96.94 ± 0.25	26.7 ± 0.533	76.15 ± 2.24	7.41 ± 0.101

- 通过与各评价库的截面对比及共振参数 C/E 值的对比可知：实验结果与评价库在主要共振处总体一致，其中ENDF/B-VIII.0在多个共振峰处更接近1，相对符合较好。
- 右图为1-100eV实验共振参数与ENDF/B-VIII.0对比。

05

总结与展望

总结

本工作的主要内容如下：

- (1) 利用装置测量了 ^{159}Tb 和的中子辐射俘获反应截面，完善数据处理流程，分析并扣除了实验本底，获得了产额和截面。
- (2) 使用SAMMY程序对实验结果进行了共振参数拟合，提取1–100 eV 共振参数并与评价库比较。

针对实验的数据处理和分析中存在的不足，可以进行如下改进：

尽量消除 GTAF实验数据与评价数据的系统性偏差，同时利用双束团解谱更好的拆解相距较近的共振峰。

针对散裂中子源Back-n束线，研究在双束团的条件下的RPI分辨率函数，并尝试将得到的函数写入程序中，以提升共振参数的精度。

更加精细化不确定度的计算并通过探测效率修正等提高截面结果及SAMMY拟合结果的精度。

谢谢！ 敬请各位老师批评指正！