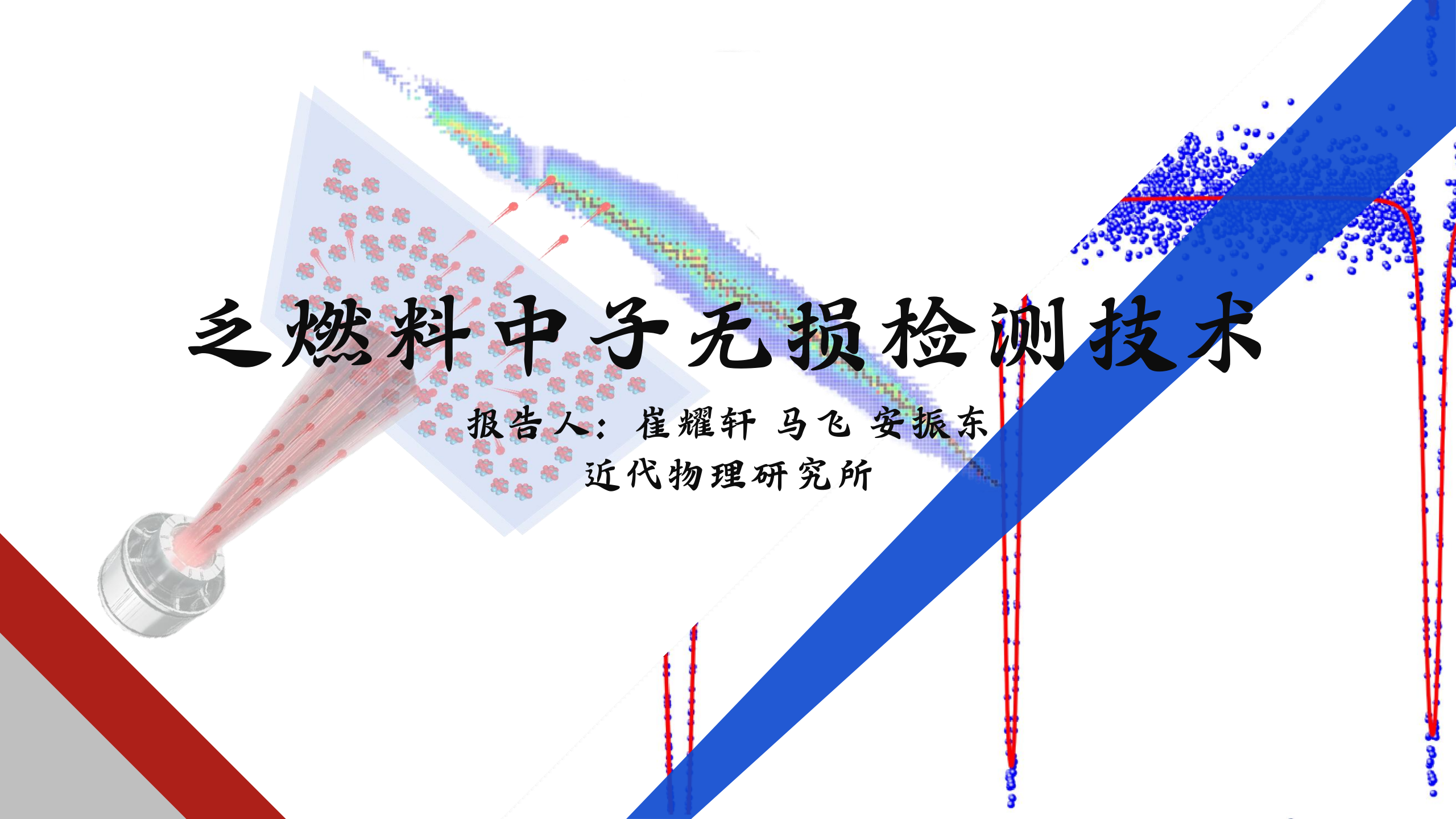




乏燃料中子无损检测技术

报告人：崔耀轩 马飞 安振东
近代物理研究所

目录

CONTENTS

01

研究背景与基本原理

02

研究目标与方法

03

实验结果与装置设计

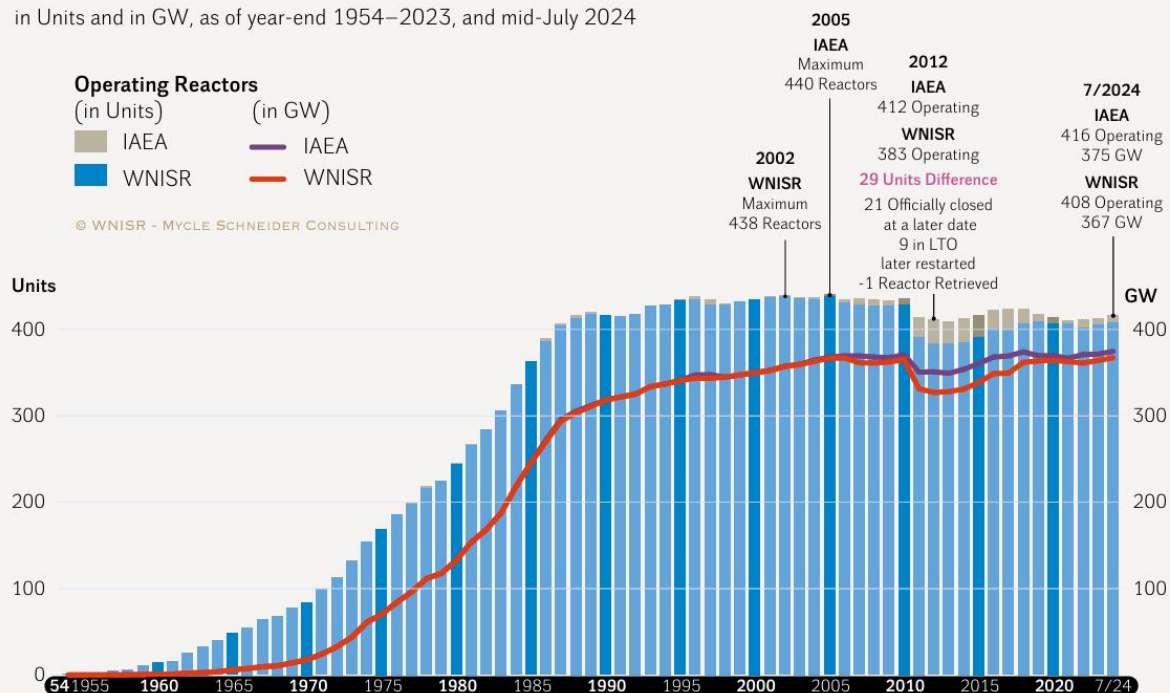
04

未来展望

研究背景

Nuclear Reactors in the World Officially Operational vs. WNISR Assessment

in Units and in GW, as of year-end 1954–2023, and mid-July 2024



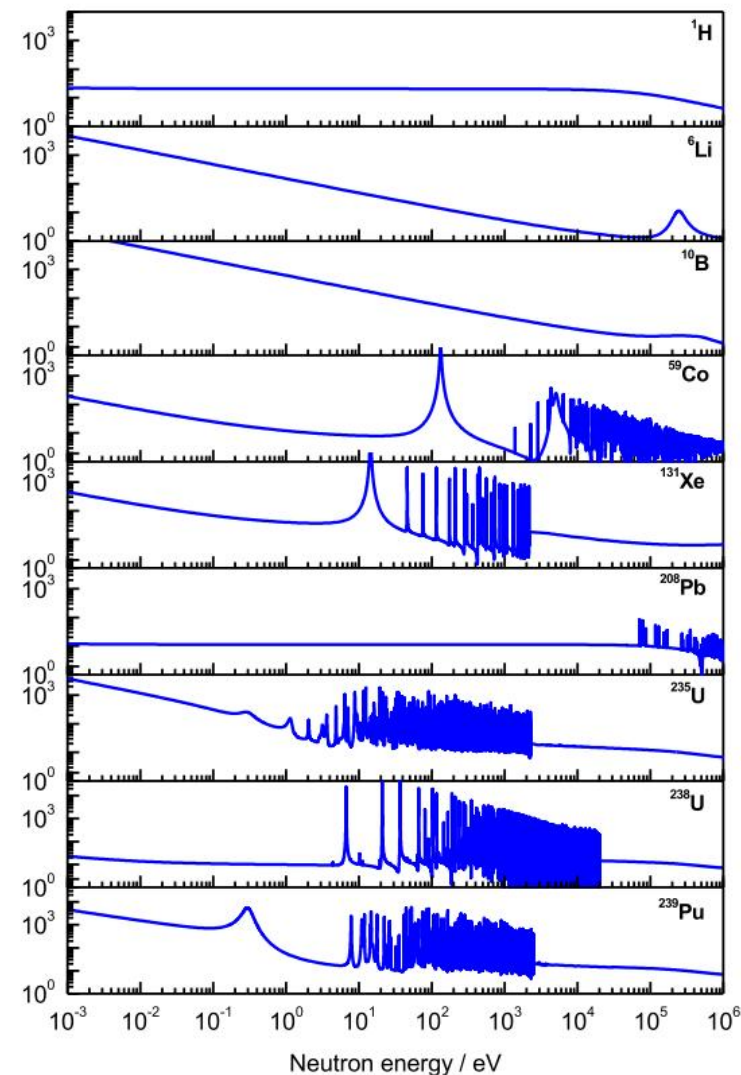
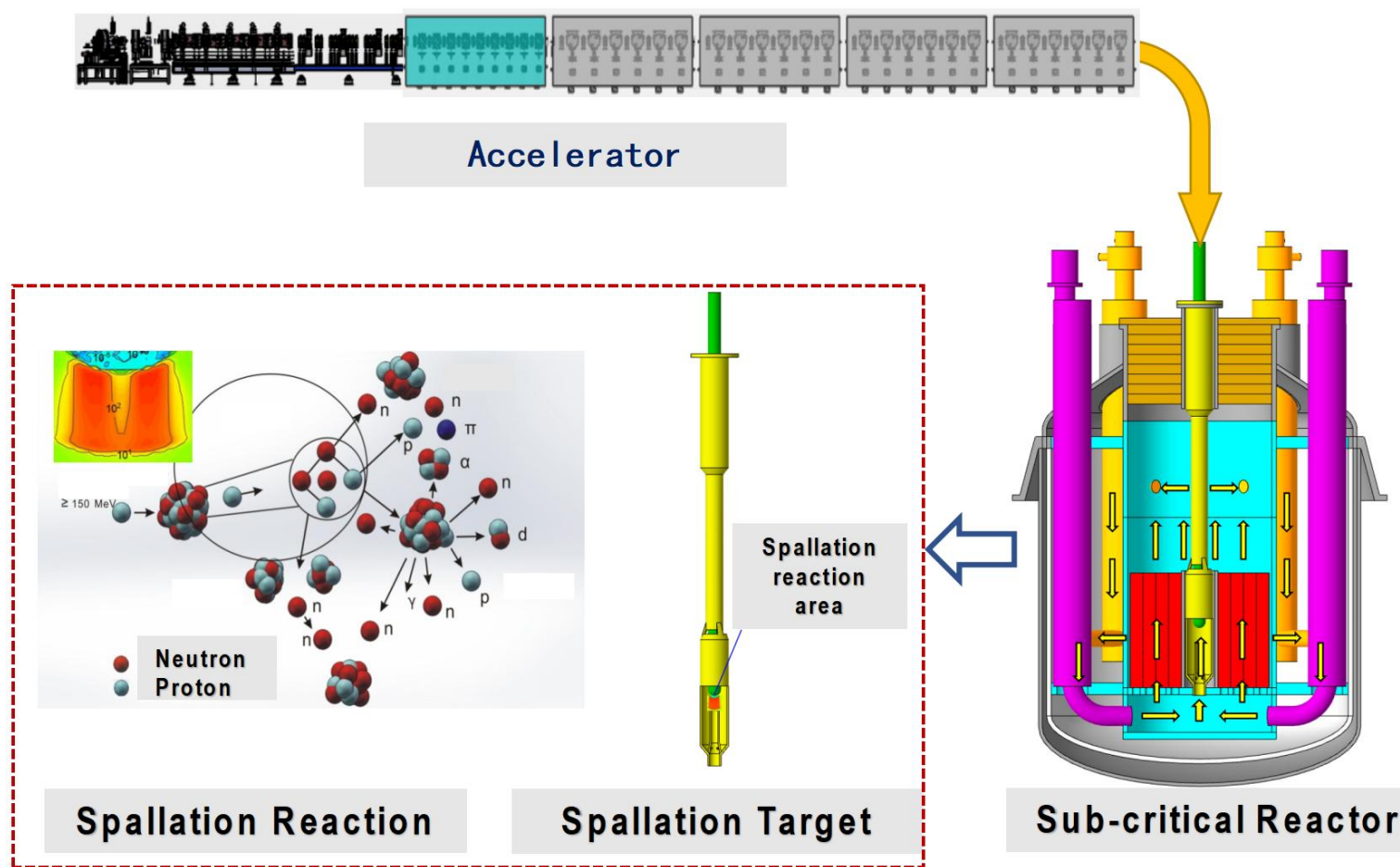
截止2024年7月统计数据显示，全球现役核电机组总装机容量已达375 GW。

其中中国核电装机容量突破53.15 GW大关，实现同比1.86%的稳健增长。其年度发电量攀升至433.25 TWh，在总电力结构中占比4.86%，相较于燃煤发电减少约427.8 Mt二氧化碳排放。



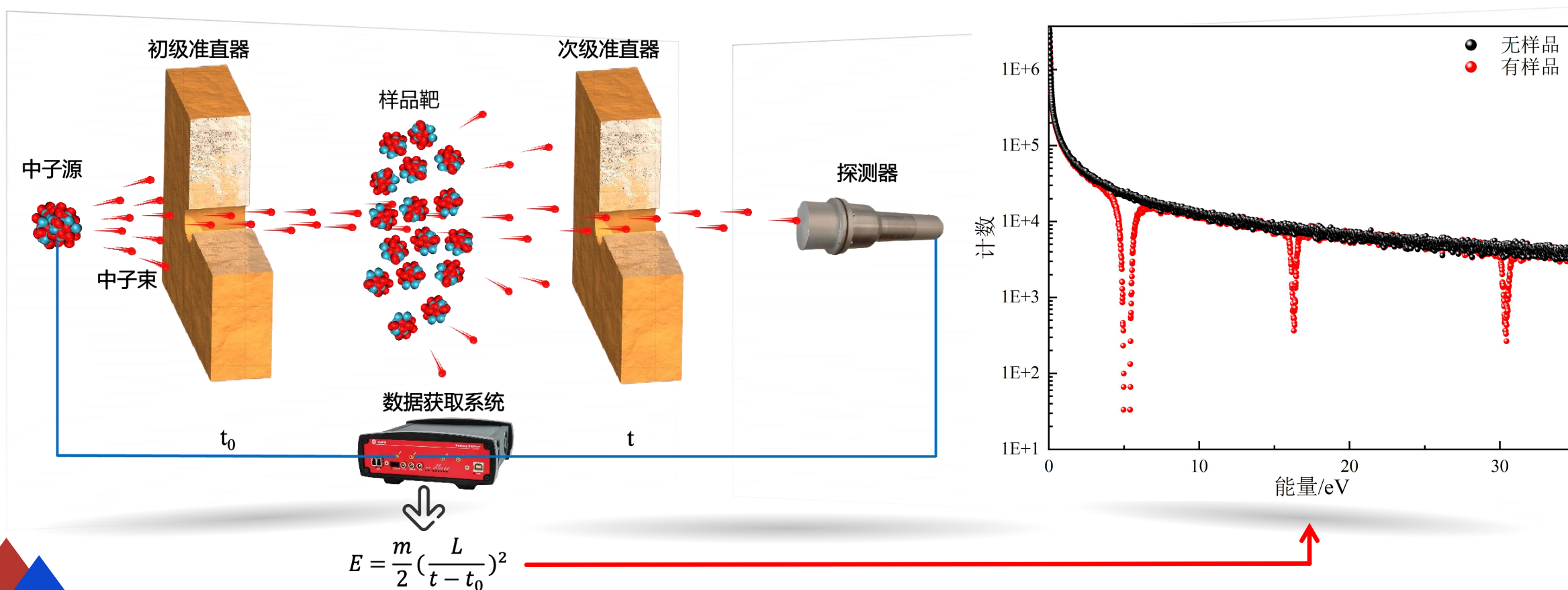
研究背景

加速器驱动次临界系统（ADS）利用散裂中子驱动次临界堆芯，通过核嬗变将长寿命裂变产物（LLFP）和次锕系核素（MA）转化为中短寿命、低放射性的核素，显著降低高放废物量。

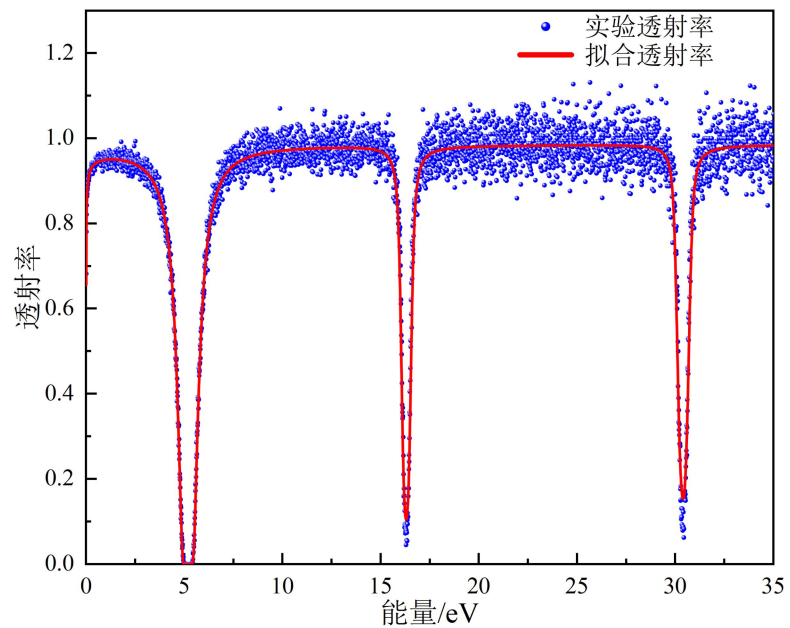
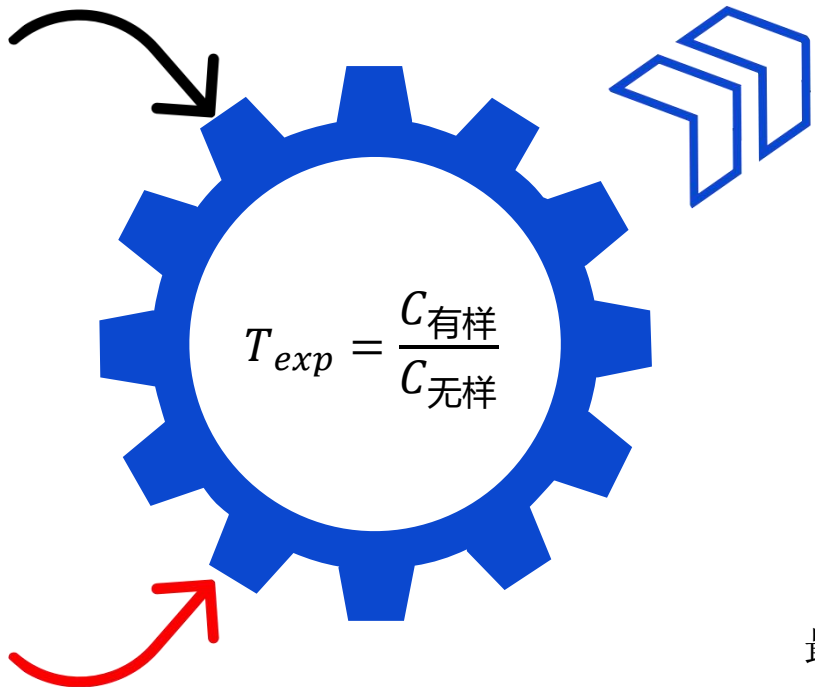
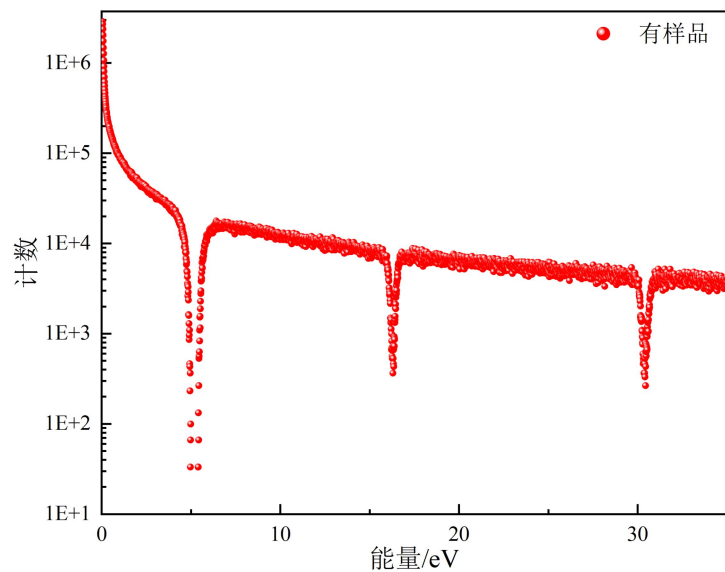
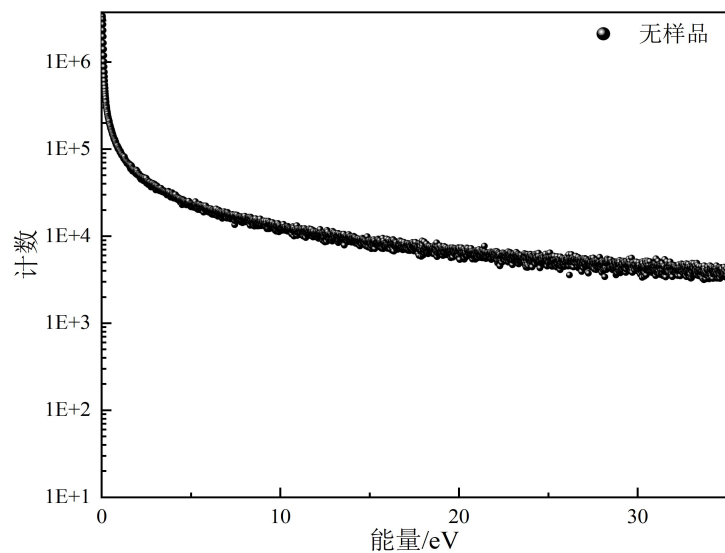


基本原理

中子共振透射分析技术 (Neutron Resonance Transmission Analysis, NRTA) 是一种基于中子与原子核相互作用的无损检测方法，通过测量中子束流穿过样品时的透射率谱，分析材料中的核素成分及其含量。



基本原理



最小二乘法拟合, 调整参数 n : $e^{-n\sigma x} = \frac{C_{有样}}{C_{无样}}$

Diagram illustrating the relationship between experimental and theoretical transmission. A large red arrow points from the bottom-right plot to the equation:

$$T = e^{-n\sigma x} \quad T_{exp} = \frac{C_{有样}}{C_{无样}}$$

研究目标

01

实验技术

中子飞行时间
n- γ 甄别
本底扣除

02

数据处理

多普勒展宽
最小二乘法拟合

03

技术验证

EXFOR数据库
中国散裂中子源

04

集成式中子无损检测装置

设计建造基于电子加速器
白光中子源的集成化
乏燃料无损检测装置

研究目标

01

实验技术

中子飞行时间
n- γ 甄别
本底扣除

02

数据处理

多普勒展宽
最小二乘法拟合

03

技术验证

EXFOR数据库
中国散裂中子源

04

集成式中子无损检测装置

设计建造基于电子加速器
白光中子源的集成化
乏燃料无损检测装置

研究目标

01

实验技术

中子飞行时间
n- γ 甄别
本底扣除

02

数据处理

多普勒展宽
最小二乘法拟合

03

技术验证

EXFOR数据库
中国散裂中子源

04

集成式中子无损检测装置

设计建造基于电子加速器
白光中子源的集成化
乏燃料无损检测装置

研究目标

01

实验技术

中子飞行时间
n- γ 甄别
本底扣除

02

数据处理

多普勒展宽
最小二乘法拟合

03

技术验证

EXFOR数据库
中国散裂中子源

04

集成式中子无损 检测装置

设计建造基于电子加速器
白光中子源的集成化
乏燃料无损检测装置

研究方法：实验技术

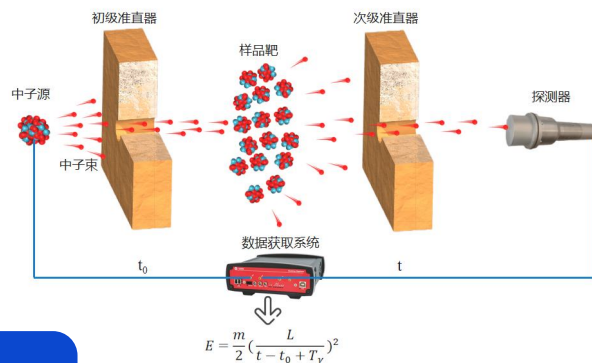
■ 中子飞行时间

$$TOF = T - T_0 + T_\gamma$$

T为探测器接收信号时间

T₀为伽马暴时间

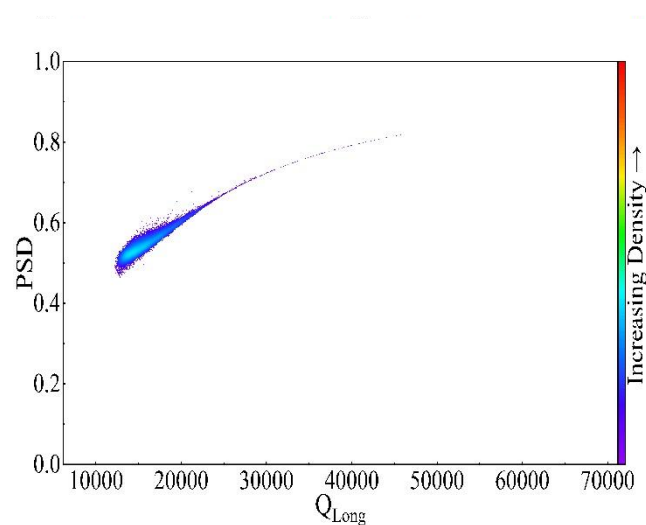
T_γ为伽马的飞行时间



01

■ n-γ甄别

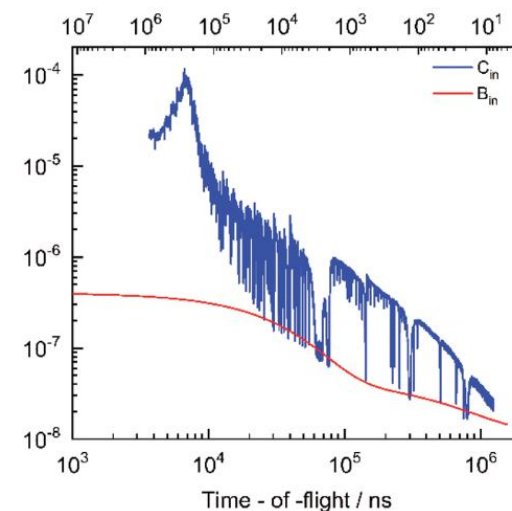
$$PSD = \frac{Q_{long} - Q_{short}}{Q_{long}}$$



02

■ 本底扣除

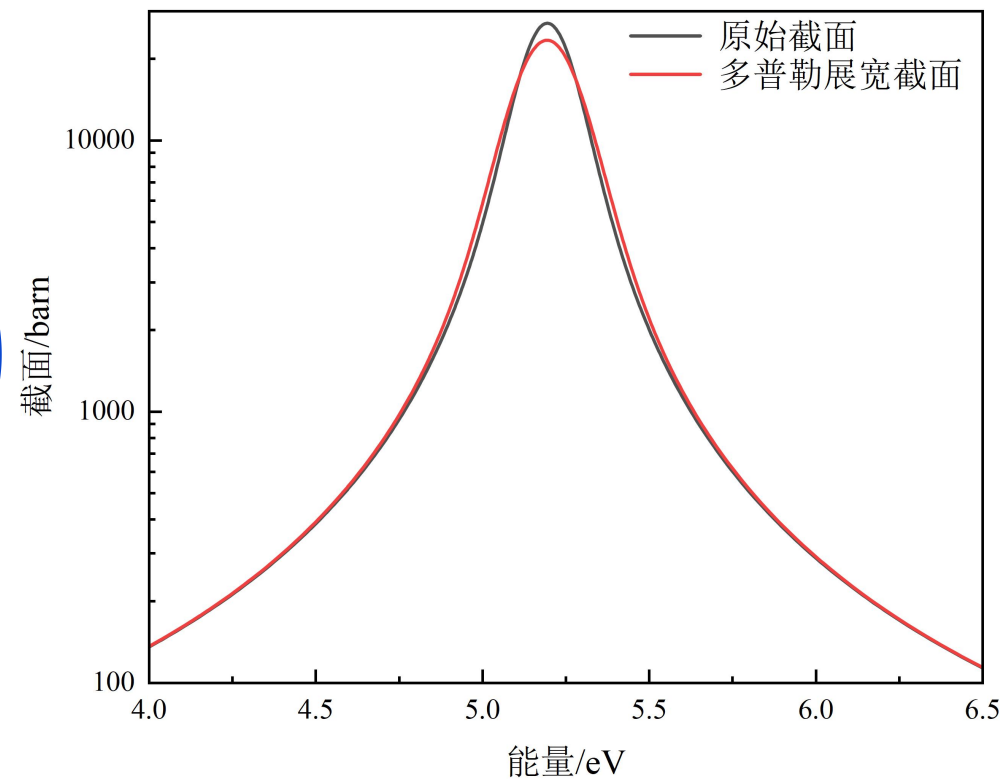
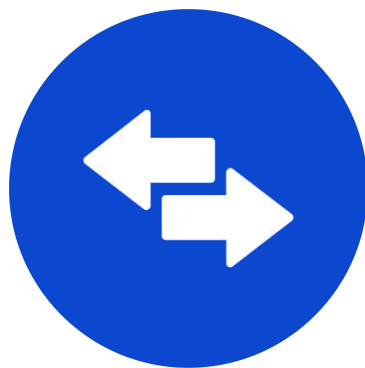
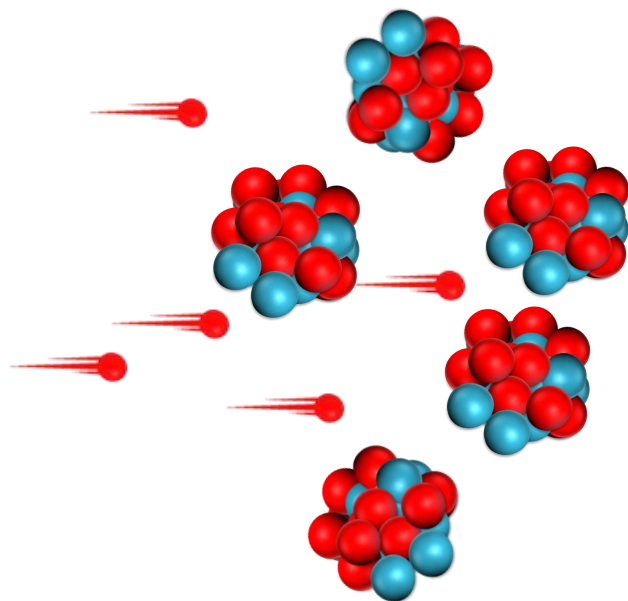
$$B = B_0 + B_1 e^{-\lambda_1 t} + B_2 e^{-\lambda_2 t}$$



03

研究方法：数据处理

多普勒展宽



原子核存在热运动
中子与原子核相对动能改变
截面产生多普勒展宽

使用Python代码基于自由气体
模型进行多普勒展宽

研究方法：数据处理

最小二乘法

损失函数：残差

$$Re^2 = \sum_i^{i=n} [T_{exp}(i) - T(i)]^2$$

其原理是获得实验测量值(T_{exp})与理论值(T)残差平方合的最小值，适用于高透射率数据

$$\sum \left(\begin{bmatrix} \sigma_1 & \sigma_1 & \cdots & \sigma_1 \\ \sigma_2 & \sigma_2 & \cdots & \sigma_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_n & \sigma_n & \cdots & \sigma_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_1 \sigma_1 \\ N_2 \sigma_2 \\ \vdots \\ N_n \sigma_n \end{bmatrix} \right) = \sum \begin{bmatrix} -\sigma_1 \ln T_{exp} \\ -\sigma_2 \ln T_{exp} \\ \vdots \\ -\sigma_n \ln T_{exp} \end{bmatrix}$$

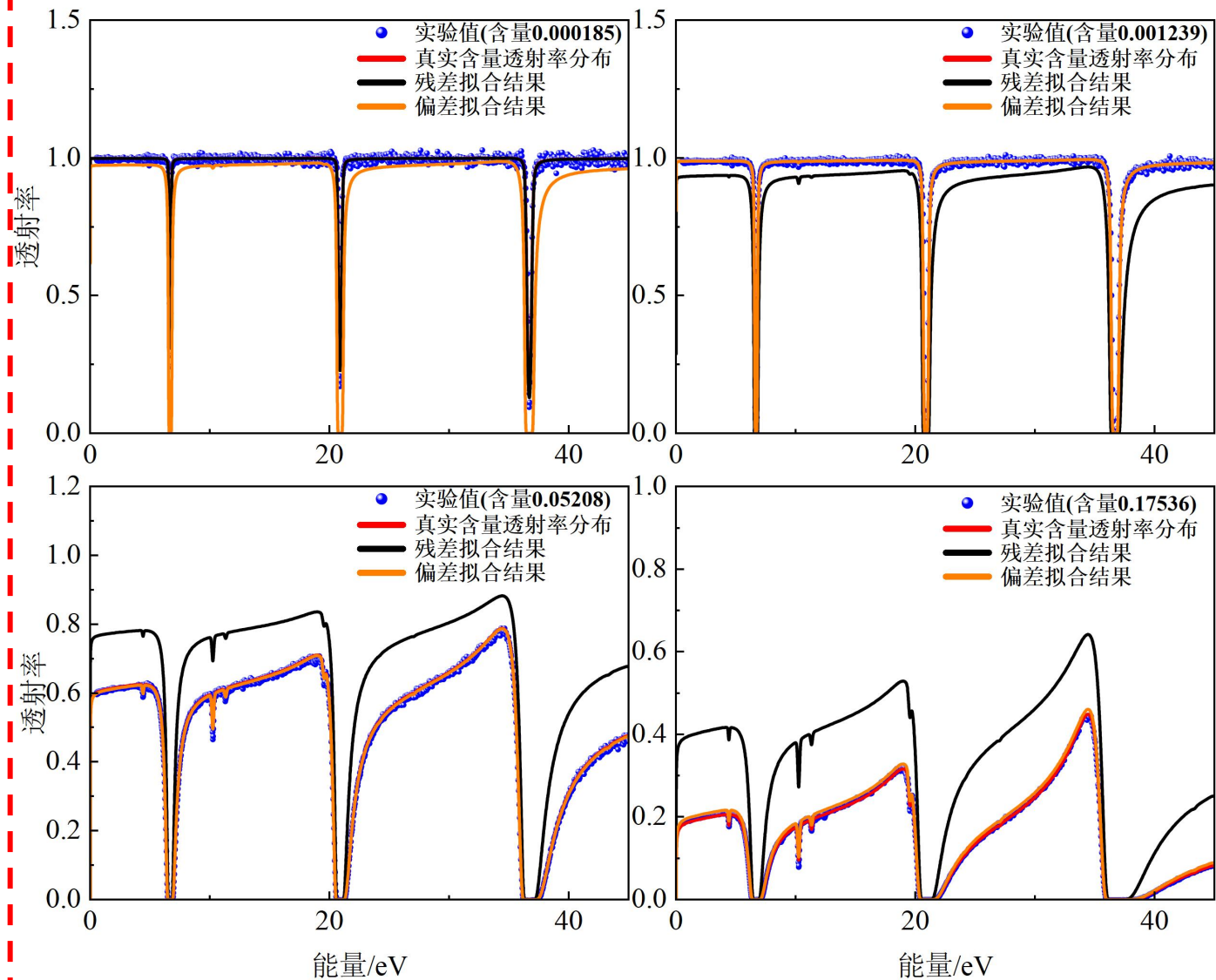
损失函数：偏差

$$D^2 = \sum_i^{i=n} \left[\frac{T_{exp}(i) - T(i)}{T(i)} \right]^2$$

其原理是获得实验测量值(T_{exp})与理论值(T)偏差度平方合的最小值，适用于低透射率数据

$$\begin{cases} \sum \frac{\ln T_{exp}^2 \sigma_1}{(\sum_1^n N_n \sigma_n)^3} = - \sum \frac{\ln T_{exp} \sigma_1}{(\sum_1^n N_n \sigma_n)^2} \\ \sum \frac{\ln T_{exp}^2 \sigma_2}{(\sum_1^n N_n \sigma_n)^3} = - \sum \frac{\ln T_{exp} \sigma_2}{(\sum_1^n N_n \sigma_n)^2} \\ \vdots \\ \sum \frac{\ln T_{exp}^2 \sigma_n}{(\sum_1^n N_n \sigma_n)^3} = - \sum \frac{\ln T_{exp} \sigma_n}{(\sum_1^n N_n \sigma_n)^2} \end{cases}$$

研究方法：技术验证



单核素最小二乘法拟合验证

数据源：EXFOR数据库，1977年D.K.Olsen等人测得的U-238透射率数据

截面数据库：JEFF3.3

两种最小二乘法的拟合效果

真实面密度/b	残差 (与真实值比值)	偏差 (与真实值比值)
0.000185	0.000202 (1.093)	0.0028 (15.135)
0.01239	0.007225 (0.583)	0.01234 (0.996)
0.05208	0.0273 (0.525)	0.05248 (1.007)
0.17536	0.097 (0.554)	0.1697 (0.968)

研究方法：技术验证

01

实验地点

中国散裂中子源
(CSNS) Back-n终端

02

实验样品

1 mm 银样品*2

03

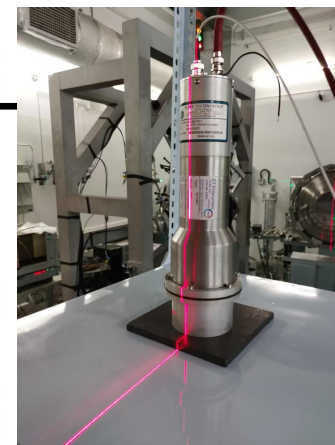
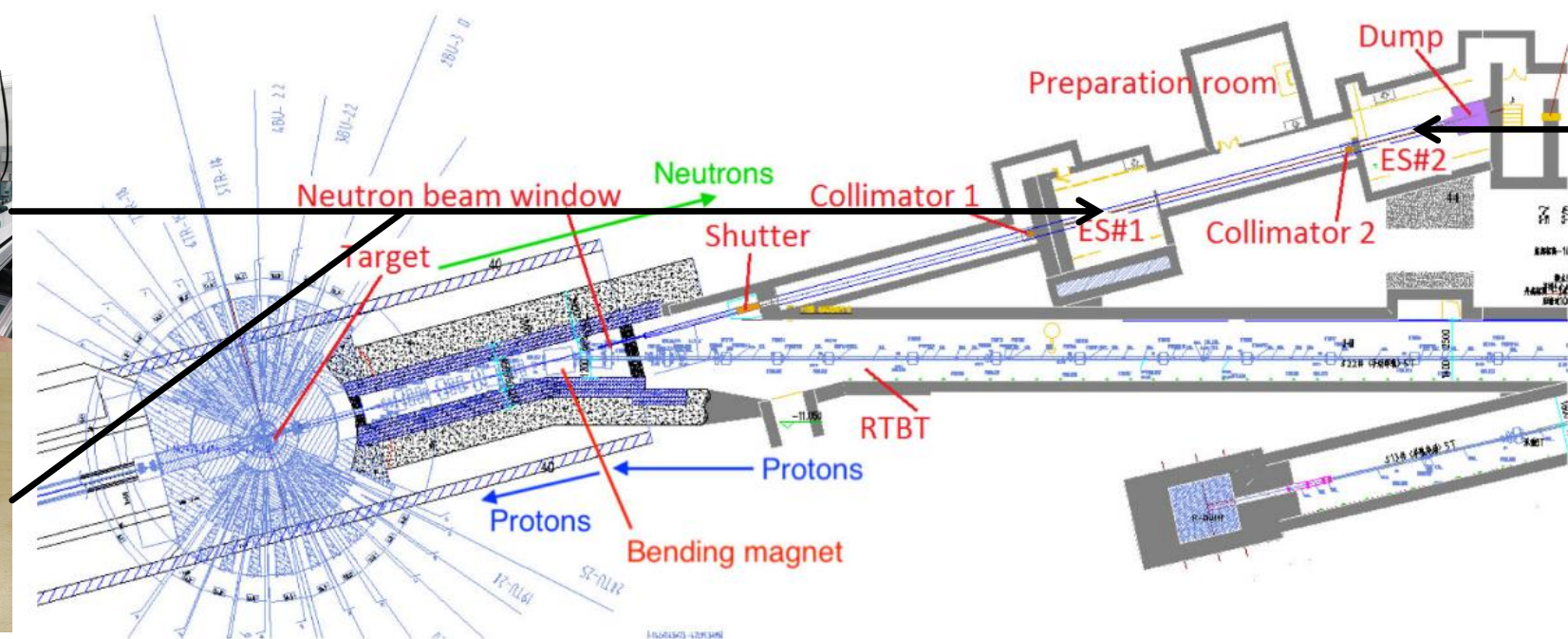
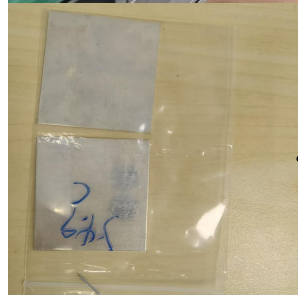
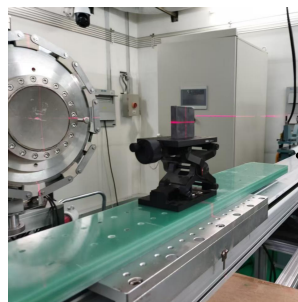
实验探测器

EJ270塑料闪烁体

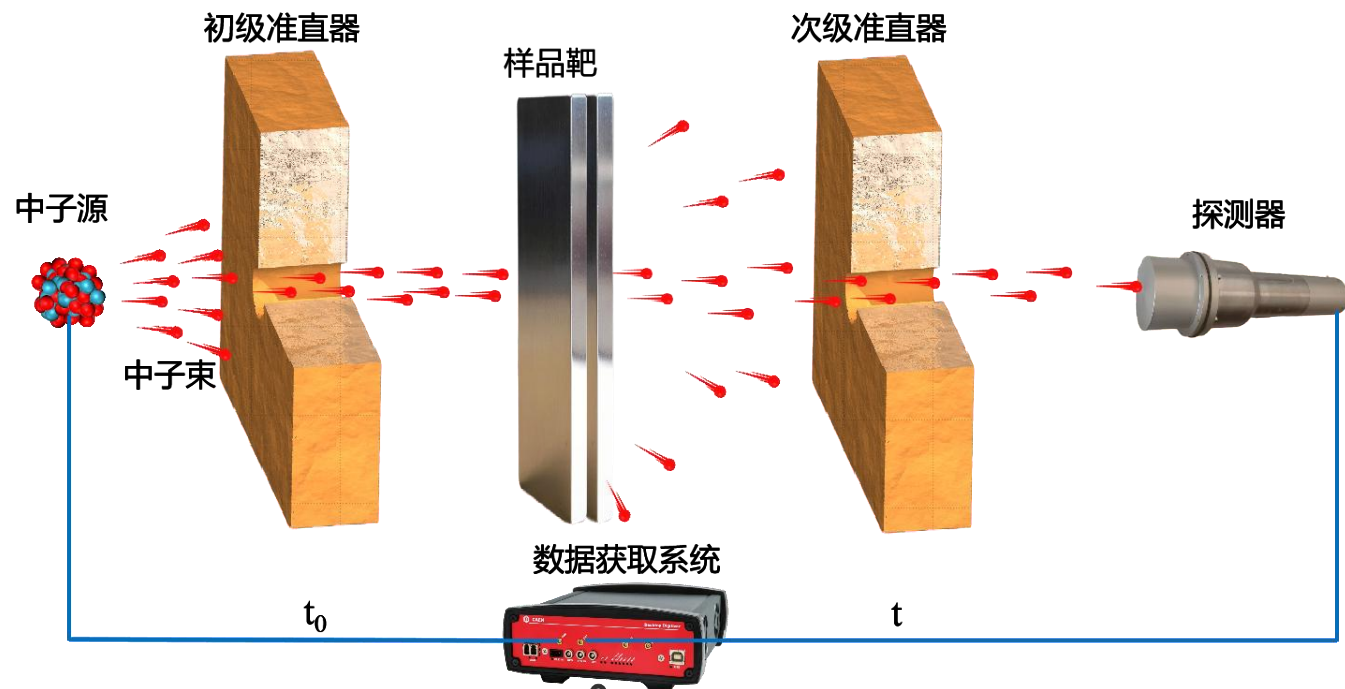
04

实验目的

多核素含量变化拟合求解

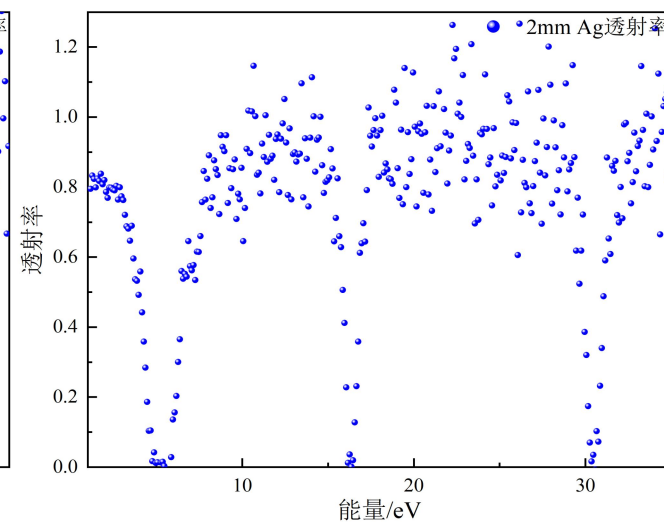
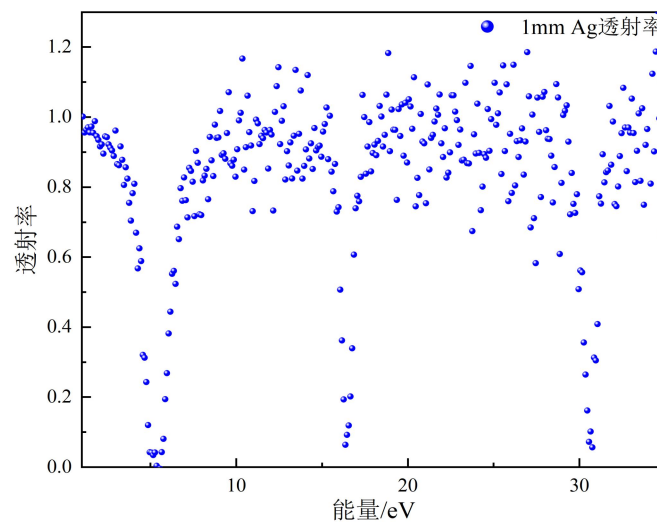
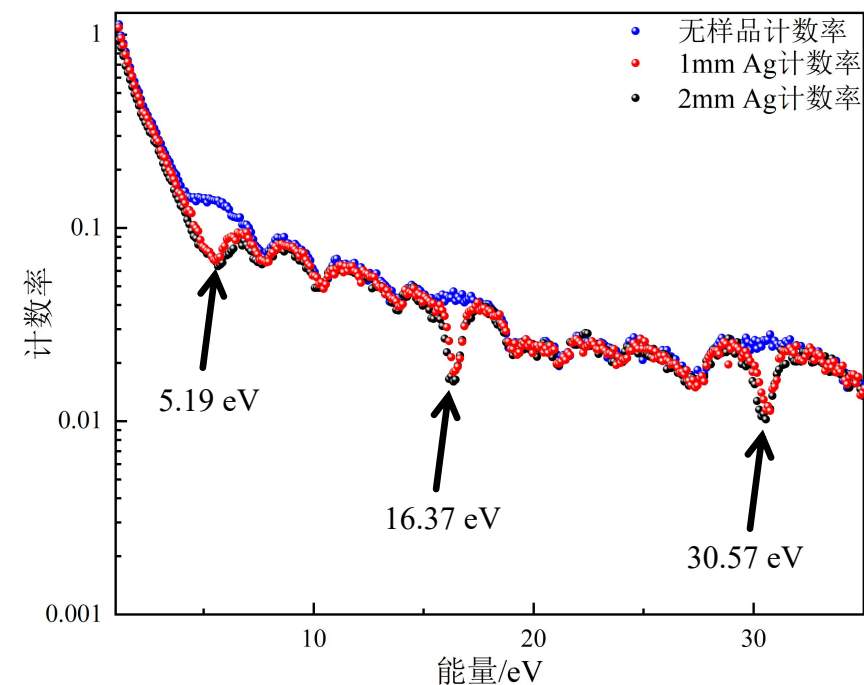


实验结果

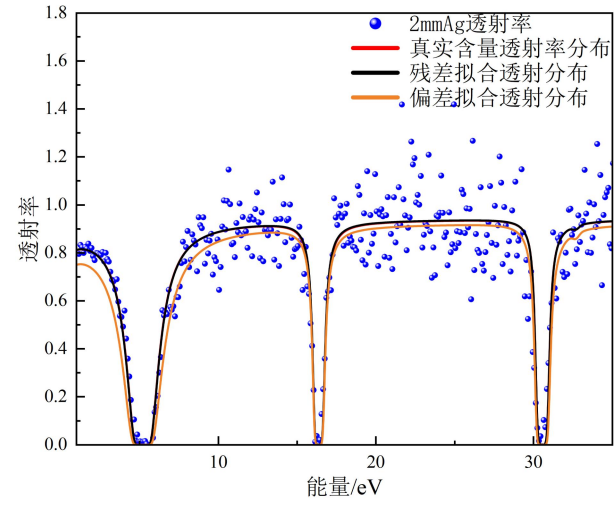
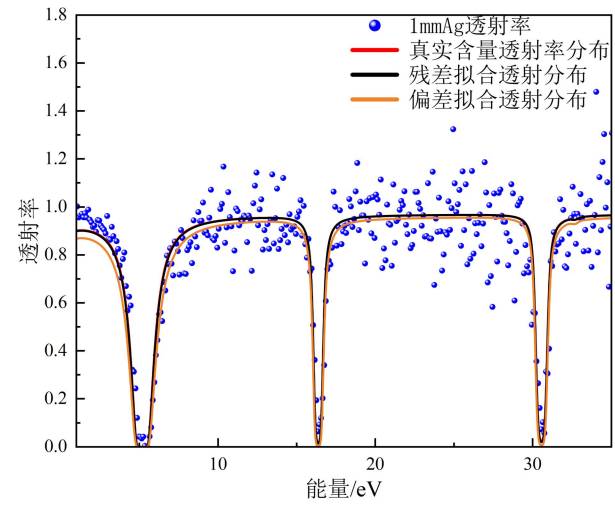


$$E = \frac{m}{2} \left(\frac{L}{t - t_0} \right)^2$$

$$T_{exp} = \frac{C_{有样} - B}{C_{无样} - B}$$



实验结果



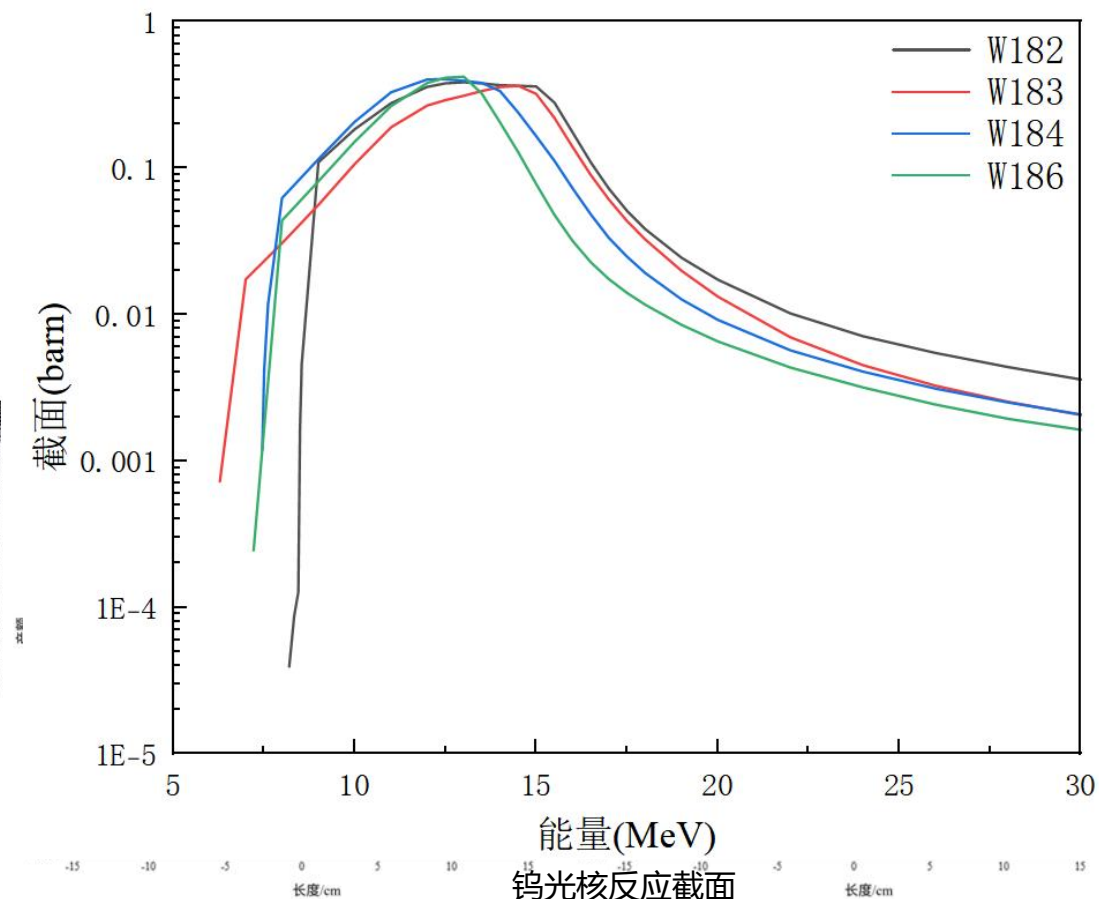
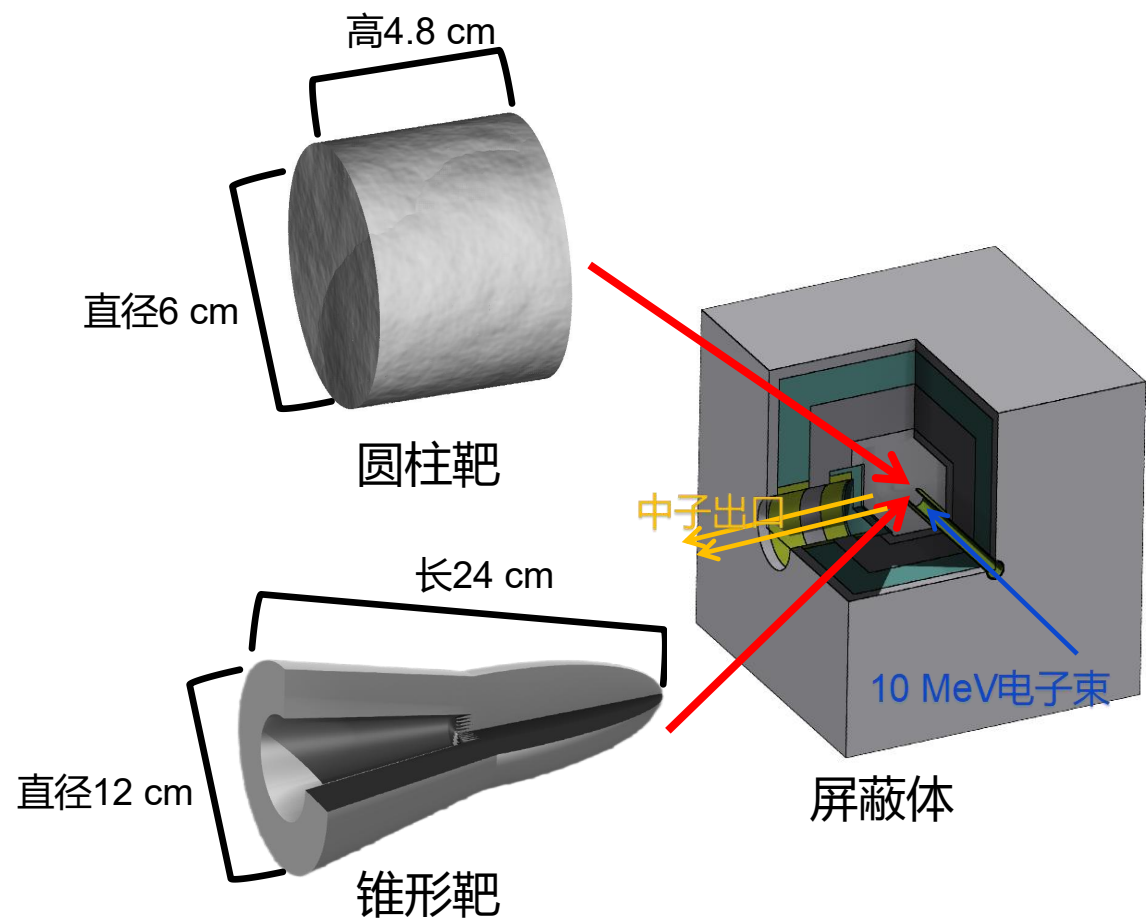
银样品最小二乘法的拟合效果

样品	同位素	面密度/barn	残差（与真实值比值）	偏差（与真实值比值）
1mm Ag	¹⁰⁷ Ag	0.00303	0.00297(0.980)	0.00412(1.360)
	¹⁰⁹ Ag	0.00282	0.00294(1.043)	0.00385(1.365)
2mm Ag	¹⁰⁷ Ag	0.00607	0.00578(0.952)	0.00648(1.068)
	¹⁰⁹ Ag	0.00564	0.00575(1.020)	0.00687(1.218)



装置研制进展：靶站设计

电子束能量10 MeV，飞行距离10 m

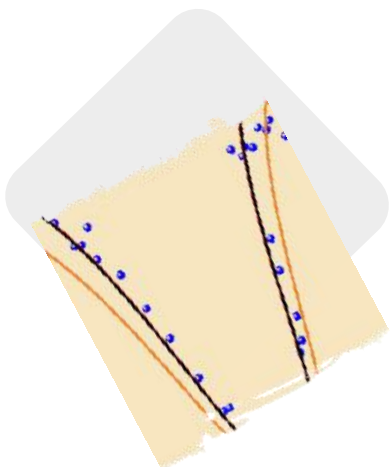


钨光核反应截面
圆柱靶与锥形靶的中子剖面

未来展望

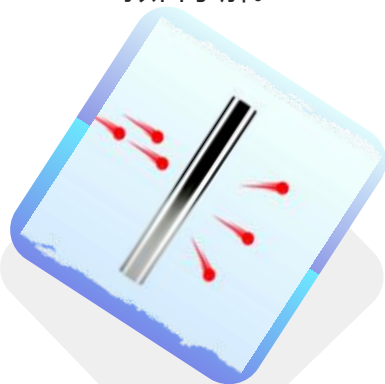
燃料棒的拟合求解

对于圆柱形的燃料棒，需寻找解析的透射率函数表达式，以进行拟合求解。



更好的拟合算法

寻找普适的拟合算法，不受数据特点影响。机器学习中的梯度下降法或许可行。



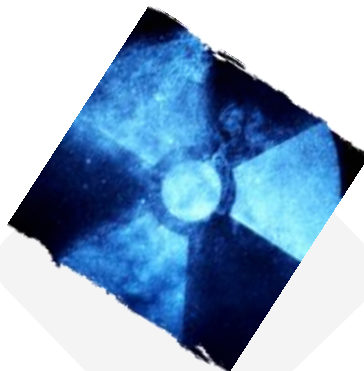
机器学习的应用

通过制作透射率数据集，进行机器学习，获得透射率与核素含量的隐含关系。



复杂辐射场的本底扣除

辐射场较为复杂，高精度的本底扣除需进一步发展。



集成式中子无损检测装置

设计建造基于电子加速器白光中子源的集成化乏燃料无损检测装置



感谢观看

