SARI&USC中子俘获截面实验研究进展

李鑫祥，罗文，冯松，黎先锴，陈雅菊 等

南华大学 核科学技术学院

王宏伟，范功涛，刘龙祥，张岳，郝子锐 等

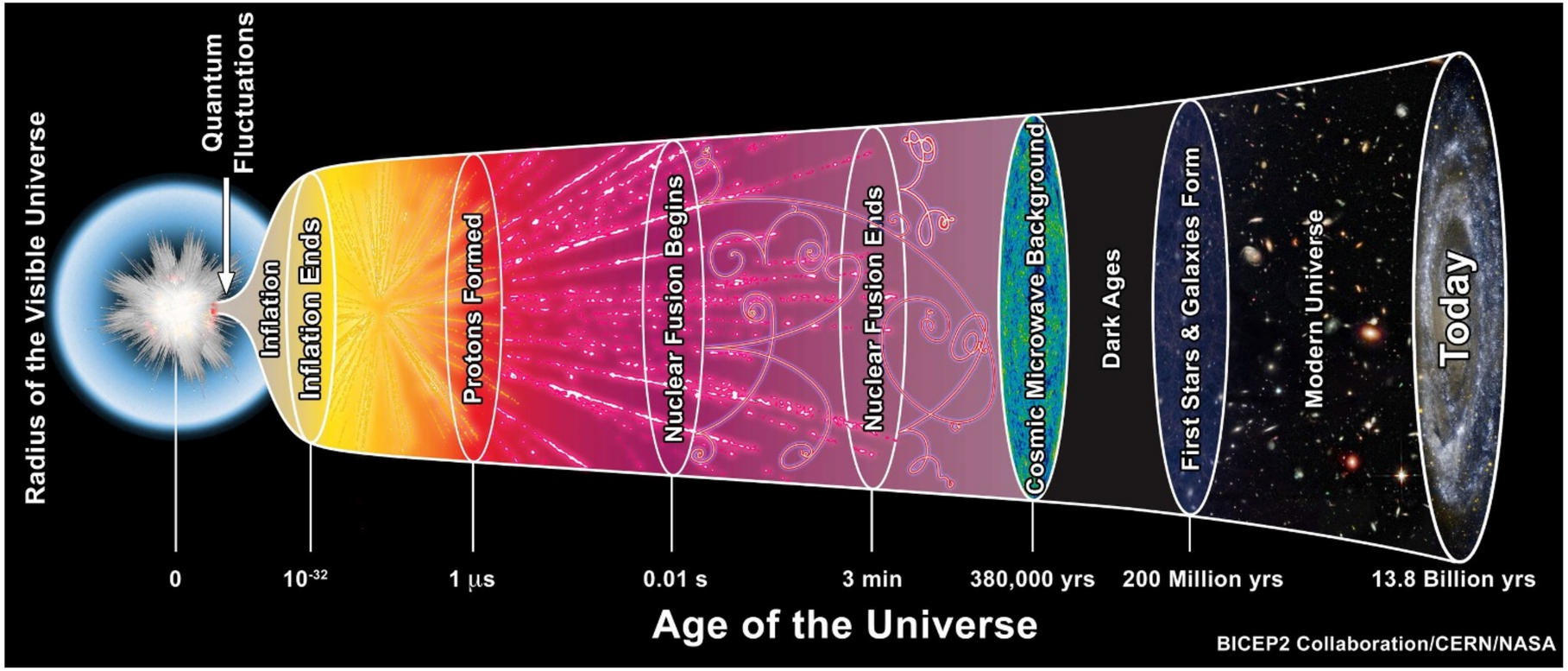
中国科学院上海高等研究院

目录

1、研究背景与意义
2、SARI&USC中子俘获截面实验研究进展
3、总结与展望

核物理与核天体物理：重元素产生机制

探究宇宙中元素起源一直是天体物理学的一个重要方向。

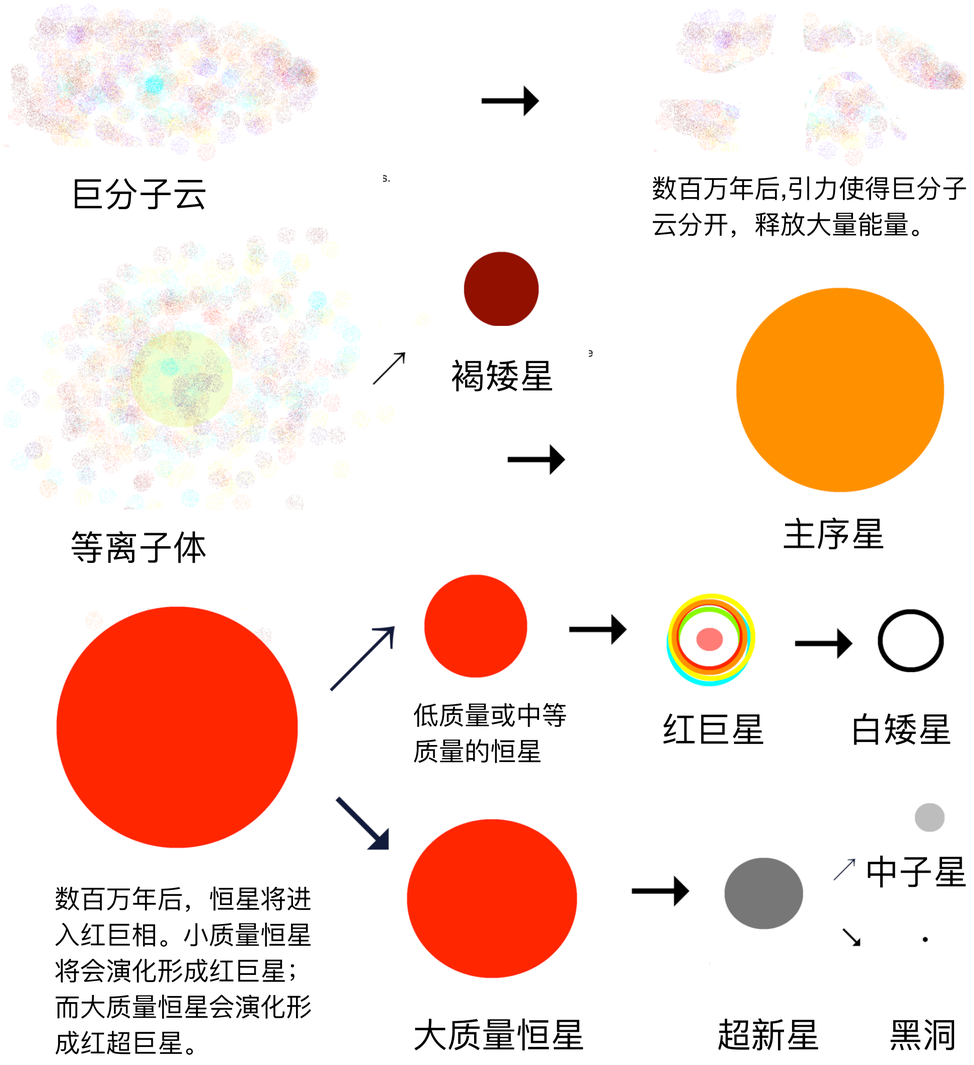


基于大爆炸理论的宇宙演化模型可以解释轻元素(如 H、He、Li 等)的形成。

(Battino 等, 2022)

目前公认的理论表明，宇宙起源于138亿年前的一次大爆炸。

核物理与核天体物理：重元素产生机制



恒星的演化&恒星中核燃烧过程

从碳到铁的元素的起源可以很好地由恒星中的核燃烧过程解释。

两个因素导致了恒星中的核燃烧过程无法产生比铁更重的元素：

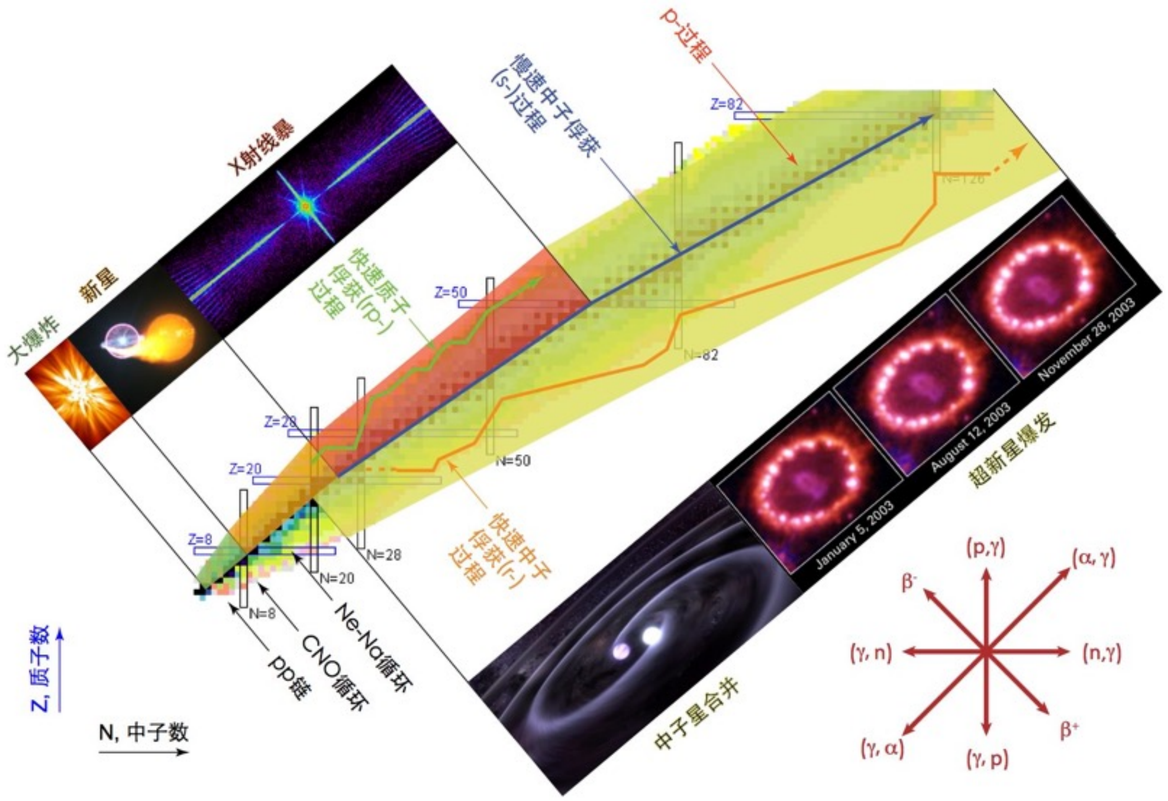
1. 库伦位垒；
2. 比结合能；

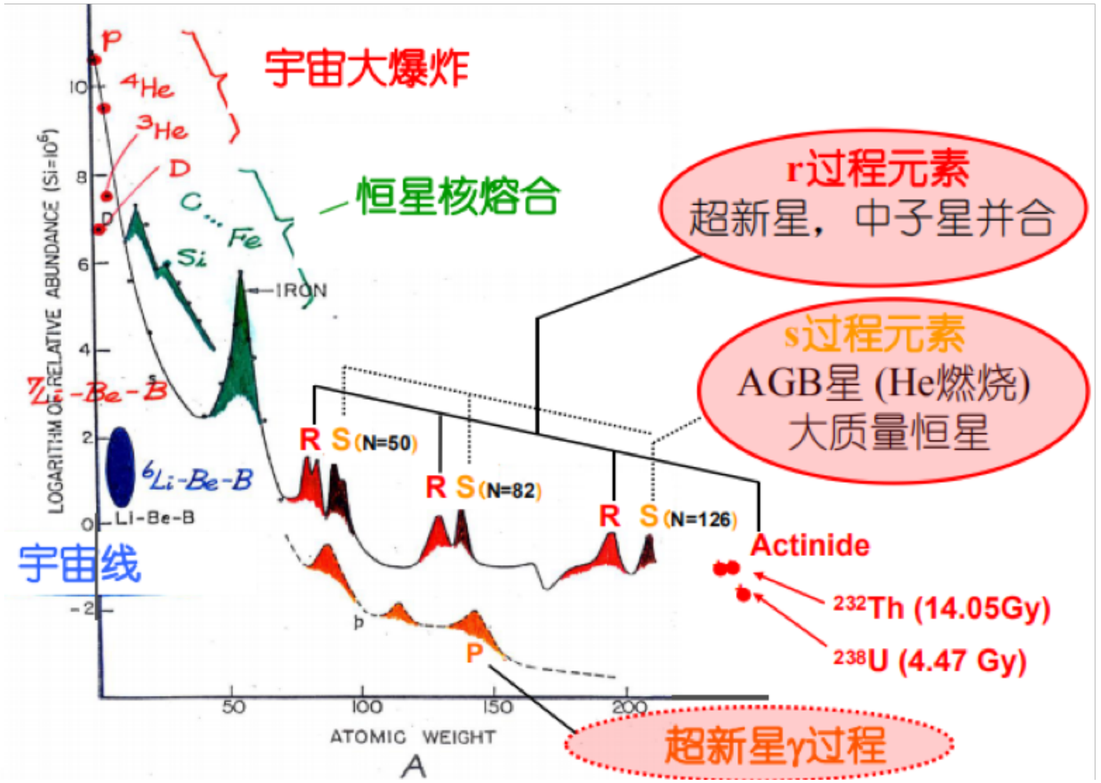
核物理与核天体物理：重元素产生机制

宇宙中比铁重的元素是如何产生的?

21世纪物理学未解之谜

关键科学问题：重元素起源

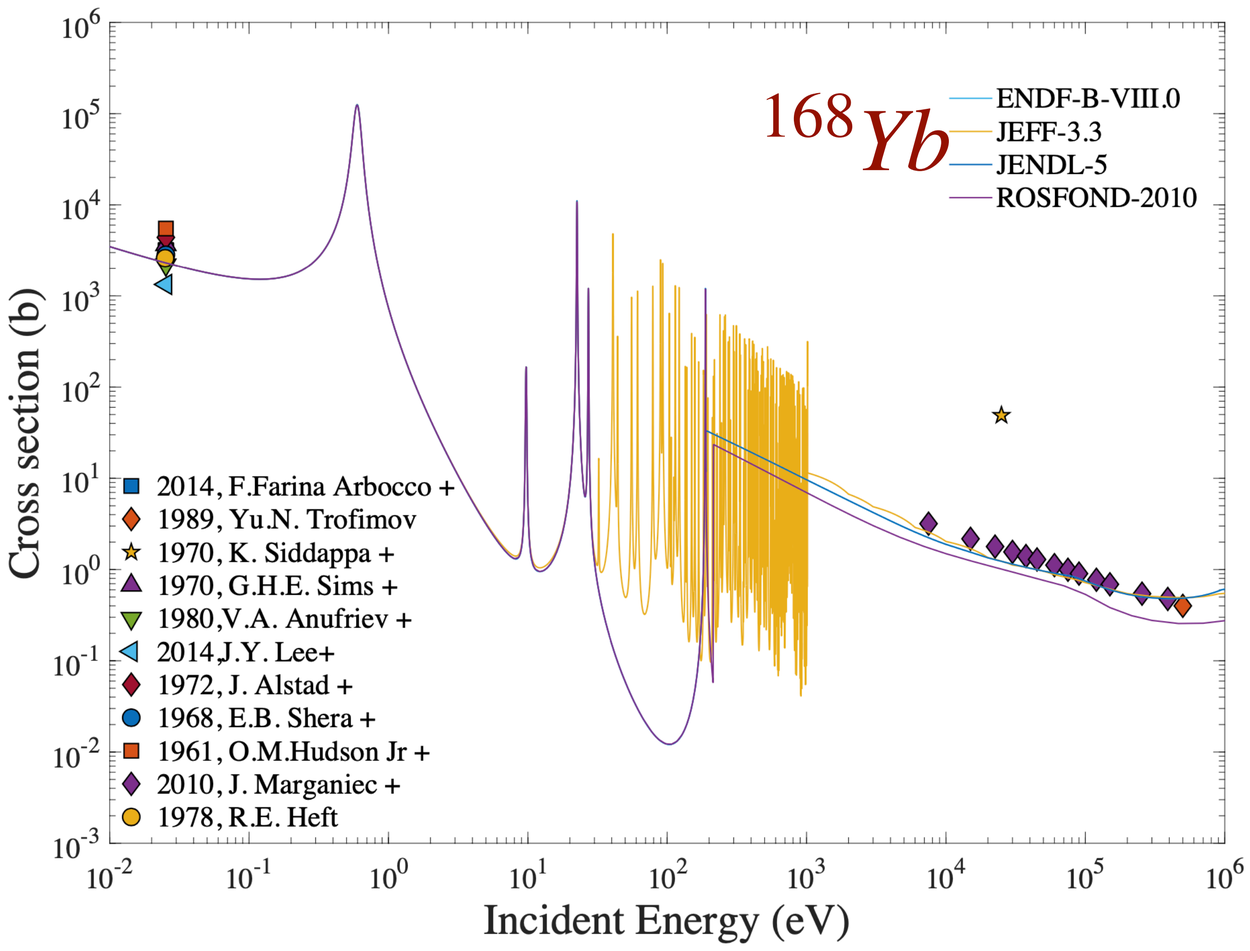




中子俘获反应，是宇宙中比铁重的元素合成的主要途径。重元素的中子俘获反应截面作为核天体网络计算的关键的输入量，对理解宇宙演化和宇宙中重元素合成具有重要意义。

核数据需求：更高的精度和更宽的能区

国内外研究现状：评价数据分歧大，中国库数据缺失！



1. 目前，^{168}Yb(n,γ)反应在共振能区的实验数据相当缺乏，**现有的实验数据甚至不能完整描述一个共振峰**，数据的数量和质量都有待提升。
2. 目前主流的国际核评价数据库中，只有ENDF/B-VIII.0、JEFF-3.3、JENDL-5以及ROSFOND收录了^{168}Yb(n, γ)反应的数据。且**不同的评价数据库也存在明显的分歧，亟待高精度实验数据的澄清。**
3. **中国的核评价数据库CENDL-3.2仍未包含^{168}Yb的中子俘获截面数据，急需国内相关实验工作的开展。**

SLEGS组在Back-n装置开展的中子俘获截面实验研究情况

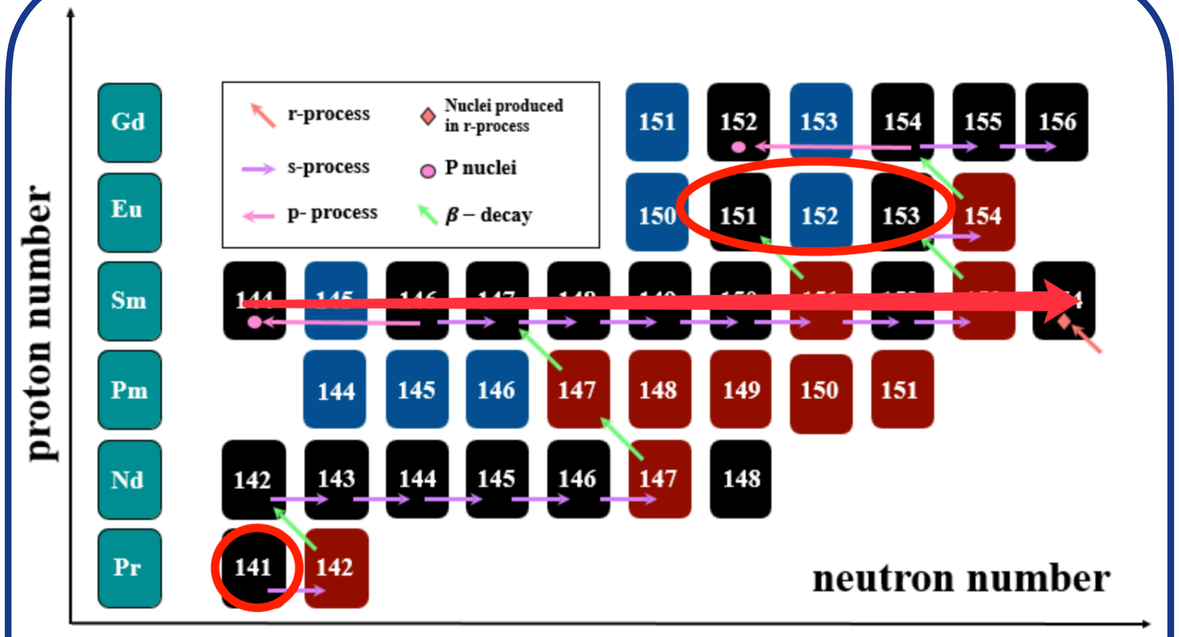
SLEGS组在Back-n束线站开展中子俘获截面实验研究情况（截至2023年9月）

时间	目标靶材料	靶直径 (mm)	厚度 (mm)	束流功率 (kW)	结果发表
2019.01	Au-197	50.0	1.0	~34	NST（2021）
	Se-nat	50.0	2.0		CPB（2022）
	Y-89	50.0	1.0		正在处理中
2019.05	Au-197	30.0	1.0	~50	核技术（2020）
	Er-nat	50.0	1.0		PRC（2021，2022）
	Sm-nat	50.0	1.0		正在处理中（预计2023-2024年发表）
2020.01	Cu-63	30.0	0.1	~80	处理结果显示：不能有效提取相关物理信息
	Cu-65	30.0	0.1		
2021.04	Ag-107	30.0	0.1	~100	CPB（2022）
	Ag-109	30.0	0.1		综合分析中（预计2024年发表）
2022.07	Ag-nat	30.0	0.1	~ 150	
2022.11	Yb-nat	30.0	0.1	~ 150	正在处理中（预计2024年发表）

中科院上海高等研究院SLEGS组为Back-n束线站早期用户，国内较早开展的宽能区中子俘获截面实验研究。

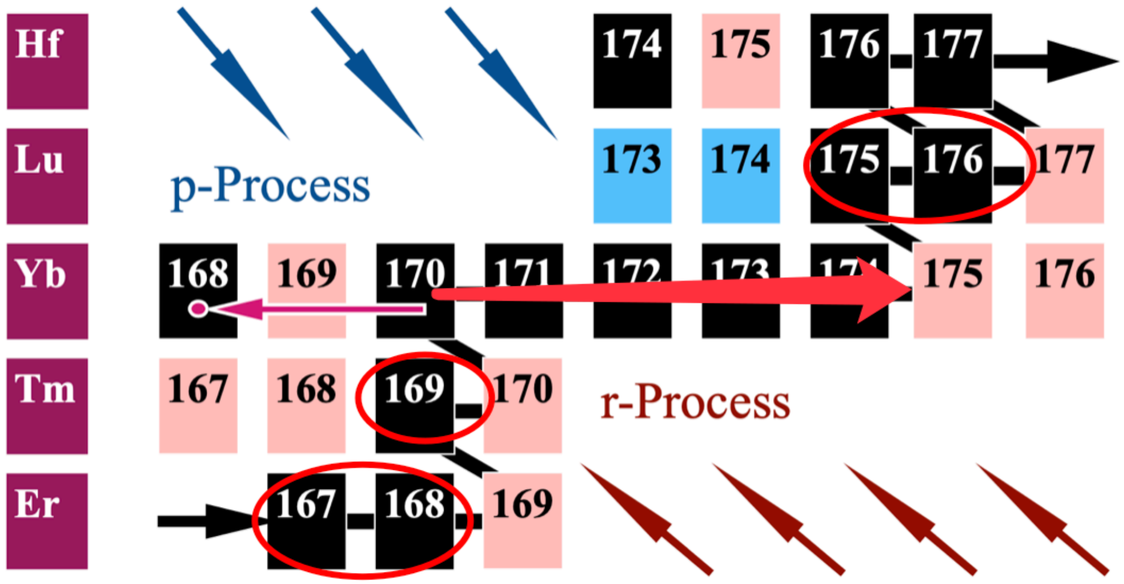
南华大学中子俘获截面实验方向继承于SLEGS组，结合学院和课题组发展方向，与现有的实验基础相融合。

SLEGS组在Back-n装置开展的中子俘获截面实验研究情况



2019年已完成天然Sm靶中子俘获实验工作，预期2023年完成实验数据分析，之后补充Nd实验数据，可以完整获得Pr-Eu s过程路径中稳定核素的中子俘获截面，之后可开展该路径的天体演化模拟工作；

从Er到Lu的s过程路径中，所有核的俘获截面实验数据均可得，可以开展该段路径的天体演化模拟工作；



系列工作具有系统性和延续性

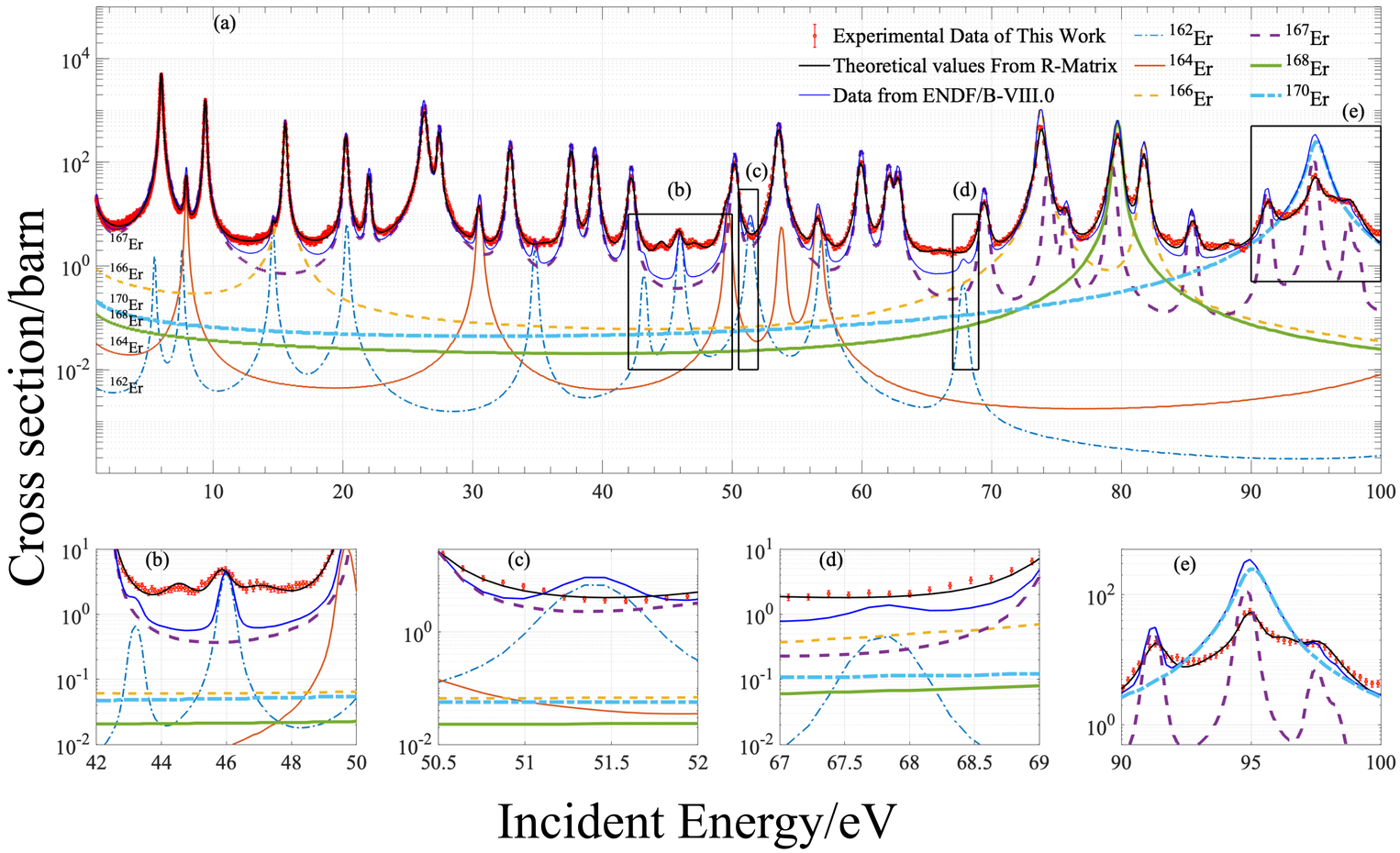
目录

1、研究背景与意义

2、SARI&USC中子俘获截面实验研究进展

3、总结与展望

2022-2023主要工作1:实验数据分析方法研究

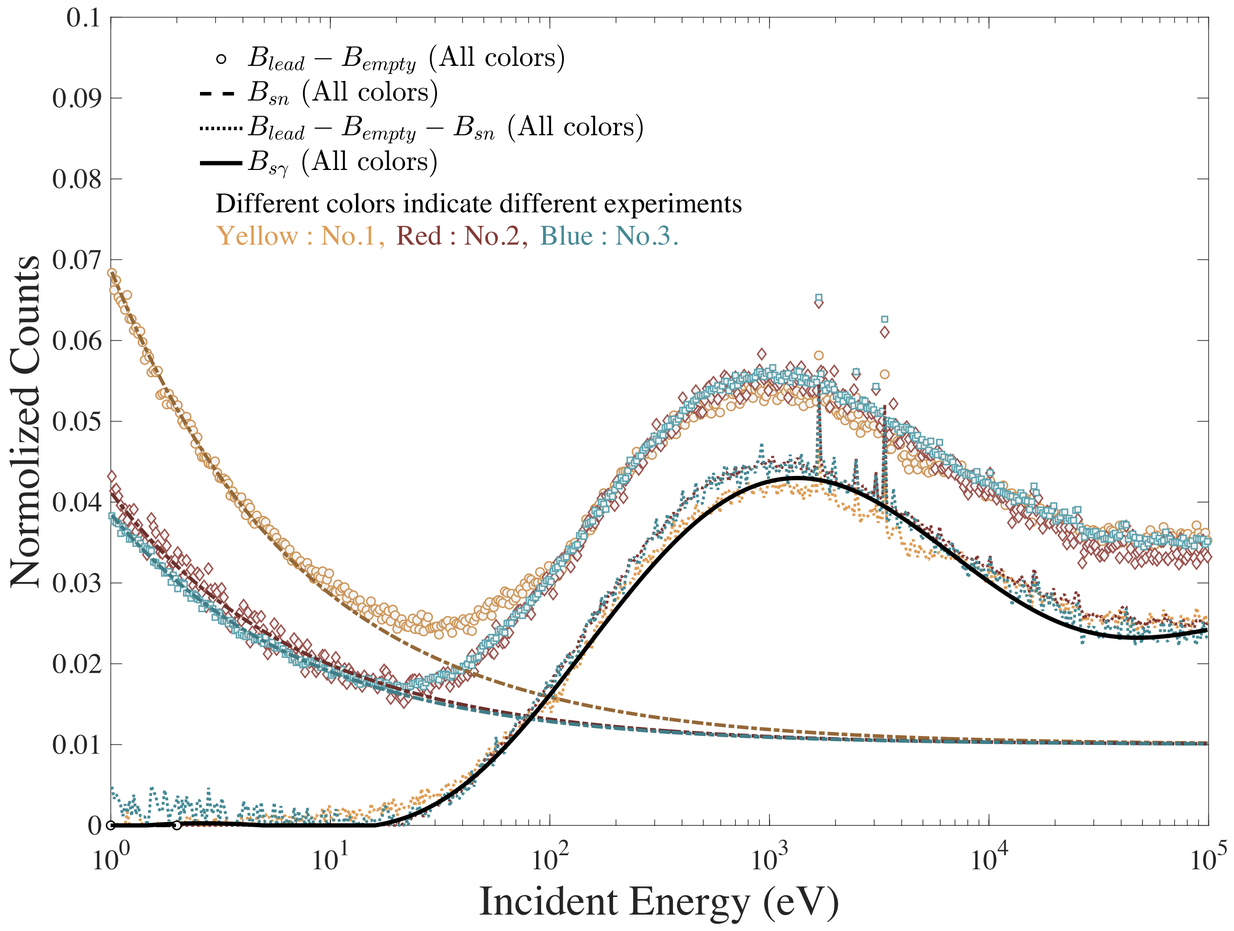


1. 早期实验本底测量不完整，实验方案不成熟导致2021年发表的^{nat}Er(n,g)数据存在缺陷;
2. 未找到^{162}Er同位素贡献的51.4 eV & 67.8 eV 处的中子俘获共振峰，推测是被本底淹没;

X.X. Li et al., Phys. Rev. C. 104.054302 (2021)

2022-2023主要工作1:实验数据分析方法研究

束内伽马射线形状（定性）



- 束内伽马本底来源：

1. 散裂反应产生的瞬发伽马射线；
2. 散裂产物衰变产生的缓发伽马射线；

- 两次不同实验的变量：

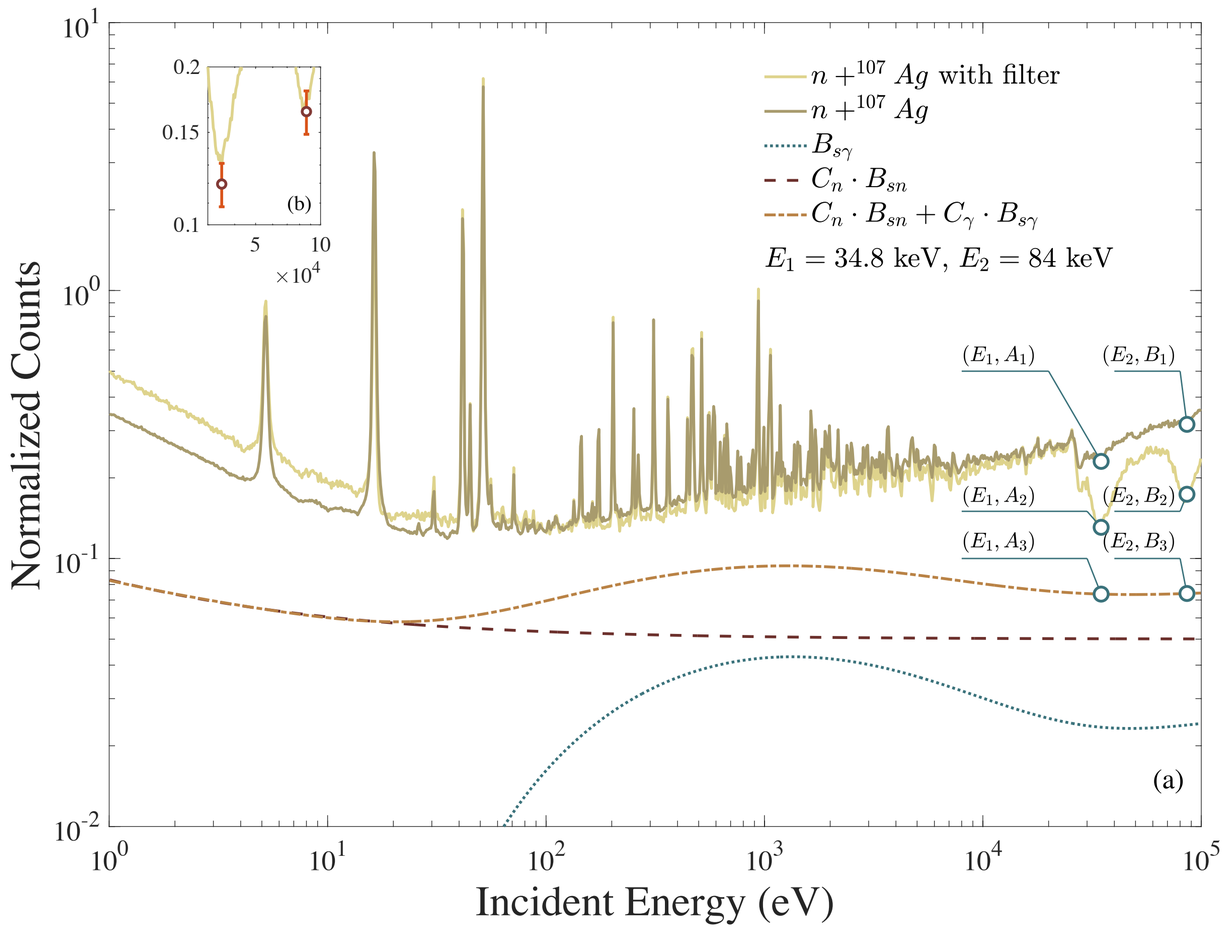
1. 加速器功率变化导致的中子通量和束内伽马射线通量的变化；
2. 为了特定实验目的而对束线进行的干涉，如吸收片放置；

时间	靶材料	直径 (mm)	厚度 (mm)	备注	束流功率 (kW)	鸣谢
2020.08	Pb-nat	30.0	0.5	中子束窗处放置 Co-59吸收片	~80	内蒙民大
	Empty	-				
2020.10	Pb-nat	40.0	1.0		~100	中山大学
	Empty	-				
2021.04	Pb-nat	30.0	0.1		~100	上海高研院
	Empty	-				

X.X. Li et al.,Phys. Rev. C. 106.065804. (2022)

2022-2023主要工作1:实验数据分析方法研究

束内伽马射线刻度（定量）



- **使用Geant4模拟完成吸收片刻度过程的可行性**

A1（实验）:中子+伽马打靶（^{107}Ag）后C_6D_6的结果；

A2（实验）：伽马打靶（^{107}Ag）后C_6D_6的结果；

A1’（模拟）：中子+伽马打靶（^{107}Ag）后C_6D_6的结果；

A2’（模拟）：伽马打靶（^{107}Ag）后C_6D_6的结果；

假设：实验和模拟中，中子和伽马的反应是稳定的。

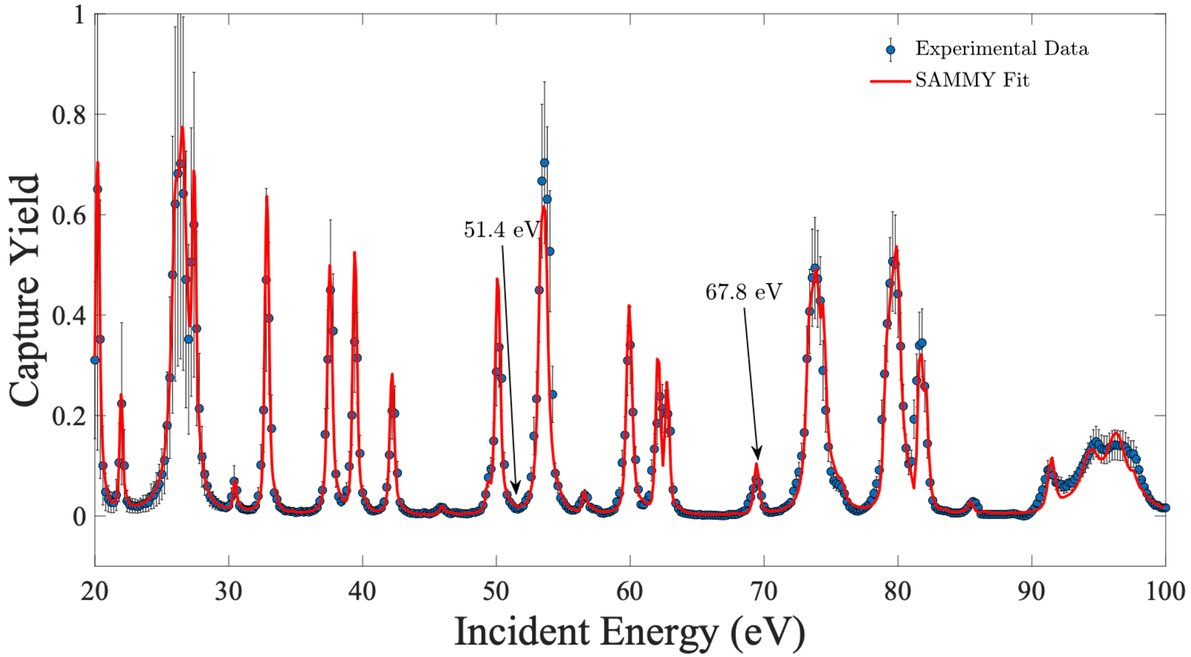
记 $A_1/A_2 = C_1$，$A_1'/A_2' = C_2$。C_1, C_2与能量和靶有关，但是C_1/C_2只表征了模拟和实验的差别。

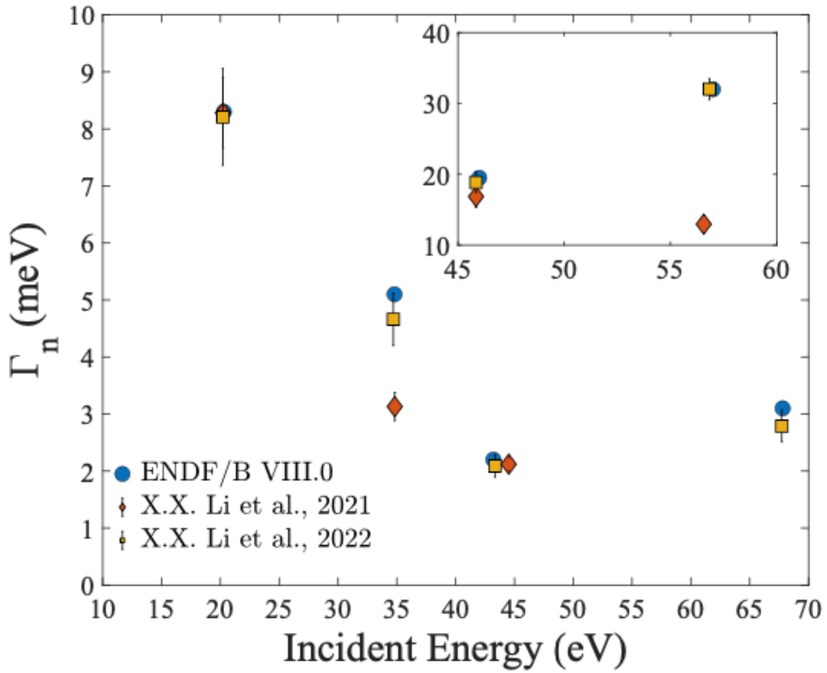
可以用实验结果刻度C_1/C_2的值。

X.X. Li et al.,Phys. Rev. C. 106.065804. (2022)

2022-2023主要工作1:实验数据分析方法研究

1. 提出用实验确定束内伽马射线本底形状（定性），模拟确定束内伽马本底通量（定量）的方法。
2. 使用该方法找到Er-162同位素贡献的67.8 eV 处的中子俘获共振峰，并提取了共振参数。
3. 数据质量相对2021年的结果（X.X. Li et al., Phys. Rev. C. 104.054302 (2021)）有明显改善；





natEr中子俘获截面数据再处理

X.X. Li et al.,Phys. Rev. C. 106.065804. (2022)

2022-2023主要工作1:实验数据分析方法研究

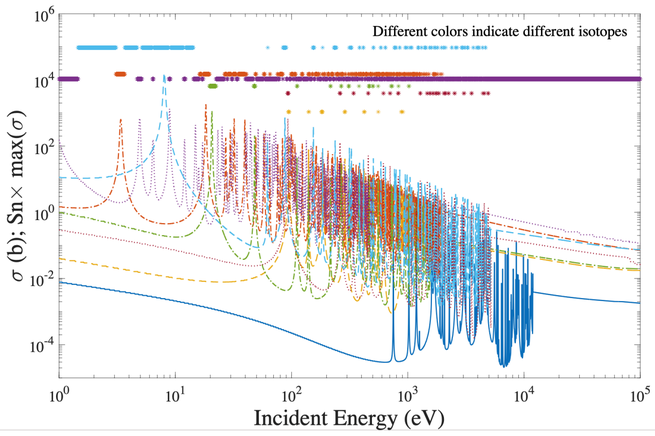
SLEGS组在Back-n束线站开展中子俘获截面实验研究情况（截至2023年6月）

时间	目标靶材料	靶直径 (mm)	厚度 (mm)	束流功率 (kW)	结果发表
2019.01	Au-197	50.0	1.0	~34	NST（2021）
	Se-nat	50.0	2.0		CPB（2022）
	Y-89	50.0	1.0		-
2019.05	Au-197	30.0	1.0	~50	核技术（2020）
	Er-nat	50.0	1.0		PRC（2021，2022）
	Sm-nat	50.0	1.0		-

使用上述方法对早期（2020年以前）的实验数据进行再处理；

成都理工大学胡新荣博士工作

本人目前工作



Sm中子俘获截面实验数据再处理

- 考虑到天然靶不同的共振峰其实是由不同的同位素贡献，因此，取用该共振峰能量下贡献最大的同位素的中子结合能S_n(isotope)作为天然靶的中子结合能S_n(natural)。

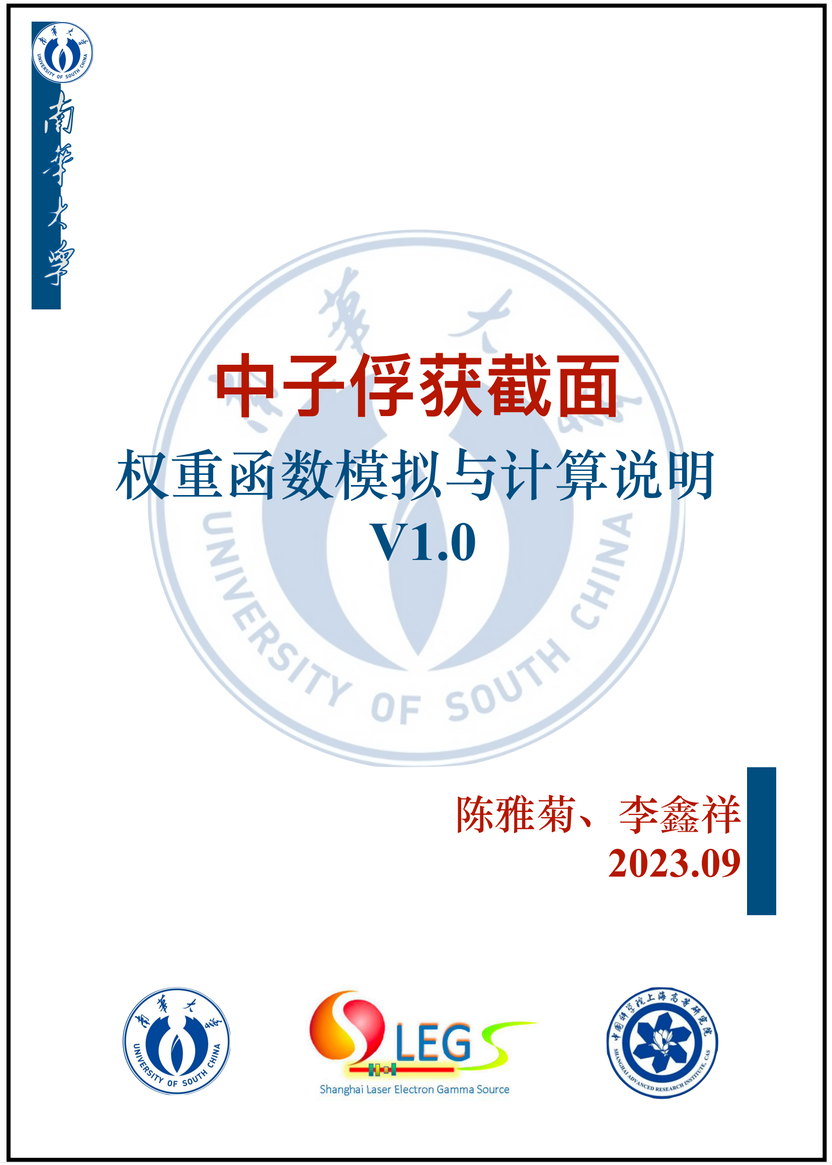
X.X. Li et al.,preparing (2023)

2022-2023主要工作2:实验数据与程序共享平台搭建

搭建了Synology数据存储服务器，用于协作处理实验数据，共享数据及程序资源等…

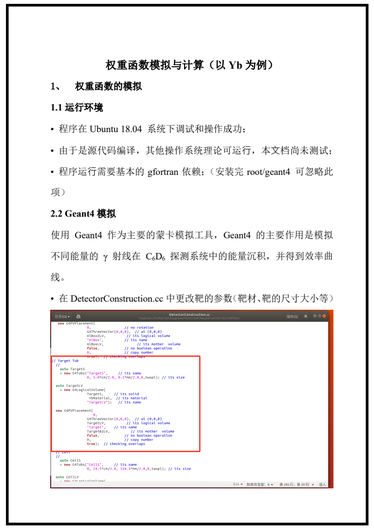
服务器地址：
http://QuickConnect.cn/Lixinx
访客账户：Usc1958
密码：Usc@1958

2022-2023主要工作2:实验数据与程序共享平台搭建



权重函数模拟与计算说明V1.0

- 共享了我们在权重函数的模拟与分析过程中的程序；
- 以Yb数据分析为例，撰写了程序使用说明；



权重函数模拟与计算（以 Yb 为例）

1、 权重函数的模拟

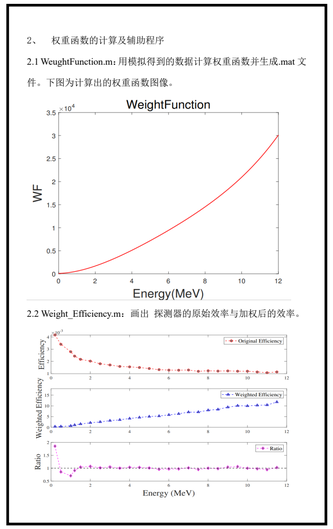
1.1 运行环境

- 程序在 Ubuntu 18.04 系统下调试和操作成功；
- 由于是源代码编译，其他操作系统理论可运行，本文档尚未测试；
- 程序运行需要基本的 gfortran 依赖；（安装完 root/geant4 可忽略此项）

2.2 Geant4 模拟

使用 Geant4 作为主要的蒙卡模拟工具，Geant4 的主要作用是模拟不同能量的 γ 射线在 C_6D_6 探测系统中的能量沉积，并得到效率曲线。

- 在 DetectorConstruction.cc 中更改靶的参数（靶材、靶的尺寸大小等）



2、 权重函数的计算及辅助程序

2.1 WeughtFunction.m：用模拟得到的数据计算权重函数并生成.mat 文件。下图为计算出的权重函数图像。

2.2 Weight_Efficiency.m：画出 探测器的原始效率与加权后的效率。

目前应用：

中山大学
安振东团队
…

服务器路径：Public/Research/CSNS/Weight Function

2022-2023主要工作2:实验数据与程序共享平台搭建

SAMMY拟合程序&辅助程序说明V1.0 初稿

- 文档中报告了我们使用SAMMY拟合中子俘获截面实验结果的经验，以及为提高效率编写的辅助程序及其说明；
- 在使用SAMMY程序分析Er、Ag中子共振参数的过程中，我们深知实验和SAMMY拟合的复杂性，这需要合作组积极讨论，合作解决实验与数据分析中存在的一些细节和问题；
- 因此，我们也会及时整理并积极分享我们所取得的进展和相关的经验；
- 方便大家把更多的精力用在我们目前实验和数据分析尚未解决的难点上，希望能够更高效地处理这些难题，取得一些进展。

服务器路径：Public/Research/CSNS/A simple example for SAMMY

2022-2023主要工作2:实验数据与程序共享平台搭建

1. SAMMY安装

1.1 运行环境

- 程序在Ubuntu 18.04 系统下调试和操作成功；
- 由于是源代码编译，其他操作系统理论可运行，本文档尚未测试；
- 程序运行需要基本的gfortran依赖；（安装完root/geant4 可忽略此项）

1.2 安装步骤：

- 下载SAMMY-M6预编译包；（见1.3）
- 修改环境变量；（见1.4）
- 运行示例；（见1.5）

1.3 SAMMY- M6 预编译包下载：

链接: https://pan.baidu.com/s/1HXY9G2cNRC_Jr_I3V9E7Pg 密码: vjij

内含：

sammy6：SAMMY6 源代码；

samtry：SAMMY6自带示例；

tr001：调试示例；

1.4 修改环境变量：

示例：

```
export LD_LIBRARY_PATH=$ROOT/lib:$LD_LIBRARY_PATH
export PATH=$PATH:"/home/lixinxiang/save/sammy6/exe"
```

（注意：需根据自己的目录设置路径）

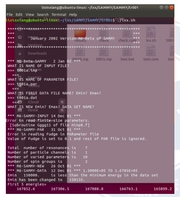
1.5 运行示例

运行tr001测试安装是否成功：

在tr001中打开终端：

```
>> chmod a+x lxx.sh
>> ./lxx.sh
```

正常结束，未报错，则说明安装成功。



1.6 SAMMY运行

在自定义SAMMY运行时，使用lxx.sh并修改相应的输入文件名即可；

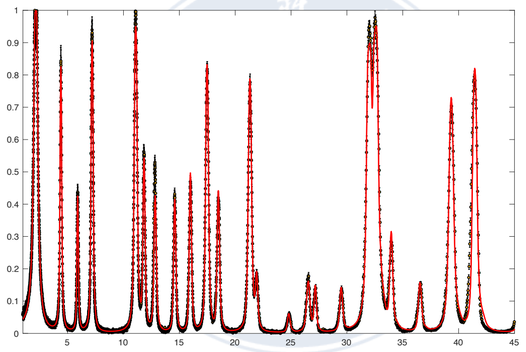
```
sammy <<EOF
t001a.inp
t001a.par
t001a.dat 150000,167852.
```


2.2 输出文件可视化

ReadData.m ： SAMMY输出的.lpt文件由ReadData.m 提供拟合值与实验值的对比。

*根据不同的lpt文件，提供两套para读取参数。目前拟合的样品中，（Er-nat,Sm-nat,Re-nat）均可用两套参数读取。不排除需要重新设置读取参数的情况。

下图展示 了Re-nat的初步拟合结果与实验值的比较，使用ReadData.m处理。



以上拟合结果显示在部分共振峰处的拟合效果还不是很完美，可以再迭代几次。

*由于只是中间结果的查看和检验，ReadData.m在绘图方面并未有太多讲究。需要用户对满意的结果另行绘制。

*程序通用化程度：★★★☆☆

2.3 从SAMMY输出文件中提取共振参数

saveSAMMY.m ： 对于ReadData.m显示的满意结果，用户可使用saveSAMMY.m提取并保存共振参数。所有共振参数被保存于SAMMY.mat中。

SAMMY.mat 以Matlab结构体的形式保存数据，分别为SAMMY_para与SAMMY_data两部分。

SAMMY_para 按自旋组保存共振参数，如下所示：

主要包括：质量数，自旋，轨道角动量，丰度，g因子，共振能量，共振参数及其不确定度。这些参数直接提取自lpt文件，可在发表文章时直接复制使用。

SAMMY_para{1, 1}

字段	值
Group	1
Mass	147
L	0
Spin	2
Aboundance	37.4000
g	0.4167
Energy	[4.3974;5.8994;1...
Gamma_g	[72.4030;71.243...
std_g	[2.0850;1.3190;1...
Gamma_n	[0.7540;0.3330;1...
std_n	[0.0146;0.0031;0...

SAMMY_data则是SAMMY拟合的产额值。即ReadData.m中显示的内容。用于用户调用绘图。

*程序按照通用化设计，对于不同的靶仍然有效。程序输入参数应与ReadData.m保持一致。

通用化程度：★★★★☆

目前应用：

中山大学 安振东团队

南华大学 冯松团队

…

服务器路径： Public/Research/CSNS/A simple example for SAMMY

2022-2023主要工作2:实验数据与程序共享平台搭建

编号	基本内容/功能	是否完成程序说明
1	SAMMY拟合	是
2	提取实验PH谱，用于加权	否
3	转数据程序（raw->root）	否
4	权重函数模拟与计算	是

目前已共享的程序清单

Ref文件夹内为程序相关文献，供参考

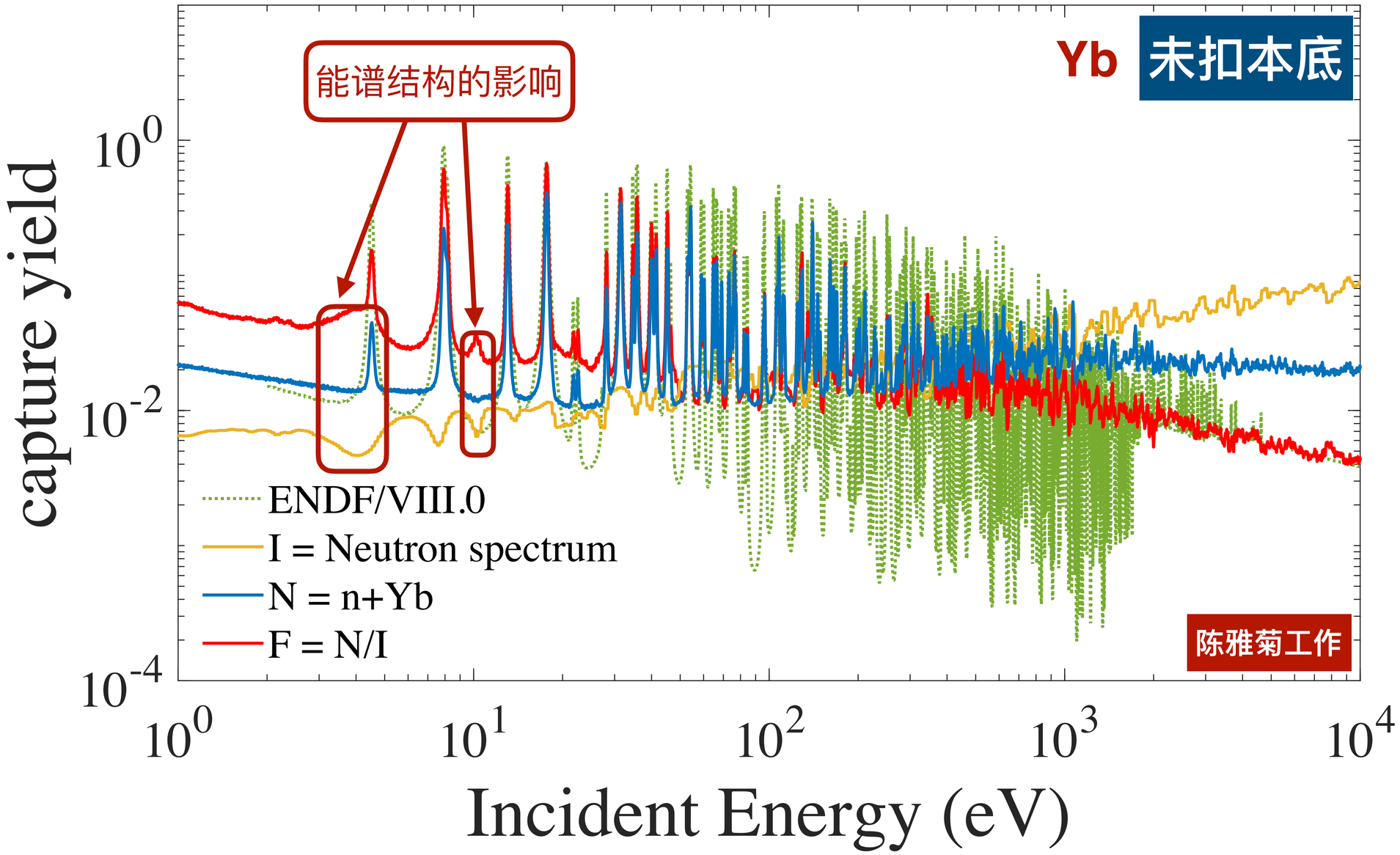
2022-2023主要工作3:Ag/Yb 实验开展&数据初步分析

时间	申请单位	实验负责人	目标靶材料	靶直径 (mm)	厚度 (mm)	束流功率（kW）
2022.07	中科院上海高等研究院	王宏伟	Ag-nat	30.0	0.1	~ 150
2022.11	南华大学	李鑫祥	Yb-nat	50.0	0.1/0.5	~ 150

2022年7月正值上海疫情，导致入莞困难。感谢Back-n团队帮助执行实验计划，使实验顺利完成！

2022年11月Yb中子俘获截面实验合影留念

2022-2023主要工作3:Ag/Yb 实验开展&数据初步分析



- 能谱存在峰谷结构，对Yb/Ag的数据分析影响不大；
- 但是对低截面靶的测量会带来较大影响；
- 此结果与2020年Cu的分析结果一致；

目录

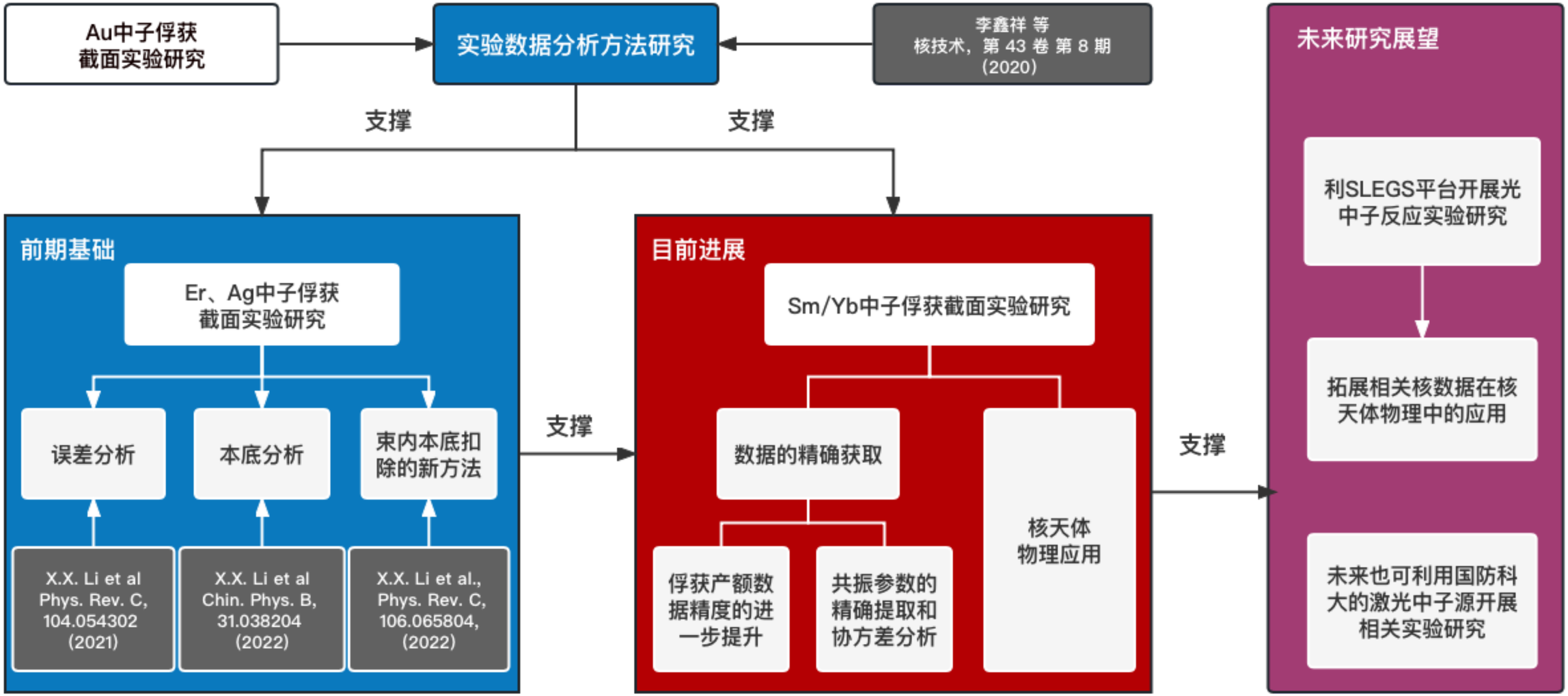
1、研究背景与意义
2、SARI&USC中子俘获截面实验研究进展
3、总结与展望

上海高研院&南华大学在中子俘获截面实验研究方向发表文章汇总

（截至2023年9月）

题目	期刊	年份	第一作者	通讯作者	第一作者单位
脉冲高度权重技术测量^{197}Au中子俘获截面	核技术	2020	李鑫祥	王宏伟	中科院上海应物所
Measurements of the ^{197}Au(n, γ) cross section up to 100 keV at the CSNS Back-n facility	Nucl. Sci. Tech.	2021	胡新荣	王宏伟、范功涛、刘龙祥	中科院上海应物所
New experimental measurement of ^{nat}Er(n,γ) cross sections between 1 and 100 eV	Phys. Rev. C	2021	李鑫祥	王宏伟、范功涛	中科院上海应物所
New experimental measurement of ^{nat}Se(n, γ) cross section between 1 eV to 1 keV at the CSNS Back-n facility	Chin. Phys. B	2022	胡新荣	王宏伟、范功涛、刘龙祥	中科院上海应物所
Measurements of the ^{107}Ag neutron capture cross sections with pulse height weighting technique at the CSNS Back-n facility	Chin. Phys. B	2022	李鑫祥	王宏伟、范功涛、刘龙祥	中科院上海应物所
Experimental determination of the neutron resonance peak of ^{162}Er at 67.8 eV	Phys. Rev. C	2022	李鑫祥	王宏伟、范功涛、刘龙祥	中科院上海高研院
Measurement of the ^{nat}Eu(n,γ) cross section up to 500 keV at the CSNS Back-n facility, and the stellar ^{151,153}Eu(n, γ) cross section at s-process temperatures	Eur. Phys. J. A	2022	黎先锴	安振东	南华大学
Measurement of the ^{141}Pr(n,γ) cross section up to stellar s-process temperatures at the China Spallation Neutron Source Back-n facility	Phys. Rev. C	2023	黎先锴	安振东、李鑫祥、朱志超	南华大学

已有的研究基础和未来的研究展望



合作研究

罗文、朱志超、冯松、袁赟、李鑫祥、黎先锴、陈雅菊、谢文、廖周济、薛洁明、李志才、罗凯军、曹宗威、施小明、彭宁馨 等

王宏伟、范功涛、刘龙祥、张岳、郝子锐

安振东、杨高乐

Back-n团队

张苏雅拉吐、王德鑫

任杰

何建军、苏俊、张立勇

刘应都

马春旺、王玉廷

陈金根、胡继峰、王小鹤、黄勃松

胡新荣

李欣雨

感谢您的聆听！

请大家批评指正！