

CSNS反角白光中子源探测器研 发及物理实验进展

阮锡超

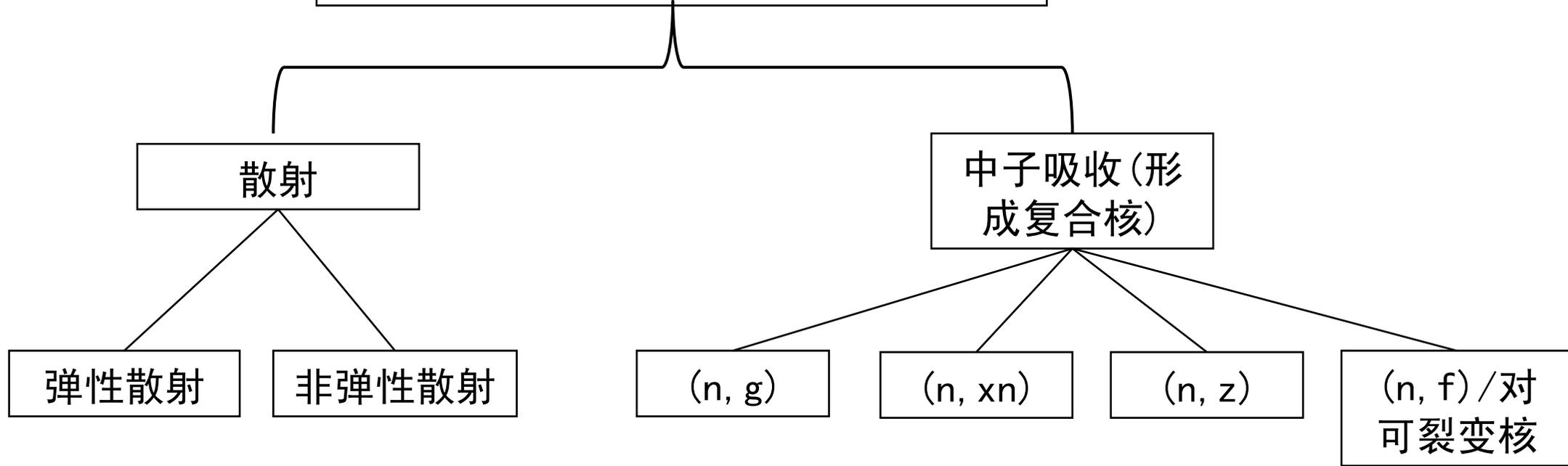
代表Back-n合作组

报告内容

- **中子核数据及其用途简介**
- **基于中国散裂中子源的核数据测量探测器研发进展**
- **物理实验进展**

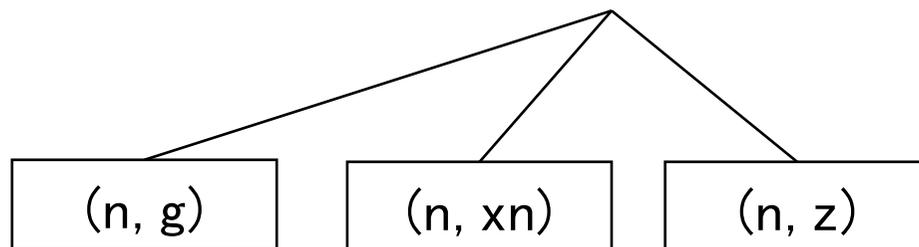
一、中子核数据及其用途简介

中子与原子核的反应

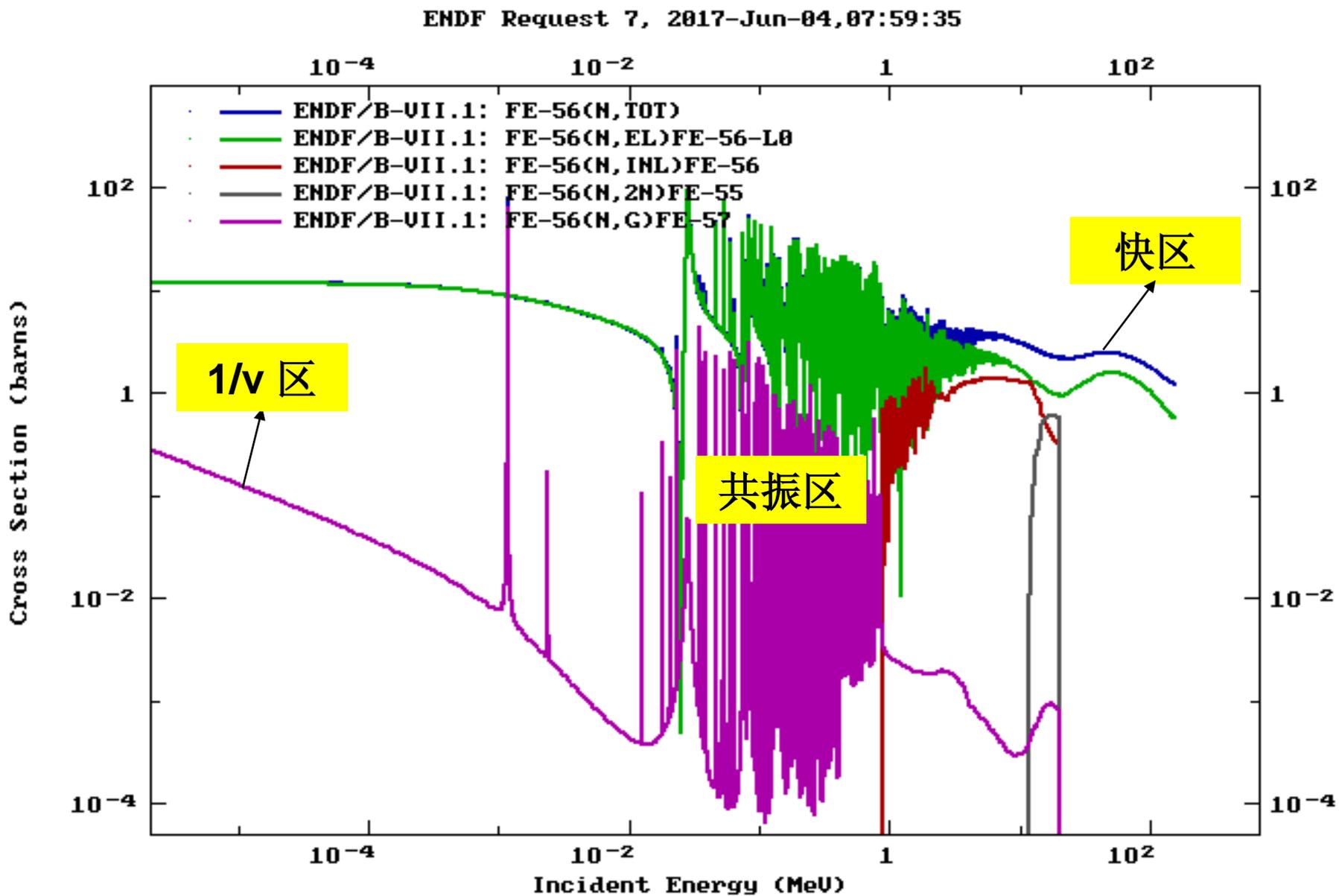


反应截面:

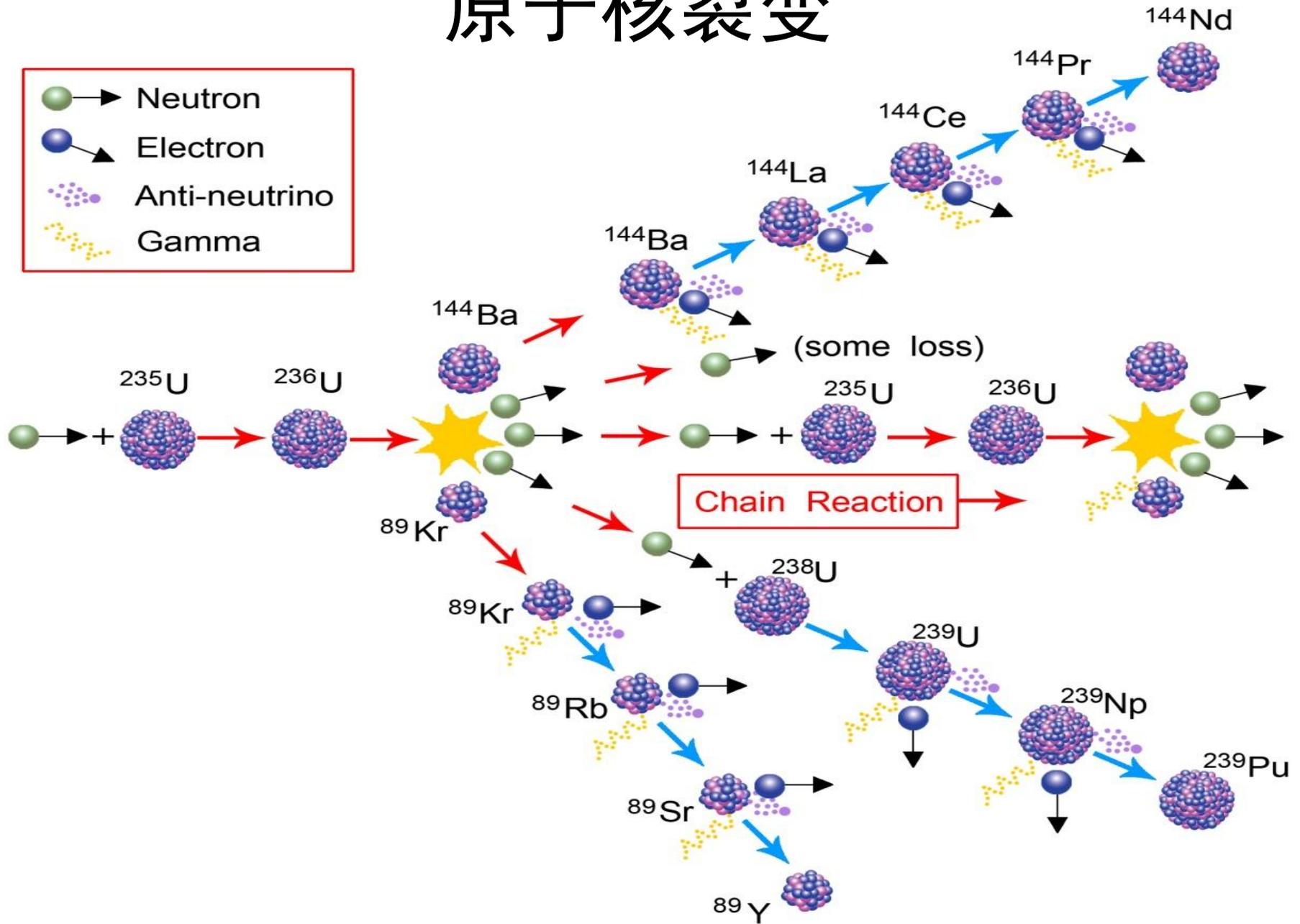
$$\sigma_t = \sigma_s + \sigma_a = (\sigma_{el} + \sigma_{inel}) + (\sigma_c + \sigma_f)$$



中子反应截面呈现非常复杂的特性



原子核裂变



复合核形成(激发态) → 形变 → 断裂(碎片高激发态) → 发射中子 → 发射伽马 → 贝塔衰变¹⁶

裂变数据

裂变截面

裂变产额

裂变中子

裂变伽马

独立产额：一次裂变直接产生某一核素的份额

累积产额：裂变产生某一核素及其衰变先驱核的独立产额之和

链产额：一条质量链上所有核素独立产额之和

产额 - 能量关系

瞬发中子：中子数及其分布，中子能谱

缓发中子：中子数及其随时间的变化，中子能谱

伽马多重数及其分布，伽马谱

其它数据

- 原子核衰变：半衰期、衰变粒子能谱、分支比等等；
- 原子核质量
- ...

核数据简介

核数据通常可以分为两类：

一是用于描述入射粒子(中子、质子、伽马等)与原子核相互作用性质的核反应数据。如全套中子反应数据、激发函数、裂变产额等等。

二是描述单个核基本性质的核结构与放射性衰变数据。如能级纲图、衰变数据等等。

核反应数据还可以按其他方式进行分类：

分类方式	核数据种类
按核数据用途	通用和专用数据；
按入射粒子种类	中子、带电粒子、光核等数据；
按靶核质量分	轻核、中重核、裂变产物核和裂变核数据；
按入射粒子能量分	低能、中能和高能数据；
按数据的获取方式分为	测量数据和评价数据；

核数据的用途:

国防科技: 以裂变、聚变为主要能量来源的装置

基础研究: 核天体物理、核反应理论模型

新型核能系统:

☆ 第四代反应堆

☆ ADS及核废料嬗变

☆ 聚变堆

其他应用: 治癌、单粒子效应、材料辐照损伤等

国防需求：核装置设计

物理模型

输入参数



计算方法

核数据是输入参数的重要组成部分

核武器设计三要素



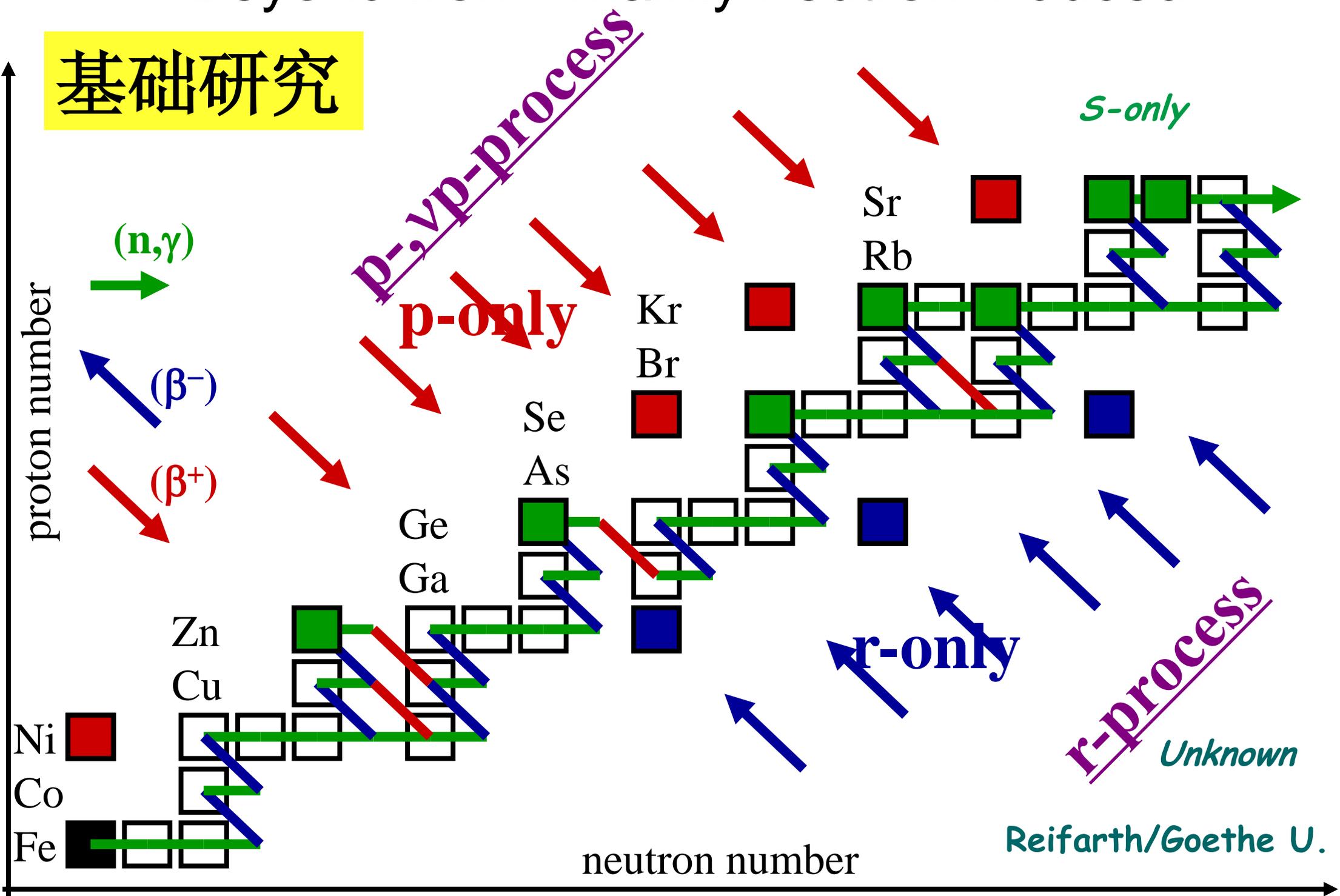
爆炸当量？
裂变/聚变分威力？
燃耗深度？
中子/伽马强度及能谱？
燃烧过程？
...

- 利用核爆炸时产生的中子/伽马与燃料核发生的各种反应来诊断
- 利用核爆炸时产生的中子/伽马与核武器部件结构材料核发生的各种反应来诊断
- 利用核爆炸时产生的中子/伽马与添加的指示剂核的各种反应来诊断
- 核爆炸时产生的中子/伽马与周围环境中核发生的各种反应来诊断
- ...
- 多种方法同时使用，互相校验

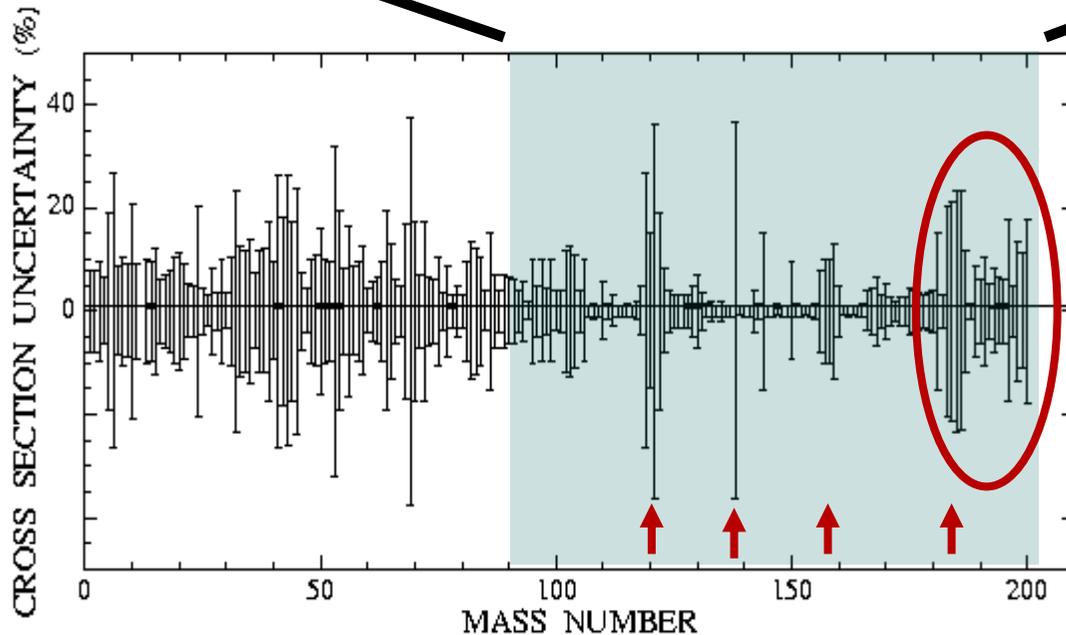
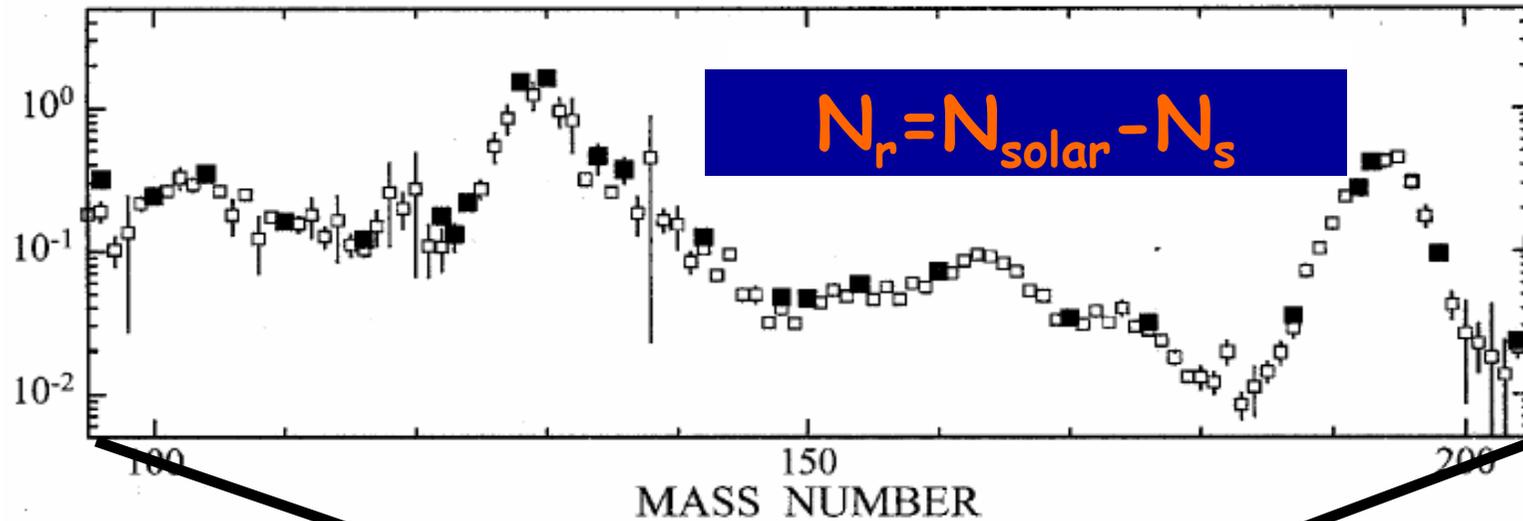
核数据在核武器试验的诊断中发挥着不可或缺的作用！

Beyond Iron - mainly neutron induced

基础研究



Nuclear data needs for the main s-process



Better uncertainties (1-3%)

S-only nuclei

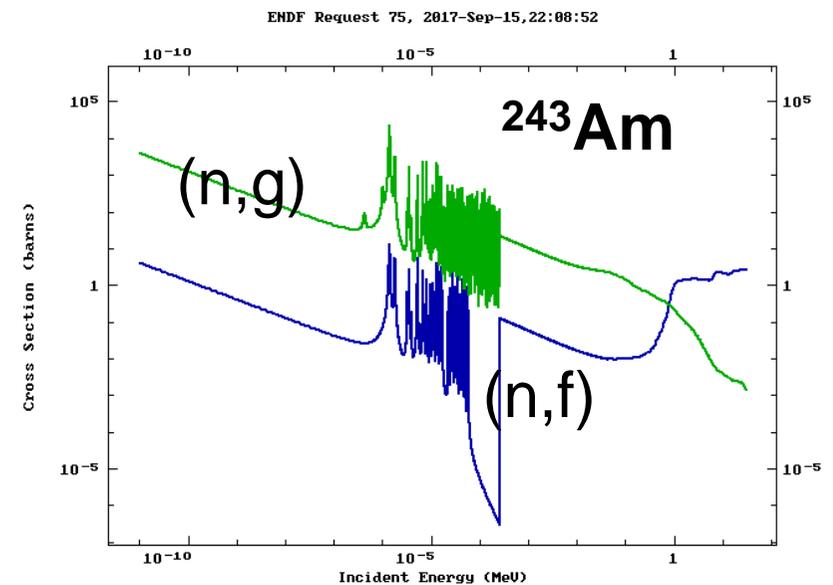
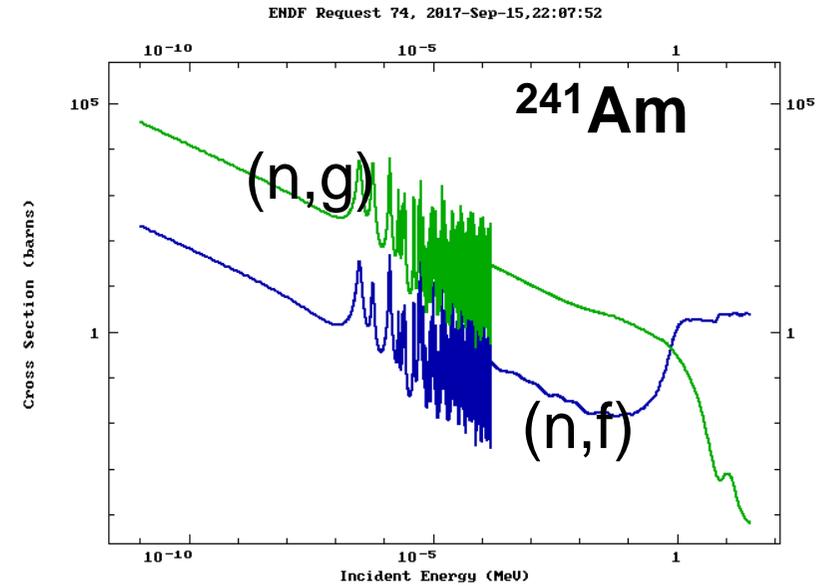
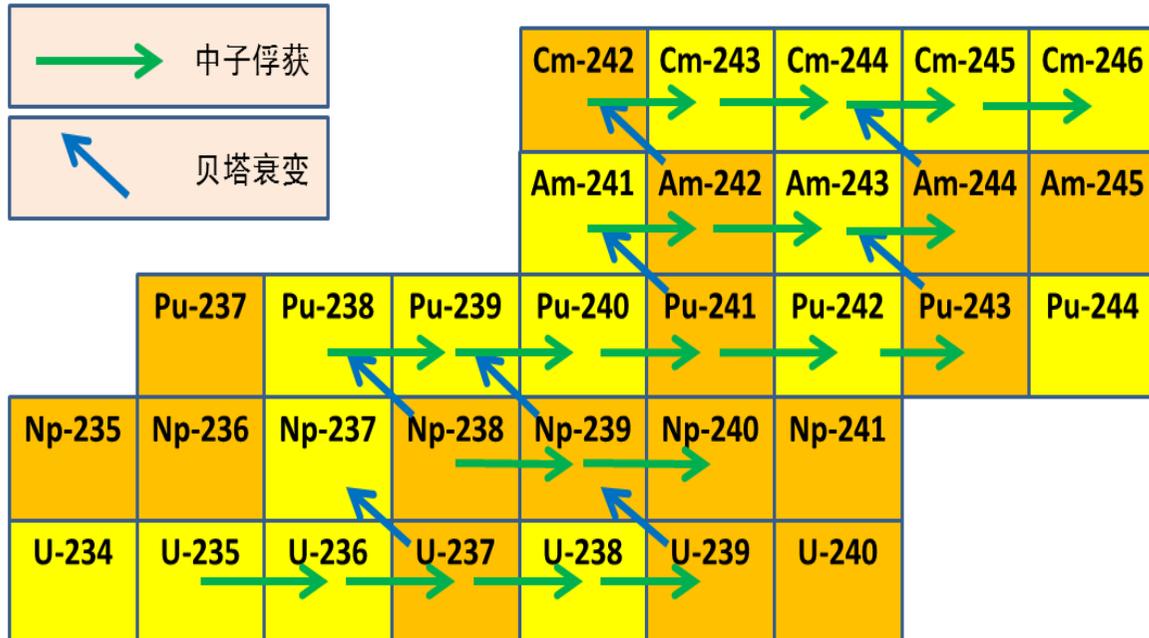
Nuclei with small
neutron cross section
(around neutron magic numbers)

We need to measure (n,γ) cross sections between 0.1 and 500 keV.

新型核能系统研发:

新型核能系统最求最大的燃料利用率，最少的核废料产生率

- 裂变反应可以燃烧长寿命核废料
- 中子俘获反应则是生成长寿命核废料的主要途径
- 新型核能系统追求最大的裂变/俘获比
- 快中子堆 ($nf > ng$ @ above 1 MeV)



现有数据质量无法满足新型核能系统研发的需求

快堆

Nuclear data for sustainable nuclear energy

Coordinated action on nuclear data for industrial development in Europe
CANDIDE

A.J. Koning, J. Blomgren, R. Jacqmin, A.J.M. Plompen, R. Mills, G. Rimpault,
E. Bauge, D. Cano Ott, S. Czifrus, K. Dahlbacka, I. Goncalves,
H. Henriksson, D. Lecarpentier, E. Malambu Mbala,
V. Stary, C. Trakas, C. Zimmerman

Table 2 . Summary of the SG26 Highest Priority Target Accuracies for Fast Reactors

		Energy Range	Current Accuracy (%)	Target Accuracy (%)
U238	σ_{inel}	6.07 \div 0.498 MeV	10 \div 20	2 \div 3
	σ_{capt}	24.8 \div 2.04 keV	3 \div 9	1.5 \div 2
Pu241	σ_{fiss}	1.35 MeV \div 454 eV	8 \div 20	2 \div 3 (SFR,GFR,LFR) 5 \div 8 (ABTR,EFR)
Pu239	σ_{capt}	498 \div 2.04 keV	7 \div 15	4 \div 7
Pu240	σ_{fiss}	1.35 \div 0.498 MeV	6	1.5 \div 2
	ν	1.35 \div 0.498 MeV	4	1 \div 3
Pu242	σ_{fiss}	2.23 \div 0.498 MeV	19 \div 21	3 \div 5
Pu238	σ_{fiss}	1.35 \div 0.183 MeV	17	3 \div 5
Am242m	σ_{fiss}	1.35 MeV \div 67.4 keV	17	3 \div 4
Am241	σ_{fiss}	6.07 \div 2.23 MeV	12	3
Cm244	σ_{fiss}	1.35 \div 0.498 MeV	50	5
Cm245	σ_{fiss}	183 \div 67.4 keV	47	7
Fe56	σ_{inel}	2.23 \div 0.498 MeV	16 \div 25	3 \div 6
Na23	σ_{inel}	1.35 \div 0.498 MeV	28	4 \div 10
Pb206	σ_{inel}	2.23 \div 1.35 MeV	14	3
Pb207	σ_{inel}	1.35 \div 0.498 MeV	11	3
Si28	σ_{inel}	6.07 \div 1.35 MeV	14 \div 50	3 \div 6
	σ_{capt}	19.6 \div 6.07 MeV	53	6

装置设计目标:
 $K_{eff} < 300 \text{ pcm}$

灵敏度分析

数据不确定度
需求

ADS

Target Accuracy Assessment for an ADS Design

4th Workshop on Neutron Measurements, Evaluations and Applications -- Nuclear Data Needs for Generation IV and Accelerator-Driven Systems

G. Aliberti
G. Palmiotti
M. Salvatores

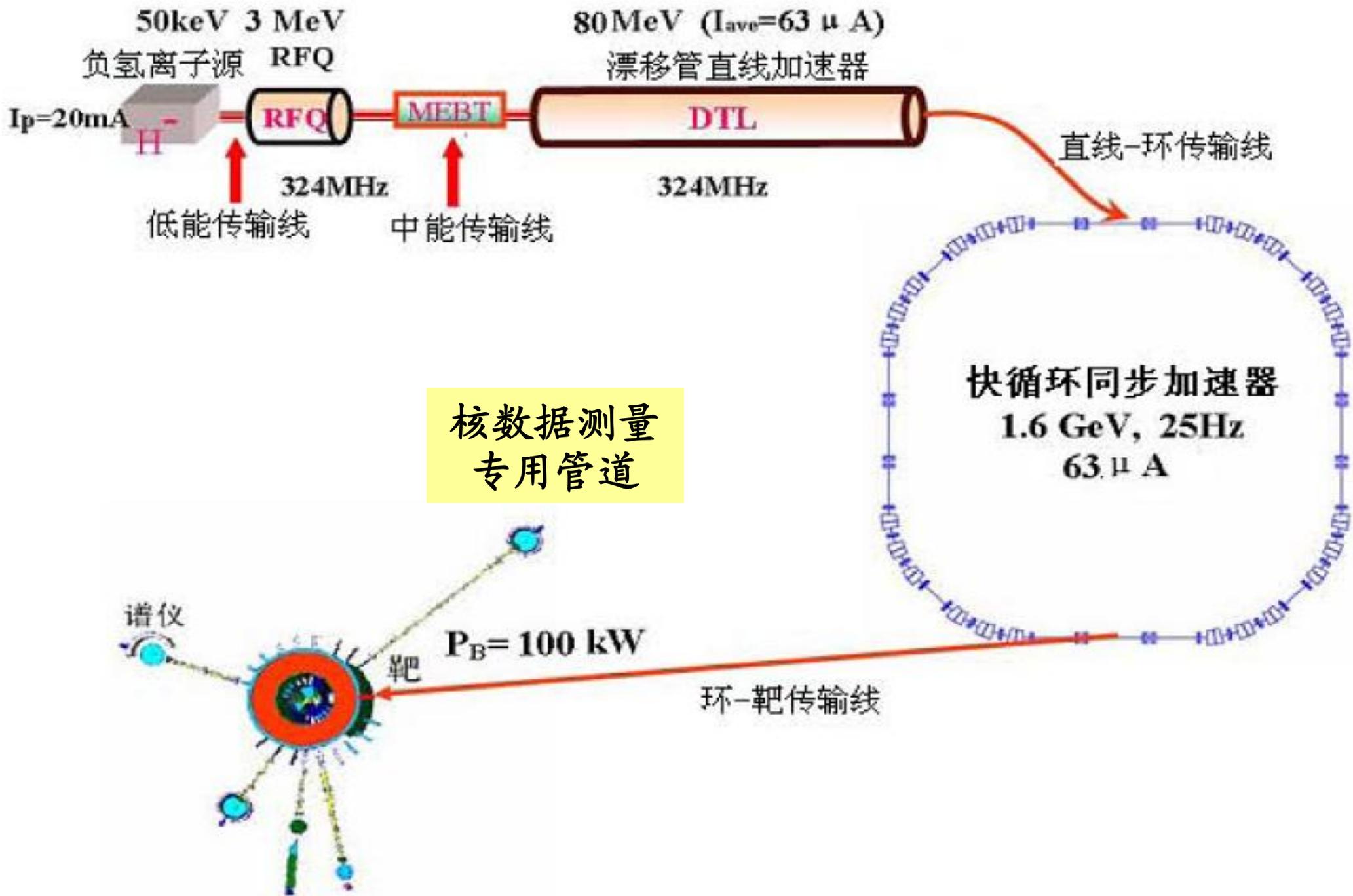
October 2007

Table 2. Uncertainty Reduction Requirements Needed to Meet Integral Parameter Target Accuracies

Isotope	Cross-Section	Energy Range	Uncert. (%)		Isotope	Cross-Section	Energy Range	Uncert. (%)	
			Initial	Target				Initial	Target
Cm244	σ_{fiss}	6.07 - 2.23 MeV	31.3	3.0	Bi209	σ_{inel}	2.23 - 1.35 MeV	34.1	2.8
		2.23 - 1.35 MeV	43.8	2.6			1.35 - 0.498 MeV	41.8	4.2
		1.35 - 0.498 MeV	50.0	1.5	Am243	σ_{fiss}	6.07 - 2.23 MeV	11.0	2.3
Fe56	σ_{inel}	6.07 - 2.23 MeV	7.2	2.5			1.35 - 0.498 MeV	9.2	1.6
		2.23 - 1.35 MeV	25.4	1.6	Cm244	ν	6.07 - 2.23 MeV	11.1	2.5
		1.35 - 0.498 MeV	16.1	1.5			1.35 - 0.498 MeV	5.5	1.3
Am243	σ_{inel}	1.35 - 0.498 MeV	42.2	2.3	N15	σ_{el}	1.35 - 0.498 MeV	5.0	1.2
		498 - 183 keV	41.0	3.6	Pb	σ_{inel}	6.07 - 2.23 MeV	5.4	2.9
		183 - 67.4 keV	79.5	3.7	Zr90	σ_{inel}	6.07 - 2.23 MeV	18.0	3.3
Pu241	σ_{fiss}	1.35 - 0.498 MeV	16.6	2.1	Pu238	σ_{fiss}	2.23 - 1.35 MeV	33.8	6.0
		498 - 183 keV	13.5	1.7			1.35 - 0.498 MeV	17.1	3.4
		183 - 67.4 keV	19.9	1.7			498 - 183 keV	17.1	3.9
Am241	σ_{fiss}	6.07 - 2.23 MeV	11.7	1.7	Cm242	σ_{fiss}	6.07 - 2.23 MeV	52.6	26
		2.23 - 1.35 MeV	9.8	1.4			498 - 183 keV	66.0	28.4
		1.35 - 0.498 MeV	8.3	1.2	Pu238	ν	1.35 - 0.498 MeV	7.0	2.8
Cm245	σ_{fiss}	1.35 - 0.498 MeV	49.4	3.3			498 - 183 keV	7.0	3.4
		498 - 183 keV	37.2	2.9	Am242m	σ_{fiss}	498 - 183 keV	16.6	4.8
		183 - 67.4 keV	47.5	2.9			183 - 67.4 keV	16.6	4.8
		67.4 - 24.8 keV	26.5	3.2					

二、基于中国散裂中子源的核 数据测量探测器研发进展

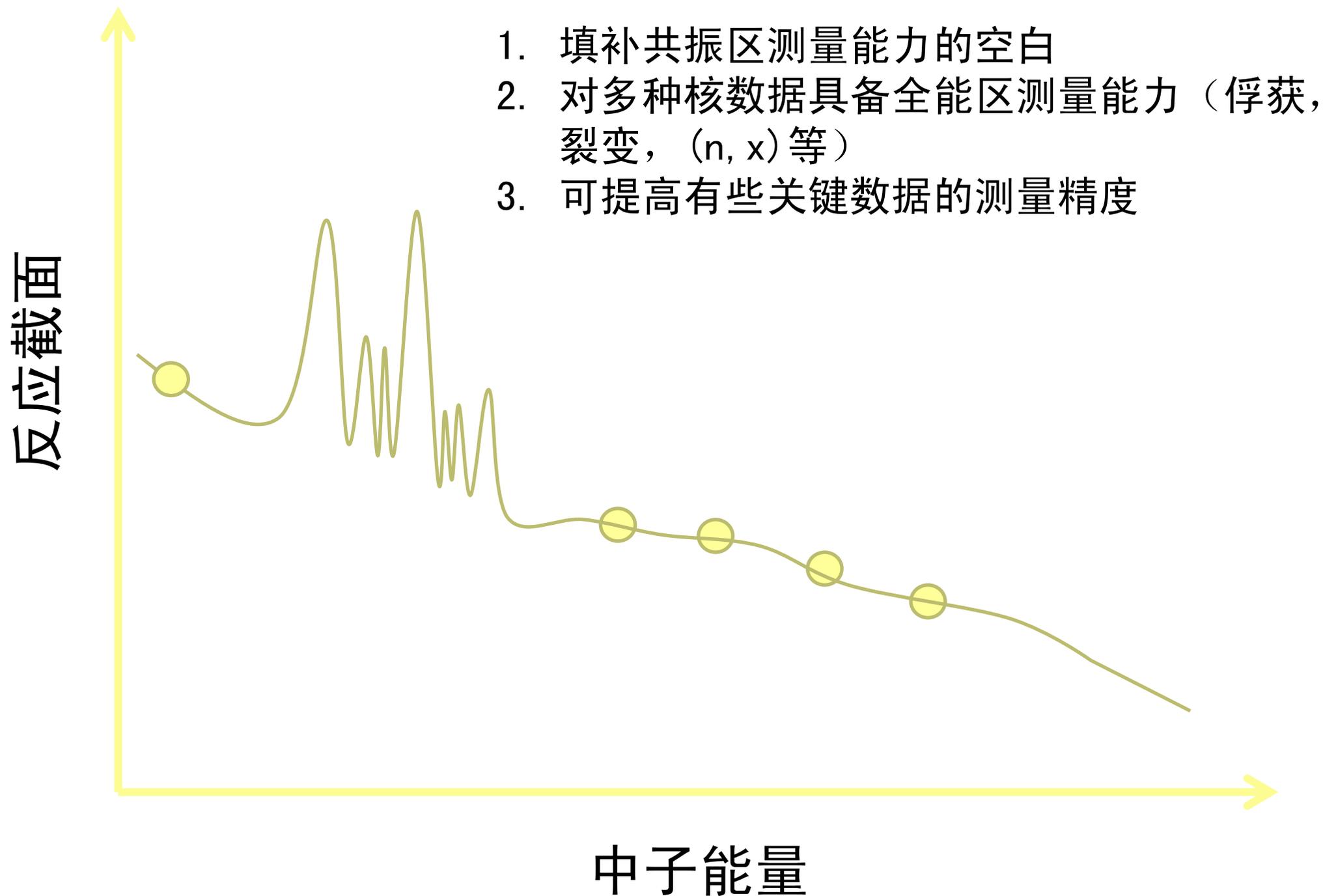
中国散裂中子源反角白光中子束线



2017年7月，束线建成



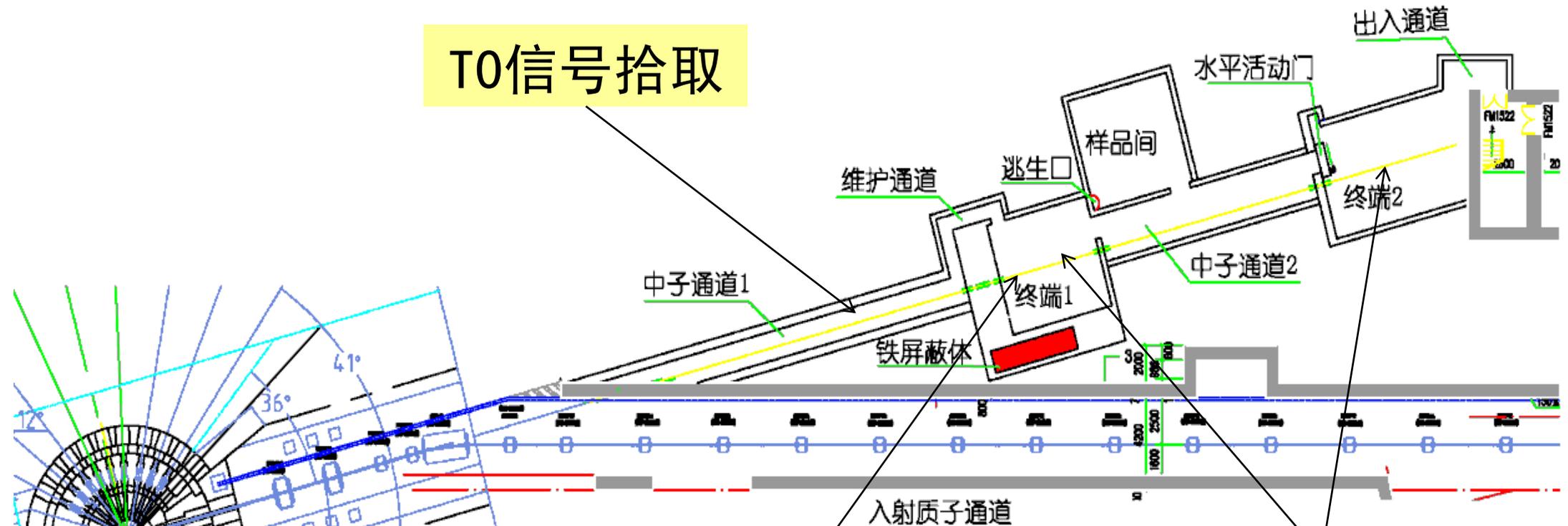
该中子源对我国核数据测量的意义



首批物理实验探测器研发

- 主要为首批物理实验服务
- 选择投资较小，又比较容易获得成果的探测器系统：
 - 束流能谱、注量率、剖面监测系统
 - 三套物理实验谱仪：
 - 基于多层裂变电离室的裂变截面测量系统
 - 基于 C_6D_6 探测器的中子俘获截面测量系统
 - 带电粒子探测系统
 - 公用电子学与DAQ

束流测量与监测系统

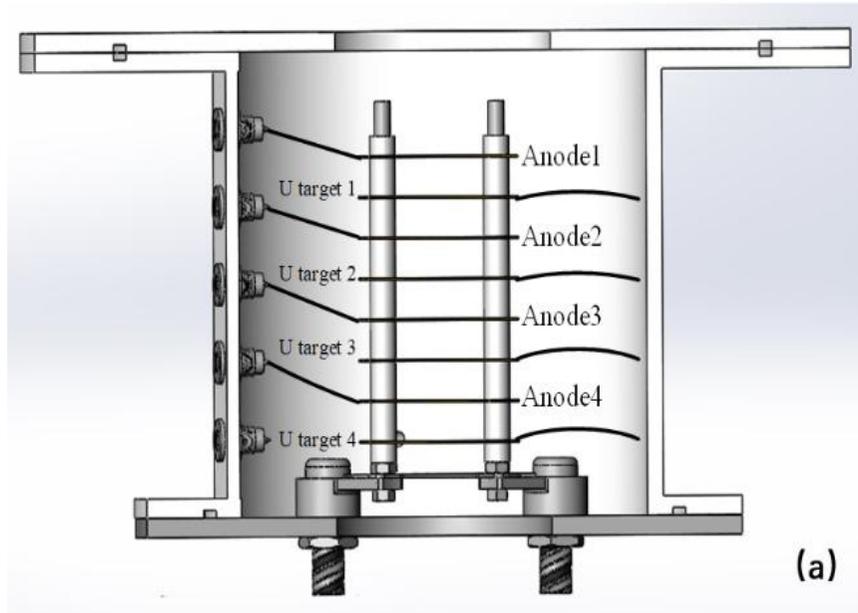


T0信号拾取

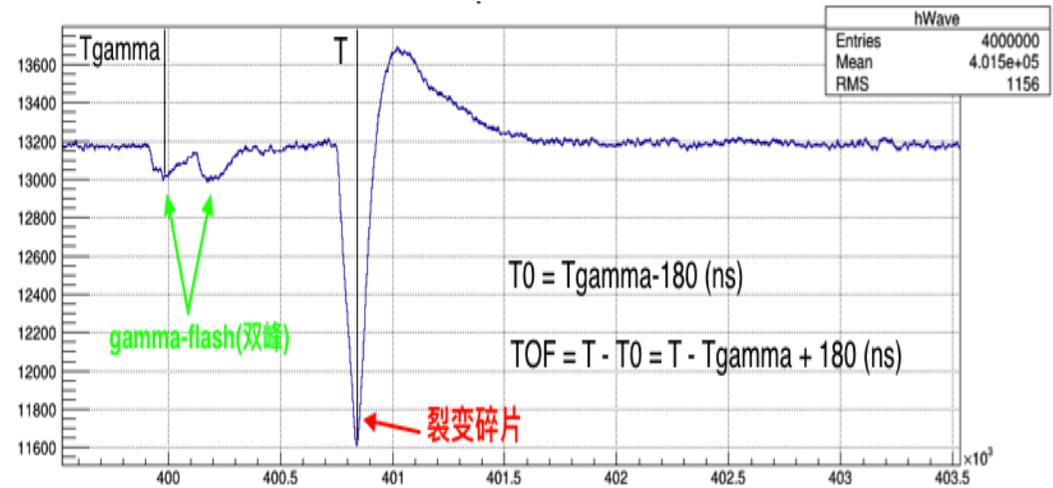
注量率监测
 ${}^6\text{LiF}+\text{Si}$ 探测器

能谱：裂变室
注量率：裂变室
剖面测量：照相系统，微结构探测器

中子能谱与注量率测量：多层裂变室



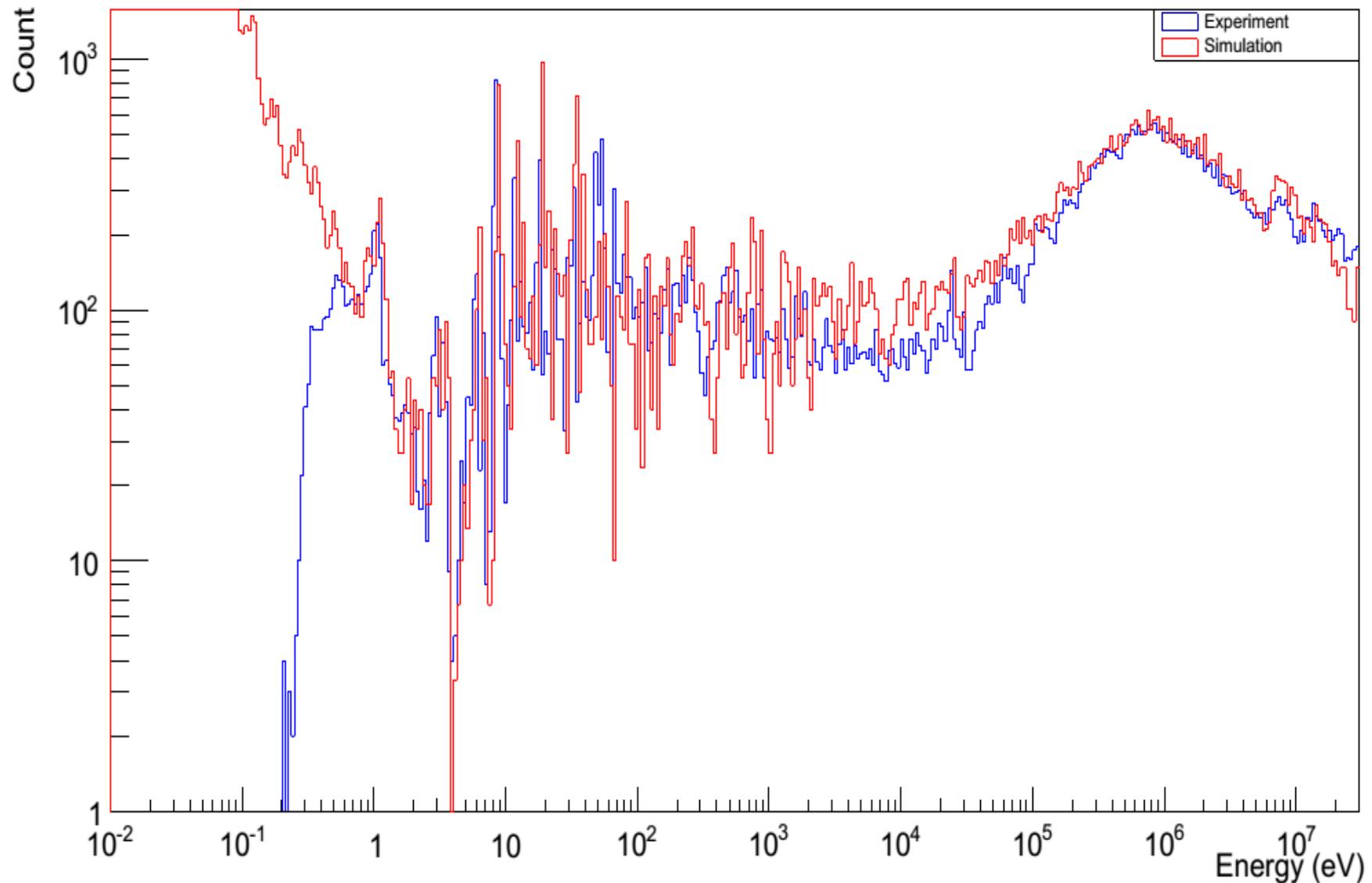
靶片编号	直径 (mm)	质量厚度 ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)
^{235}U -3	40	284.86
^{235}U -4	40	283.61
^{235}U -7	40	284.63



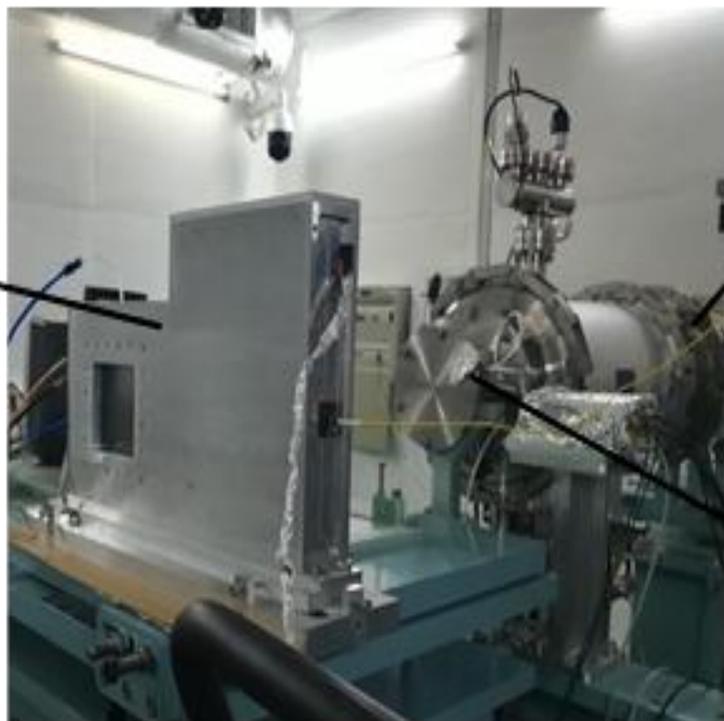
利用前放的T信号输出，成功解决伽马暴的问题

2017年11月，成功获得了CSNS Back-n的中子能谱初步结果

Fission Rate (CSNS-WNS)



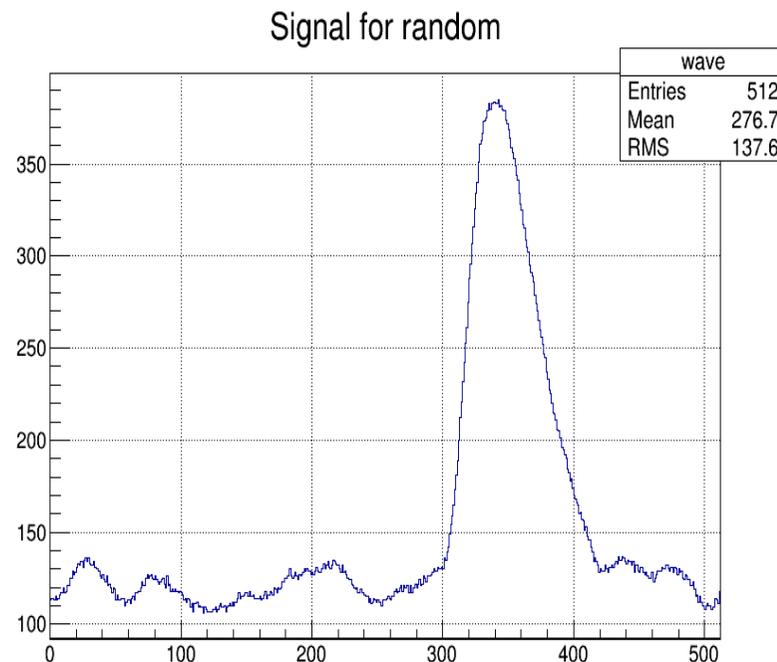
束流剖面测量： MicroMegas



MicroMegas探测器

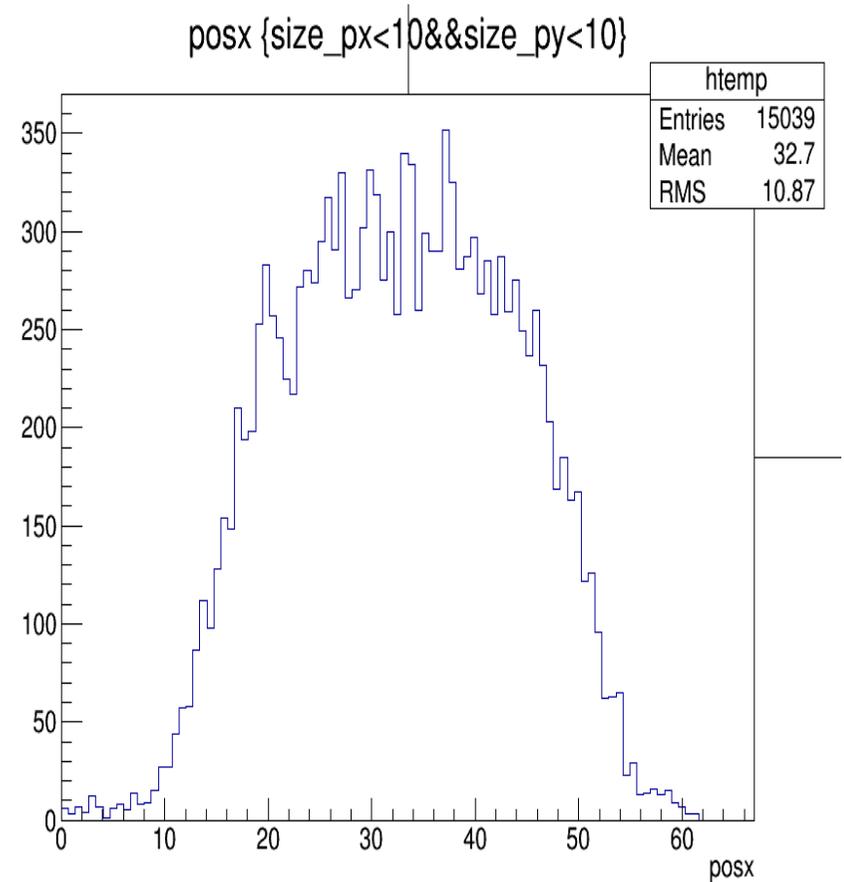
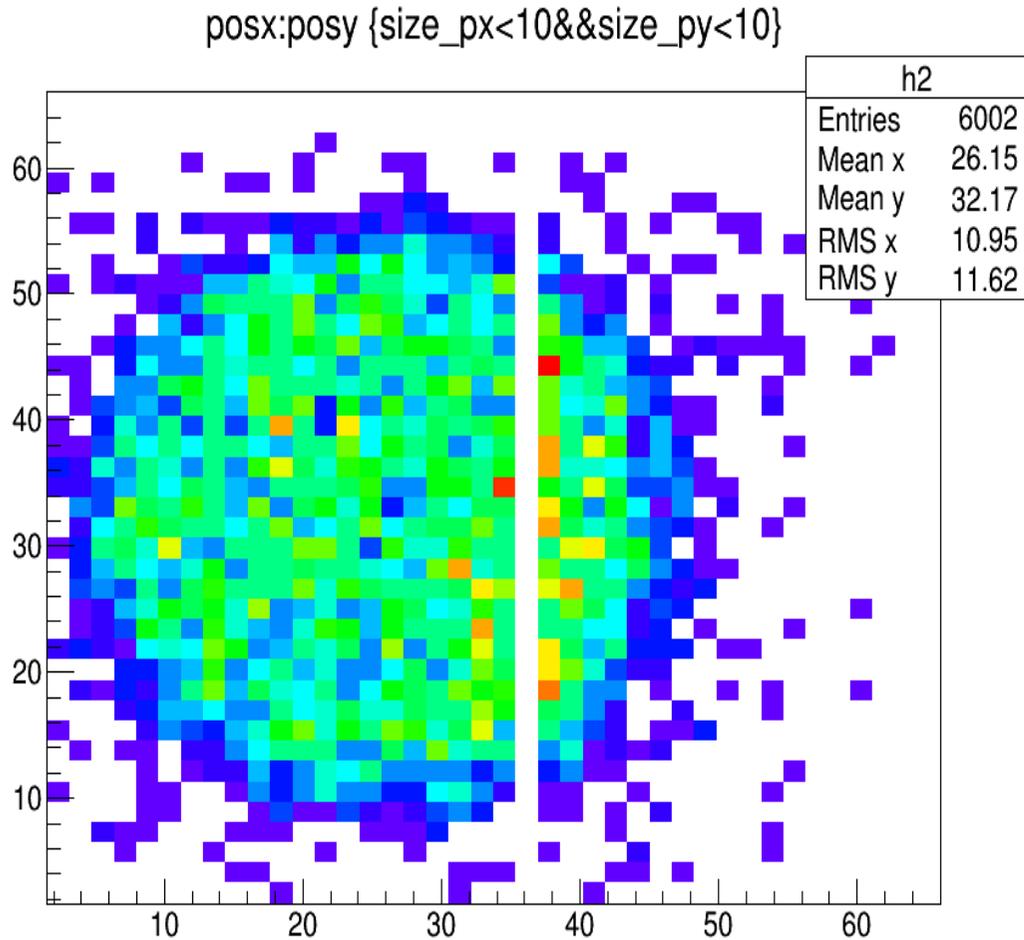
Li-Si探测器

多层裂变室



MicroMegas探测器照片和典型的读出条信号

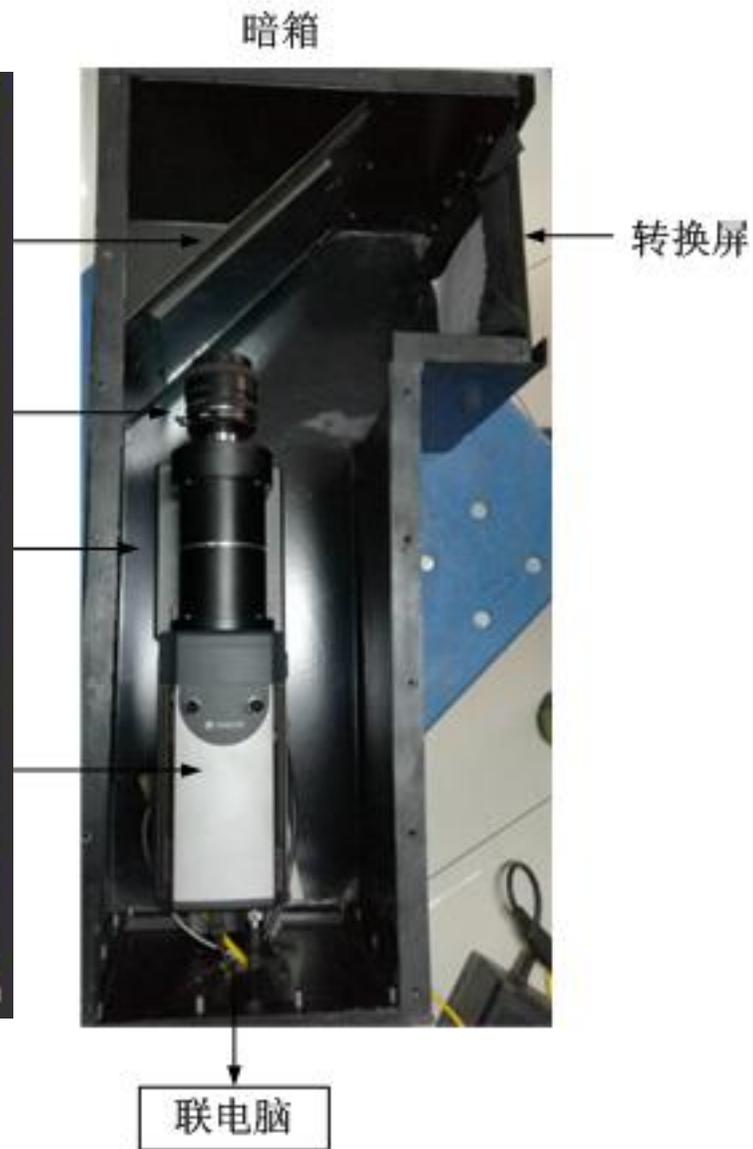
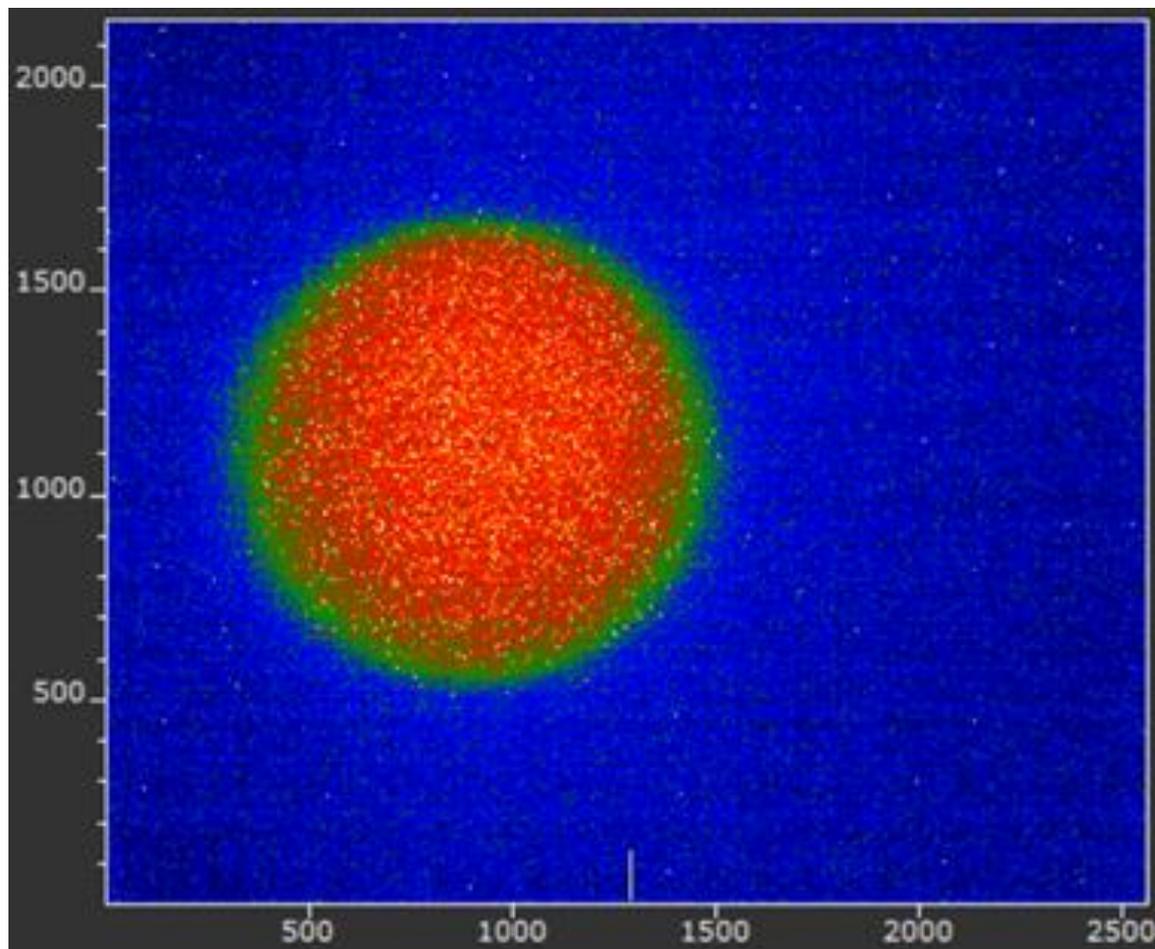
MicroMegas



MicroMegas探测器得到的中子束斑图像

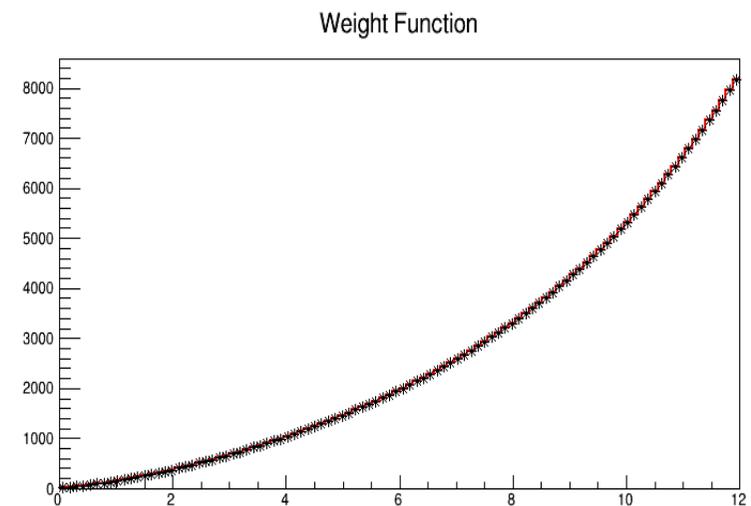
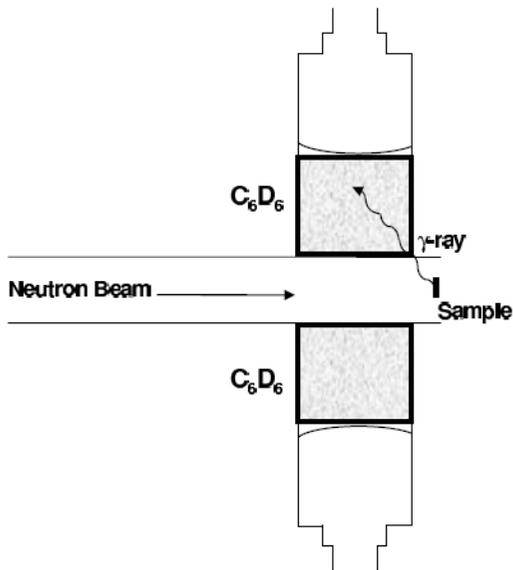
束斑分布图像在X方向的投影

束流剖面测量：CCD相机



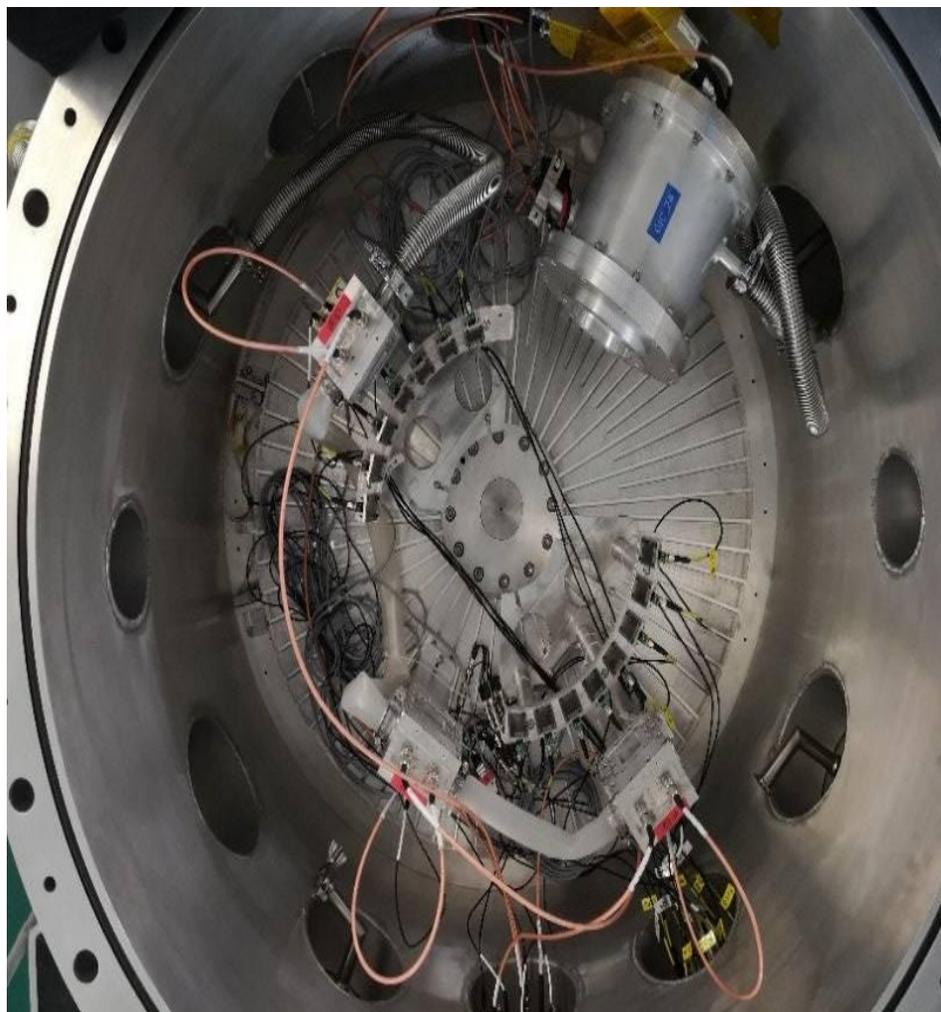
C6D6探测系统

- 用于中子俘获截面测量
- 采用氘代液闪
 - 对中子的灵敏度低
 - 通过引入权重函数，可以使得探测效率与伽马能量成正比

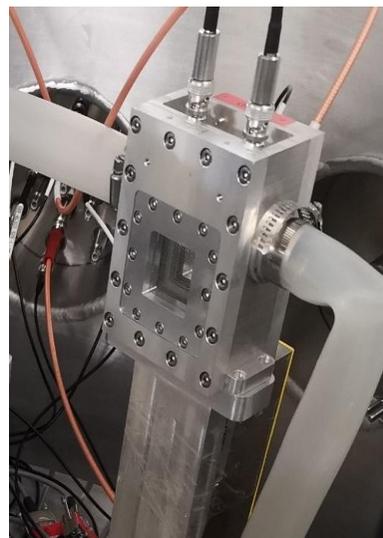


LPDA探测系统

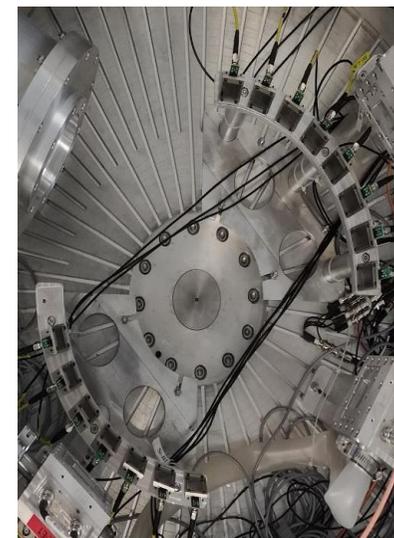
(n,x)反应截面测量



带电粒子探测器系统



$\Delta E-E$ 探测器



硅阵列探测器



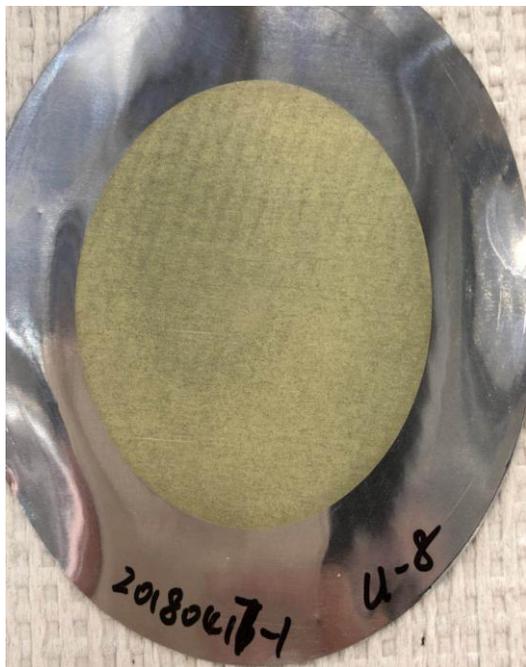
屏栅电离室

探测器系统包括3套 $\Delta E-E$ 探测器，15路硅组成的硅阵列探测器和1个屏栅电离室探测器。

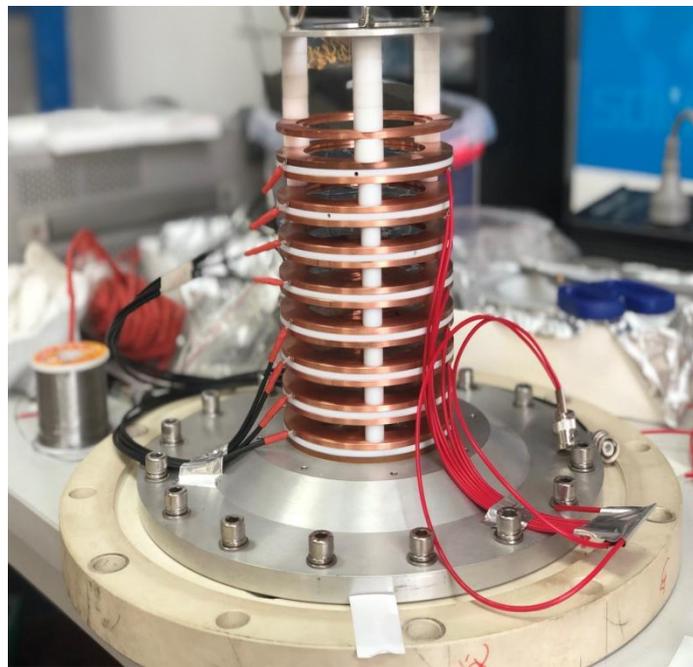
FIXM(裂变截面测量谱仪)

- 多层快裂变电离室

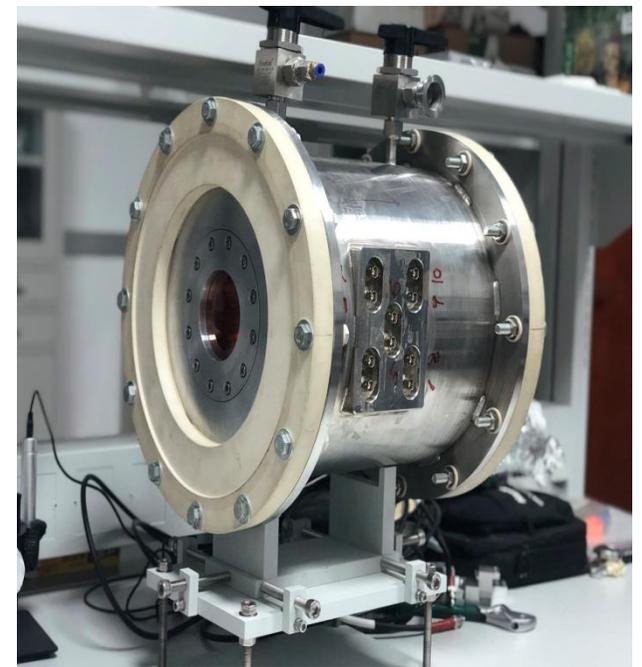
高纯裂变核素镀片



多层裂变室内部



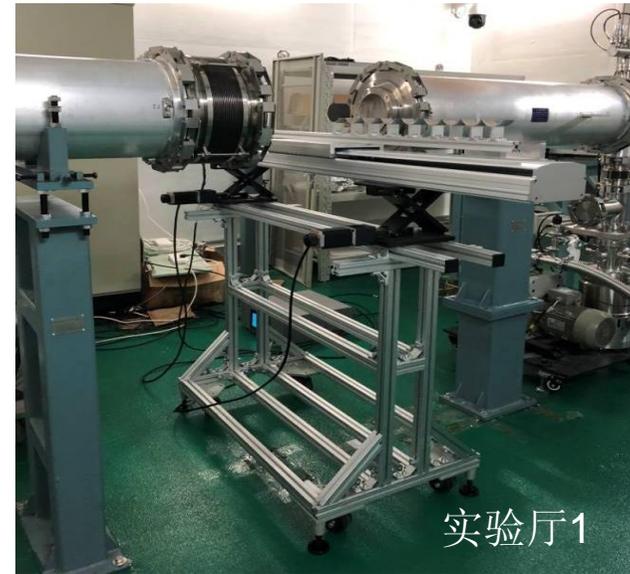
多层裂变室外部



镀层直径
50mm, 厚度
~300ug/cm²

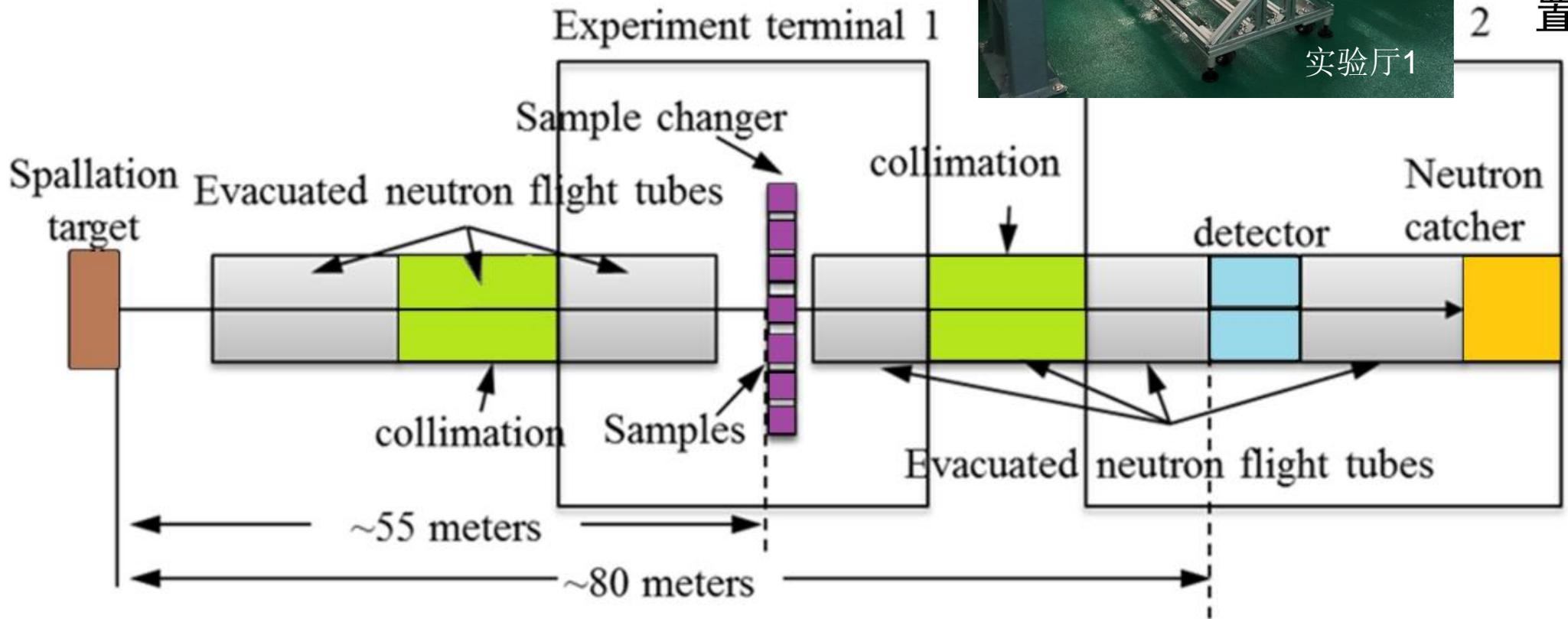
NTOX (全截面测量谱仪)

- 使用多层快裂变室作为中子探测器；
- 使用换样装置对有样/无样进行切换；
- $\phi 60\text{mm}/\phi 30\text{mm}$ 束斑。

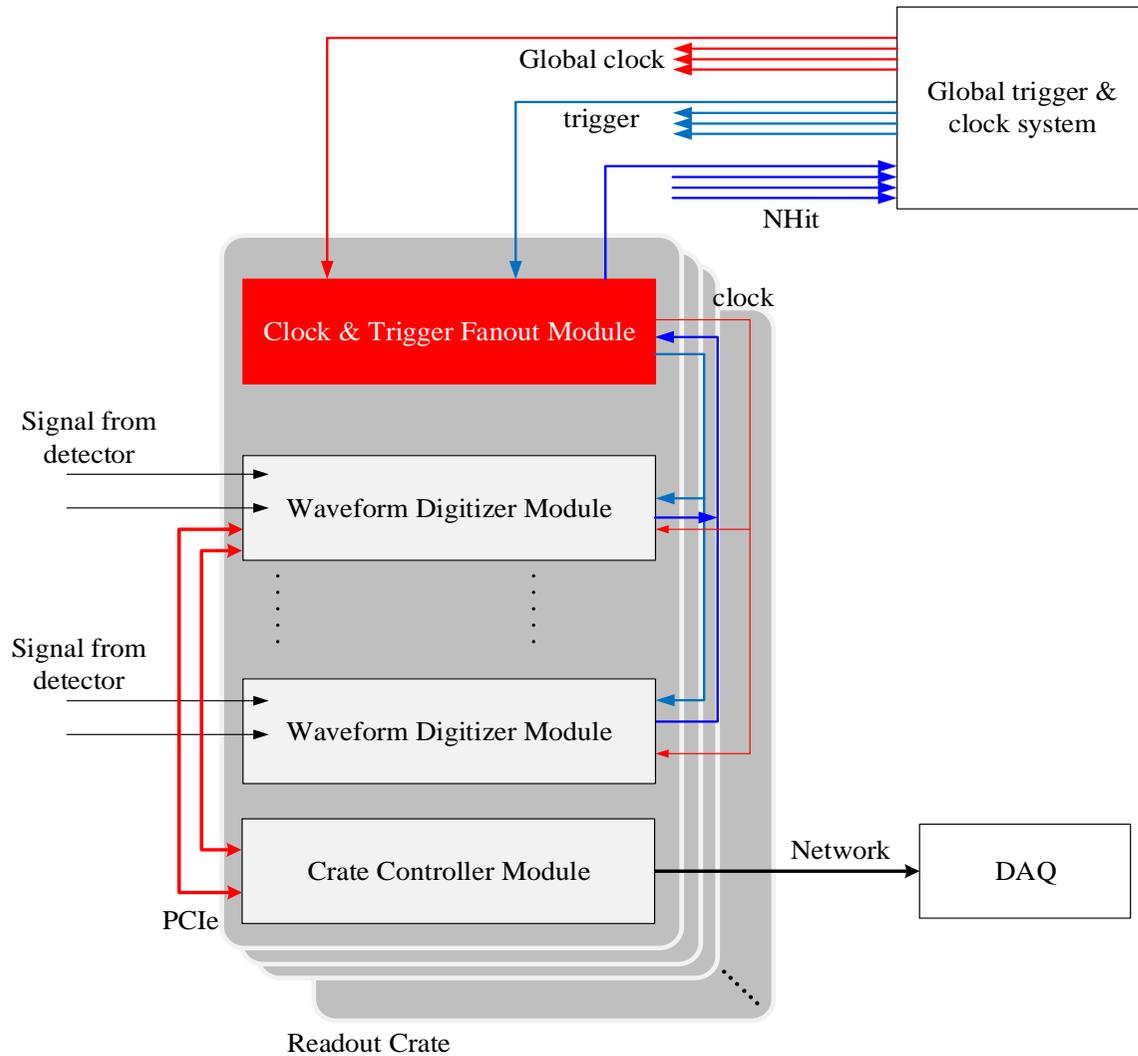


石墨及换样装置

实验厅1

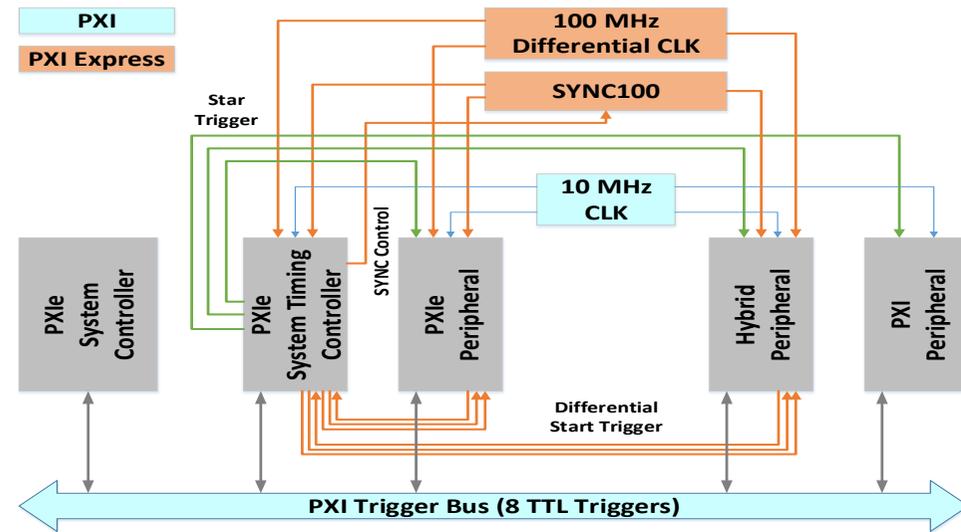


读出电子学: 1GS/s, 12 bit全波形采样



基于PXIe平台的数据读出架构

- 基于新型PXIe串行总线平台的数据读出
 - PCIe高速串行总线:
 - 多插件数据并行传输
 - 背板高性能专用差分线路:
 - 时钟及触发分发
 - 高速串行化时钟、触发融合传输:
 - 优化同步架构
 - 多机箱网络连接:
 - 可靠、灵活的分布式读出架构



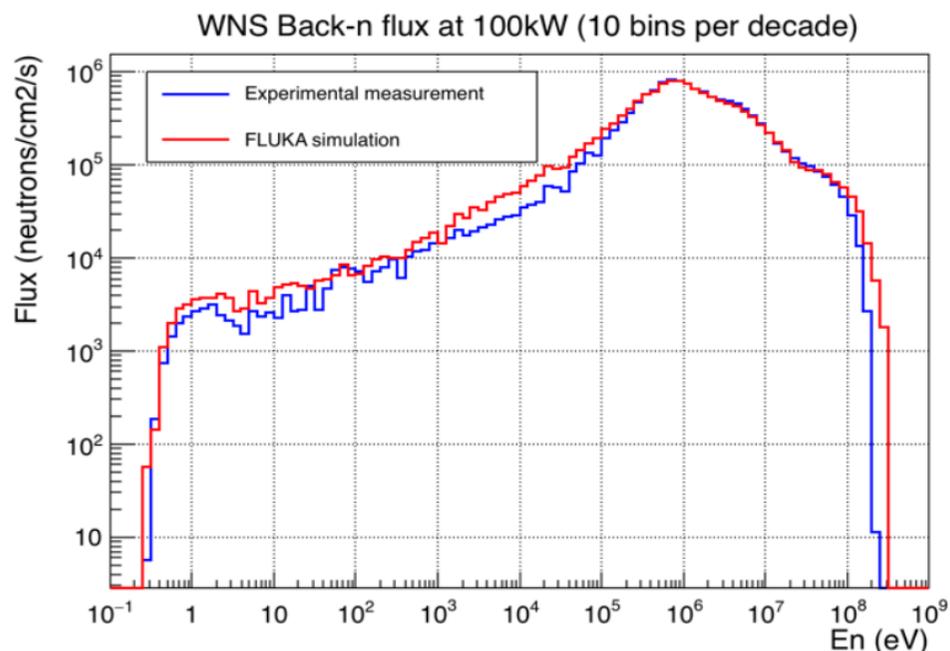
PXIe背板总线

三、物理实验进展

关键时间节点安排

- 2017年8月，11月：探测器测试
- 2017年12月底至2018年3月底：束流参数测量（能谱、注量率、剖面、本底等等）
- 2018年3月底至4月初：中子俘获截面测量的首个实验
- 2018年4月26开始至7月初： ^{236}U 裂变截面测量及 $^6\text{Li}(n,\alpha)$ 反应截面测量
- 2018年下半年，对外开放，已有1000多小时的实验在排队。

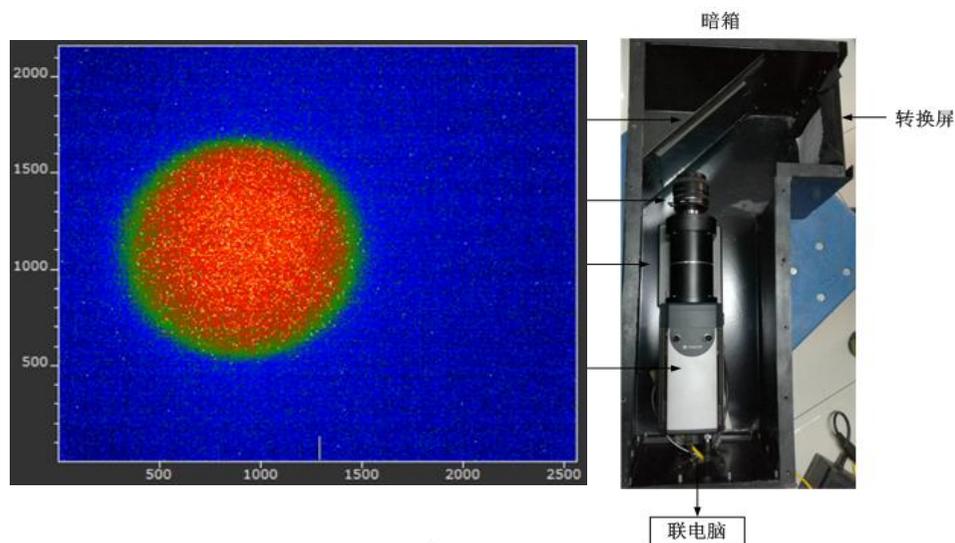
截止目前，束线参数测量已基本完成



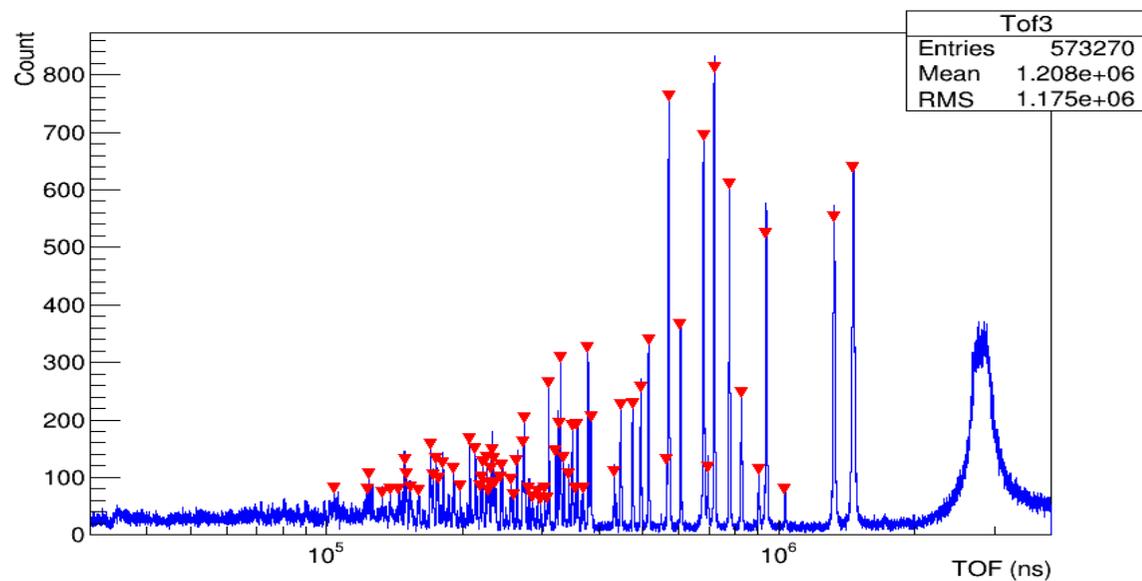
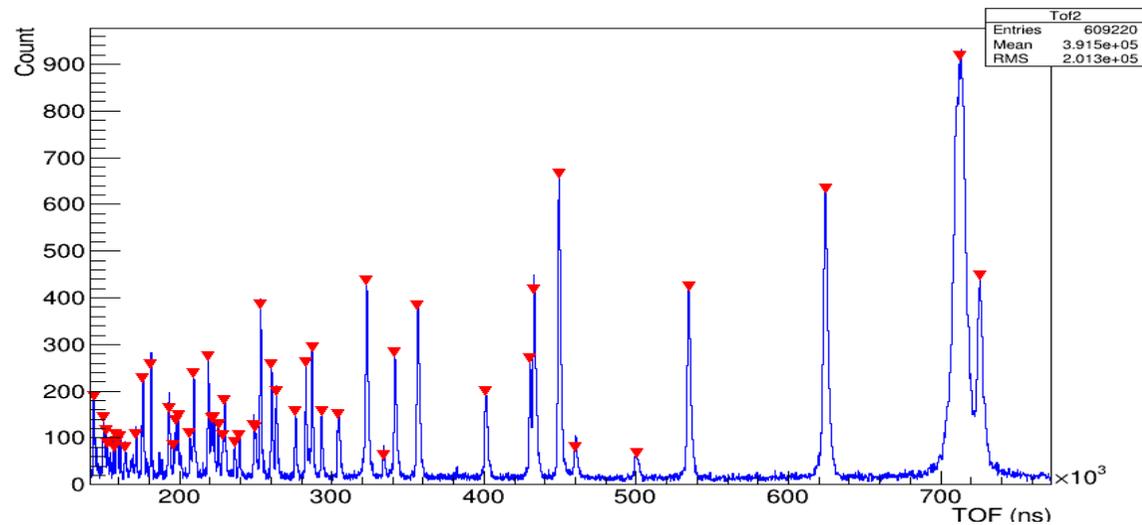
能谱： eV至100 MeV

注量率： 约 8×10^5 /cm²/s (10 kW, $\Phi 60$ 束斑)

束斑： $\Phi 30$, $\Phi 60$, 90×90 mm

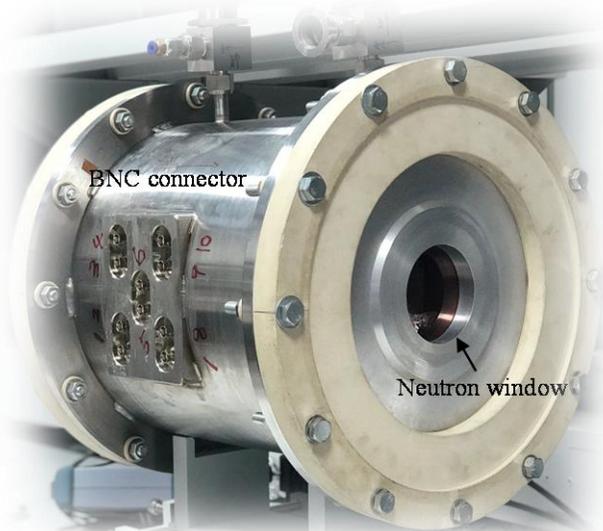


2018. 4. 4, 第一个物理实验完成 (169Tm(n, g) 反应截面测量, 是我国首个共振区中子核数 据测量实验)



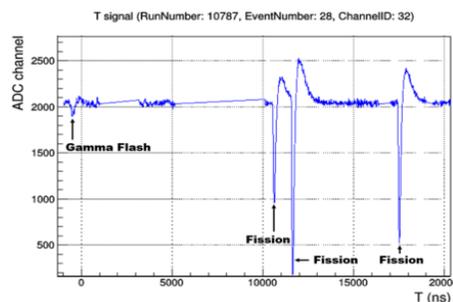
裂变截面测量首个实验进展

首个实验使用的多层快裂变室

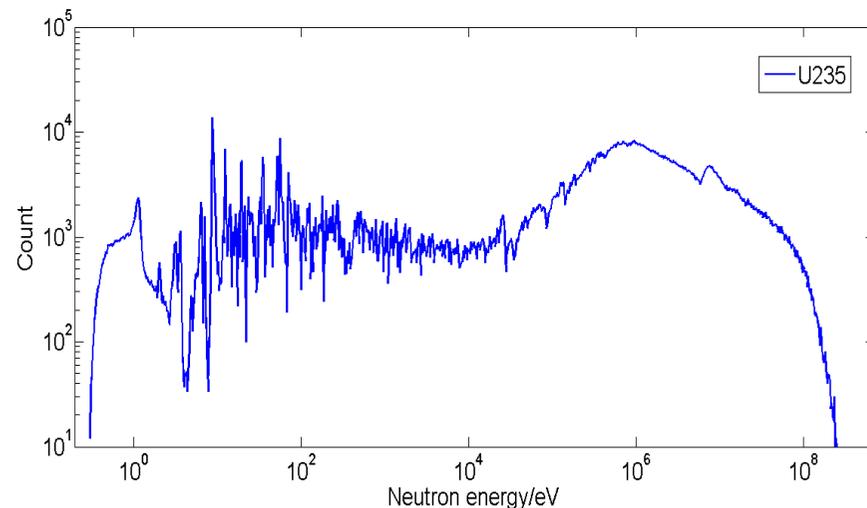


- ▶ 样机内装:
 - 高纯U235镀片*3层
 - 高纯U238镀片*3层
 - 高纯U236镀片*1层
 - 纯底衬片*1层

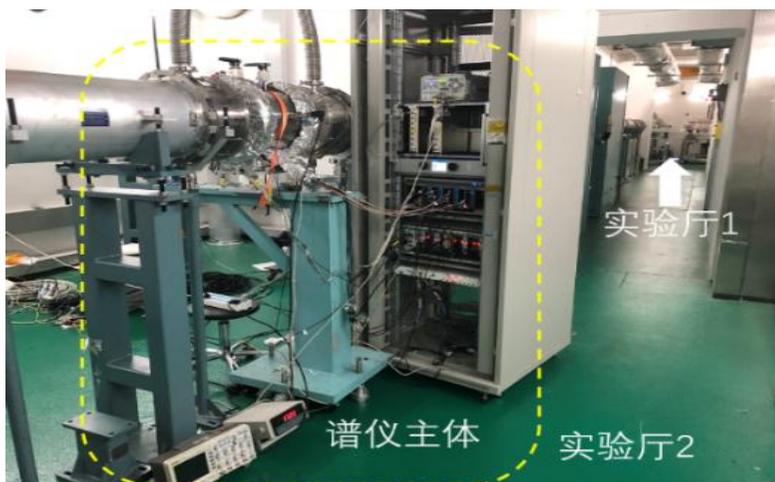
▶ U235波形:



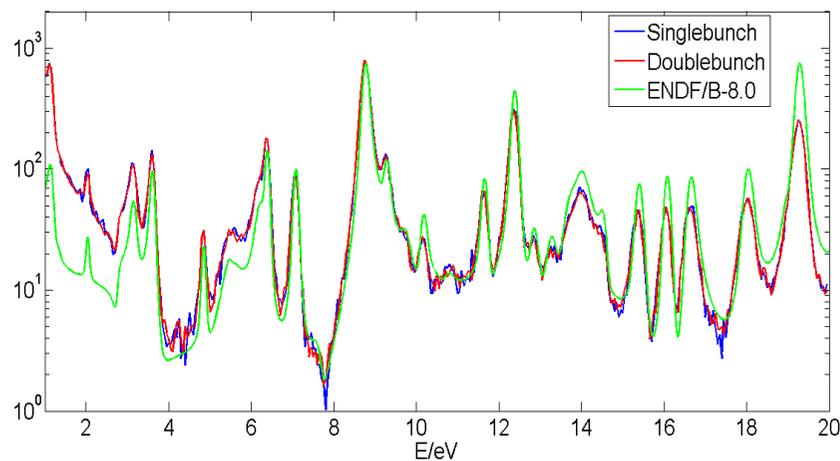
• 单束团白光中子诱发U235裂变计数-中子能谱



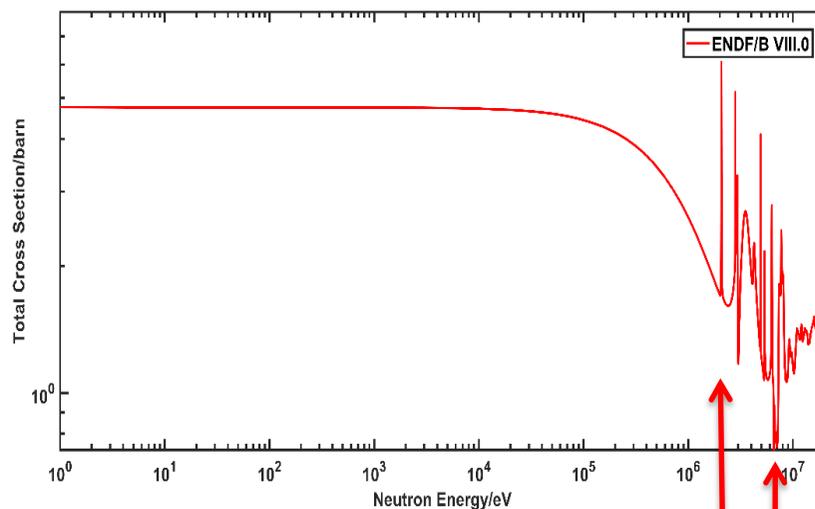
FIXM安装在反角白光束线上



• U235低能共振峰与ENDF/B-8.0的完全吻合

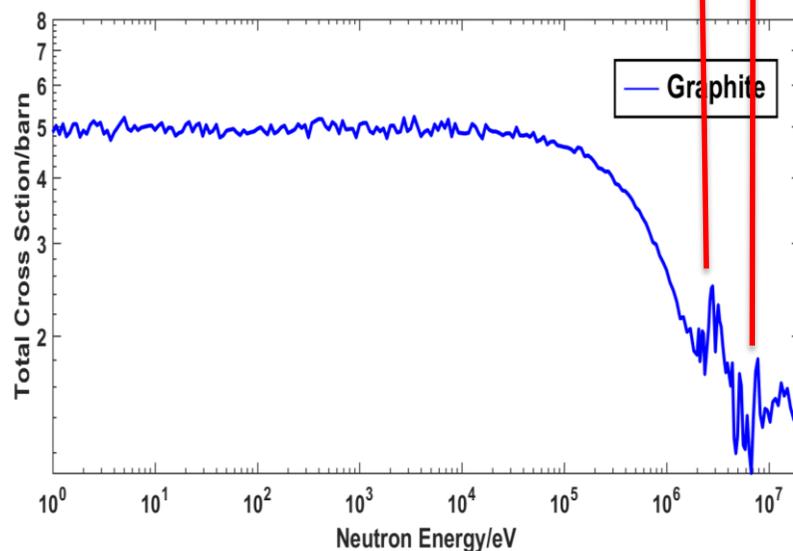


全截面测量首个实验进展



- 样品：石墨、铝；

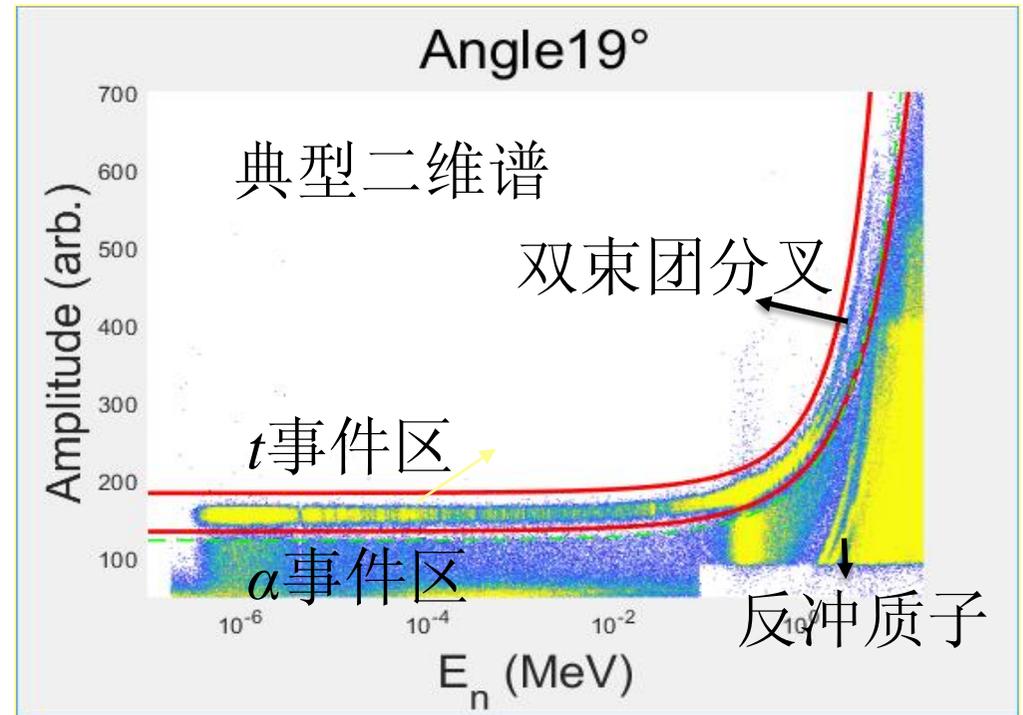
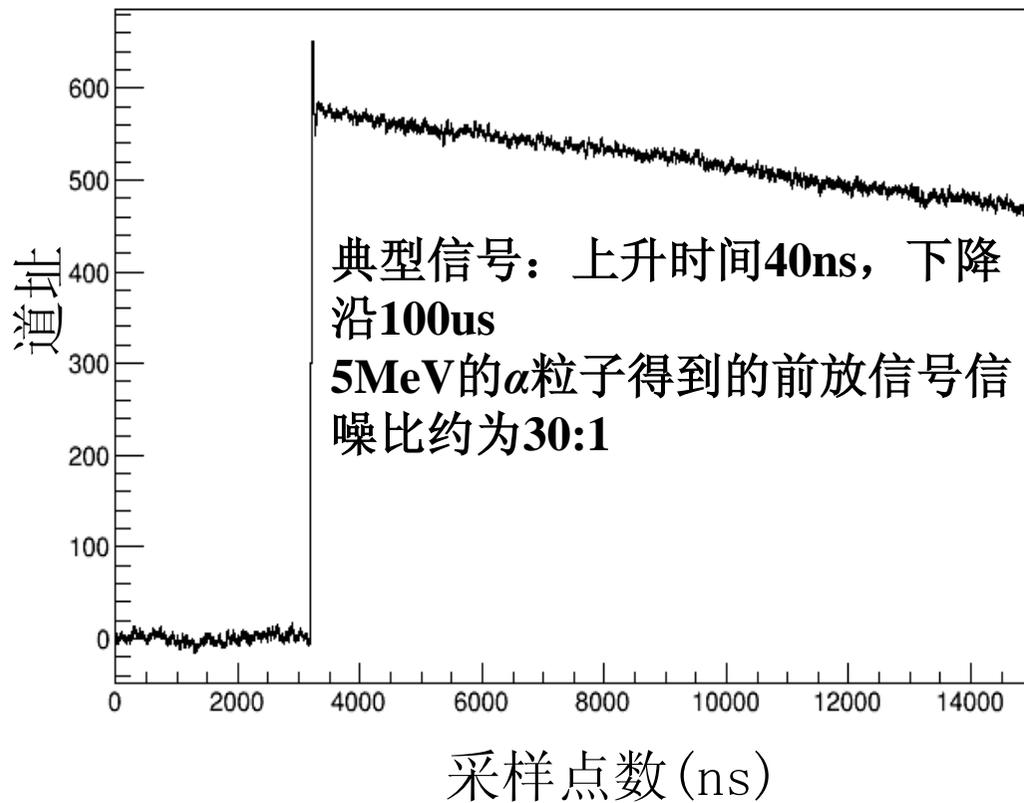
• U235裂变室石墨全截面实验



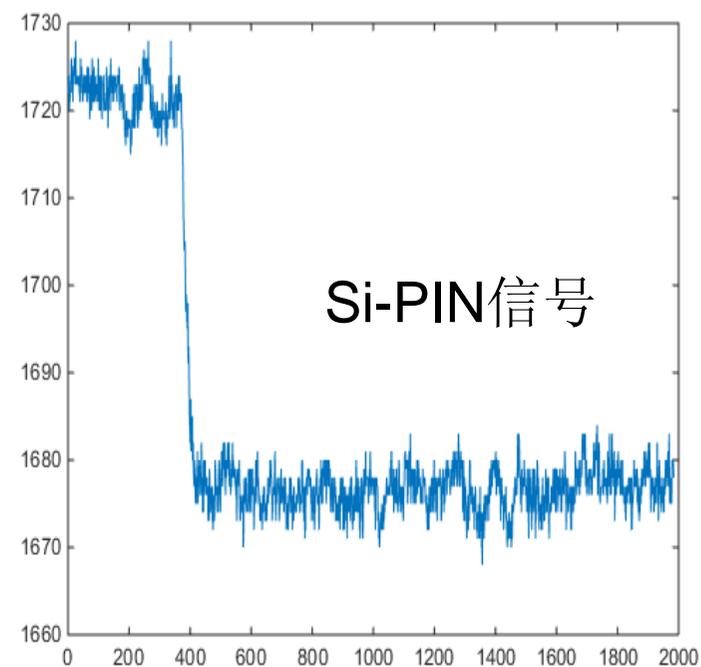
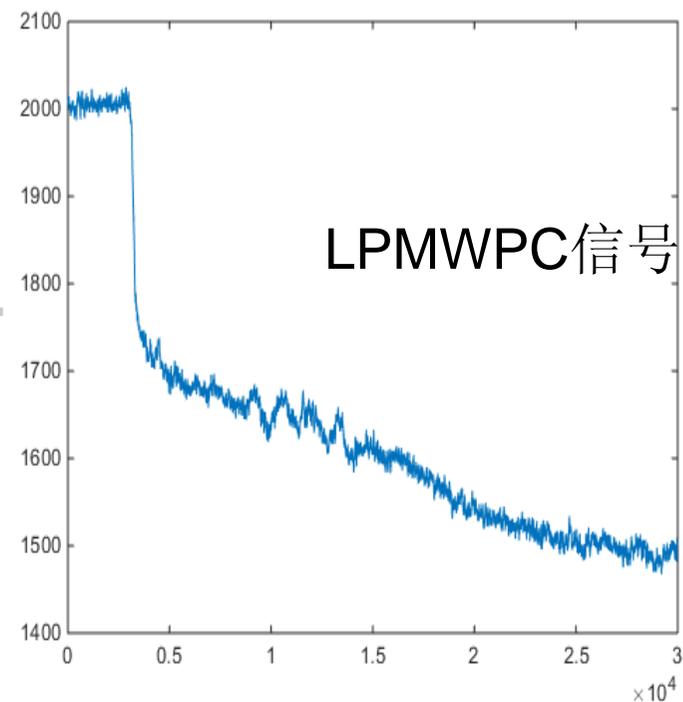
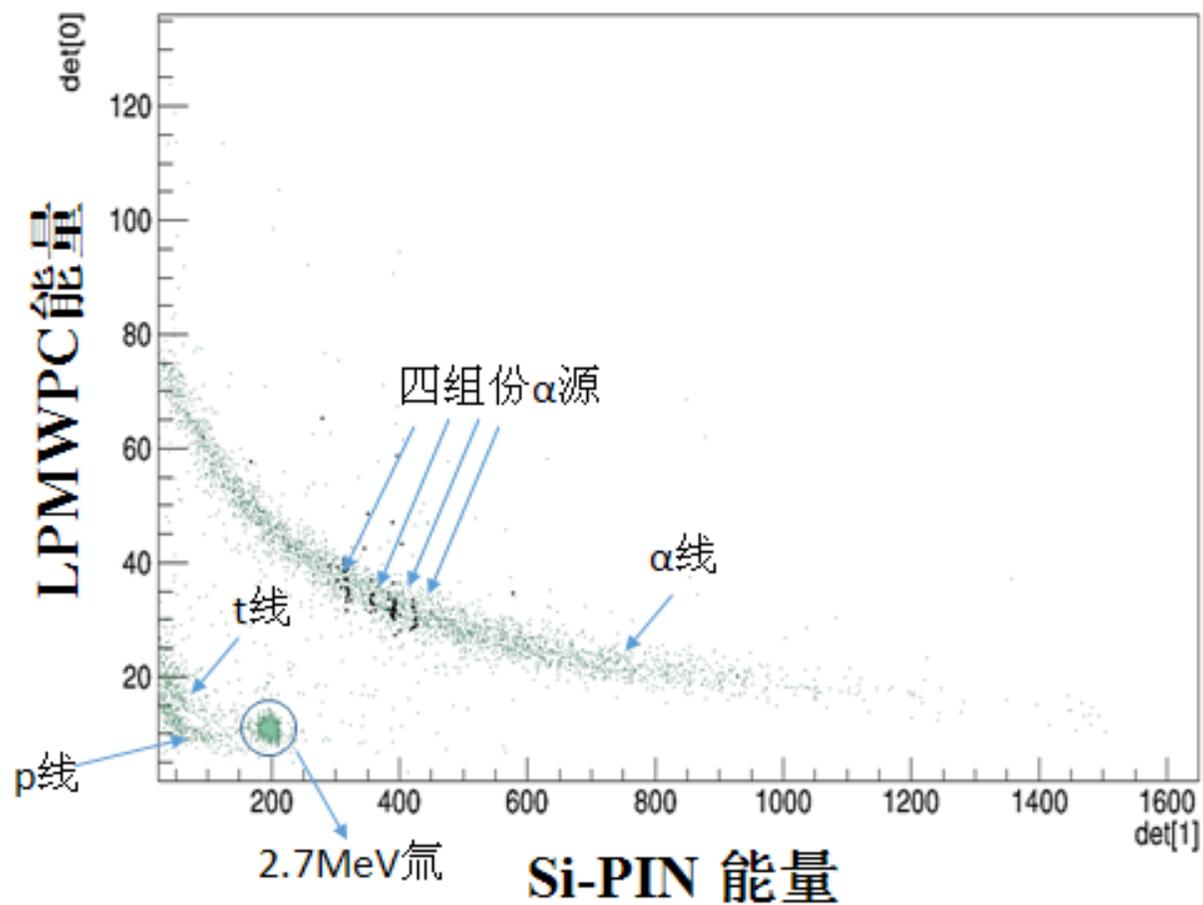
共振峰可见，能量吻合
双束团导致峰值降低和展宽
截面数值基本吻合，略低

利用LPDA谱仪，完成了 $6\text{Li}(n, \alpha)$ 及 $10\text{B}(n, \alpha)$ 反应截面测量

Si探测器信号及能谱

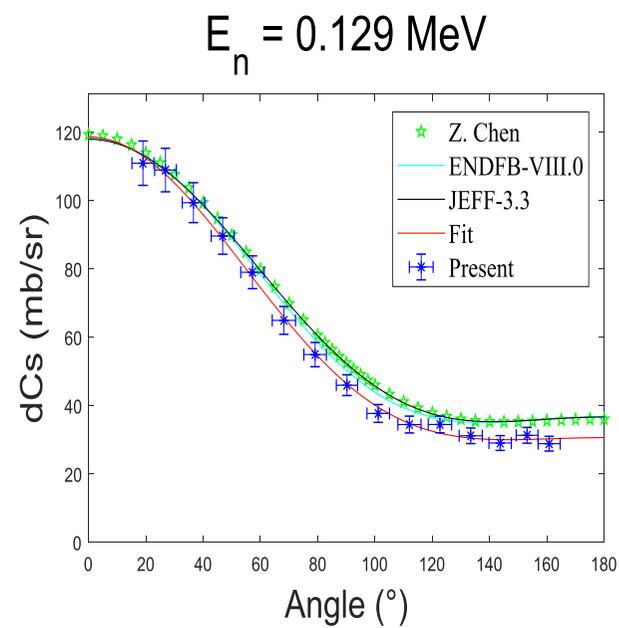
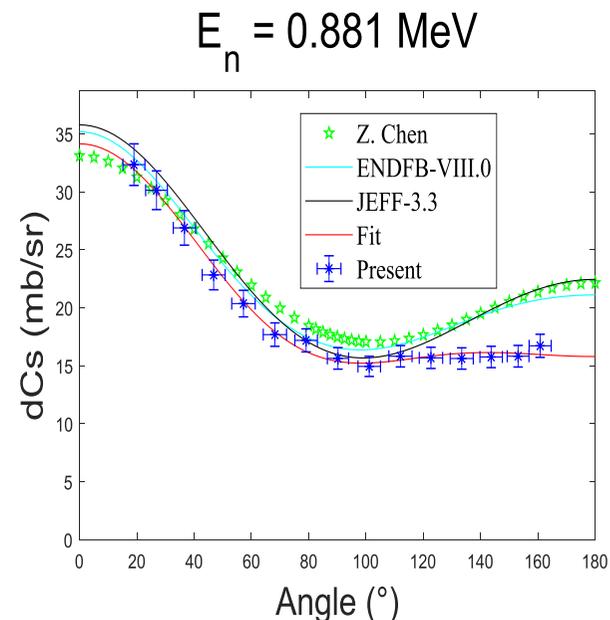
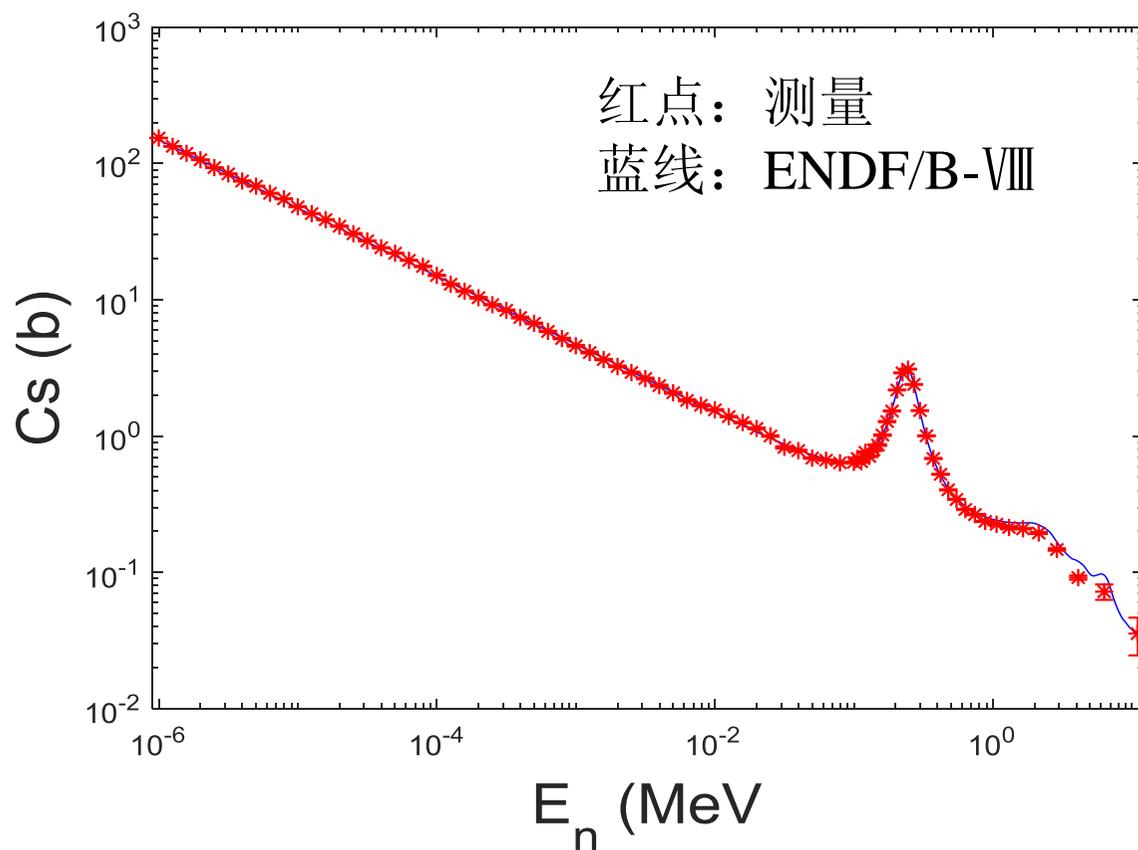


ΔE -E 探测器



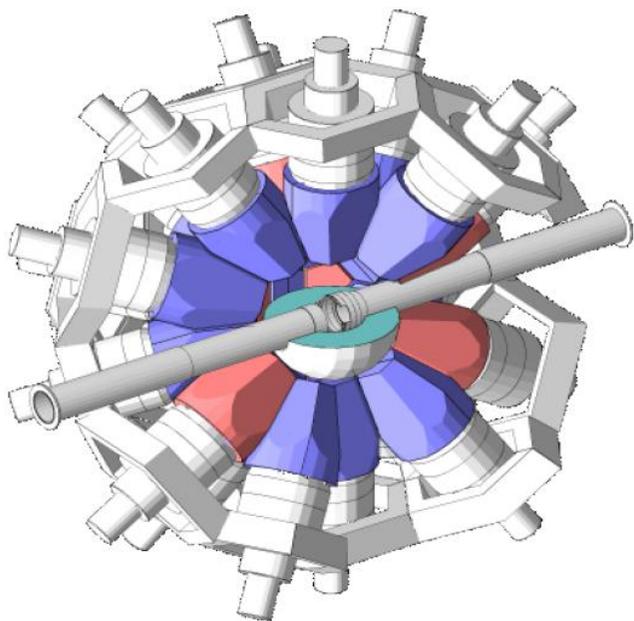
初步实验结果:

- 基于白光中子源，搭建了LPDA探测阵列
- 测量到的 ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$ 截面在0.24 MeV的共振峰和1/V区与评价结果符合的很好，这验证了测量系统的可靠性
- 在3MeV以下，得到了系统的微分截面和积分截面

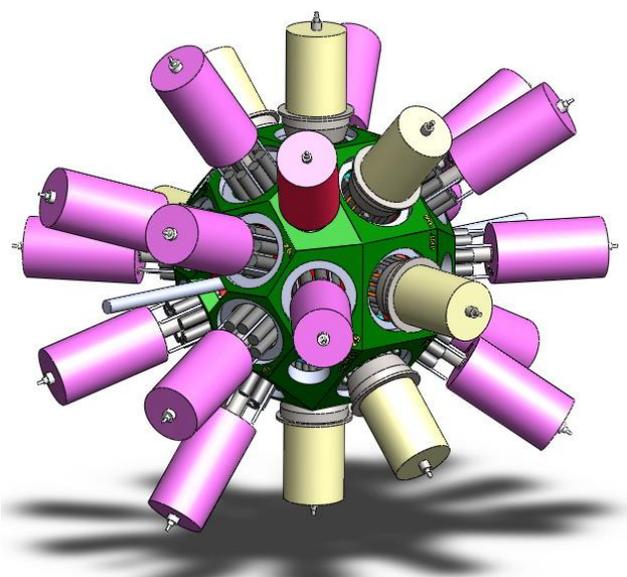


探测器系统后续规划

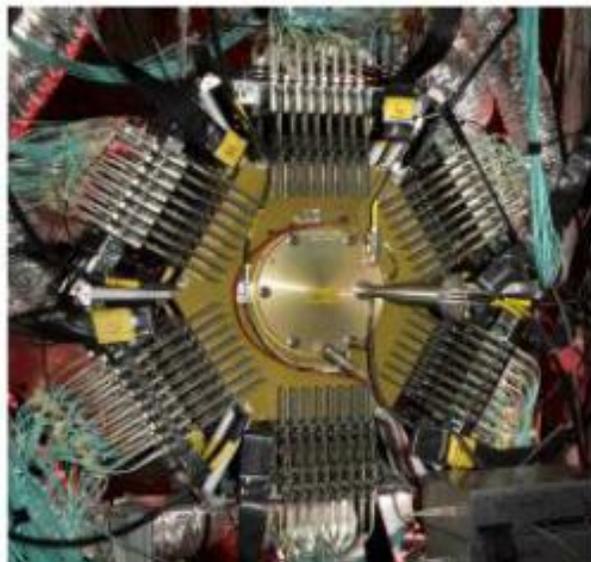
(n, γ) 反应截面测量系统



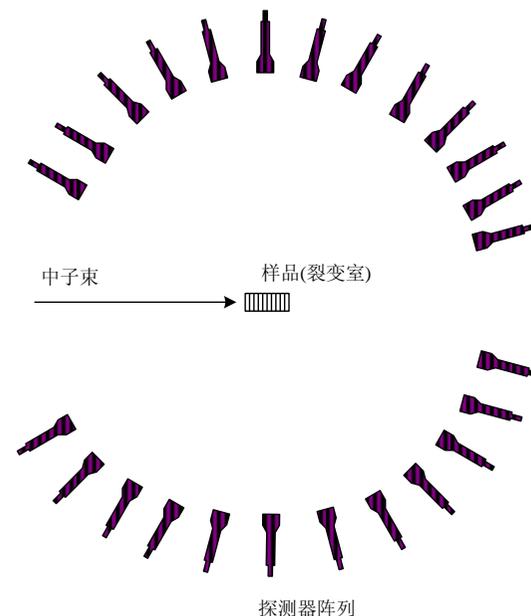
伽玛探测器阵列



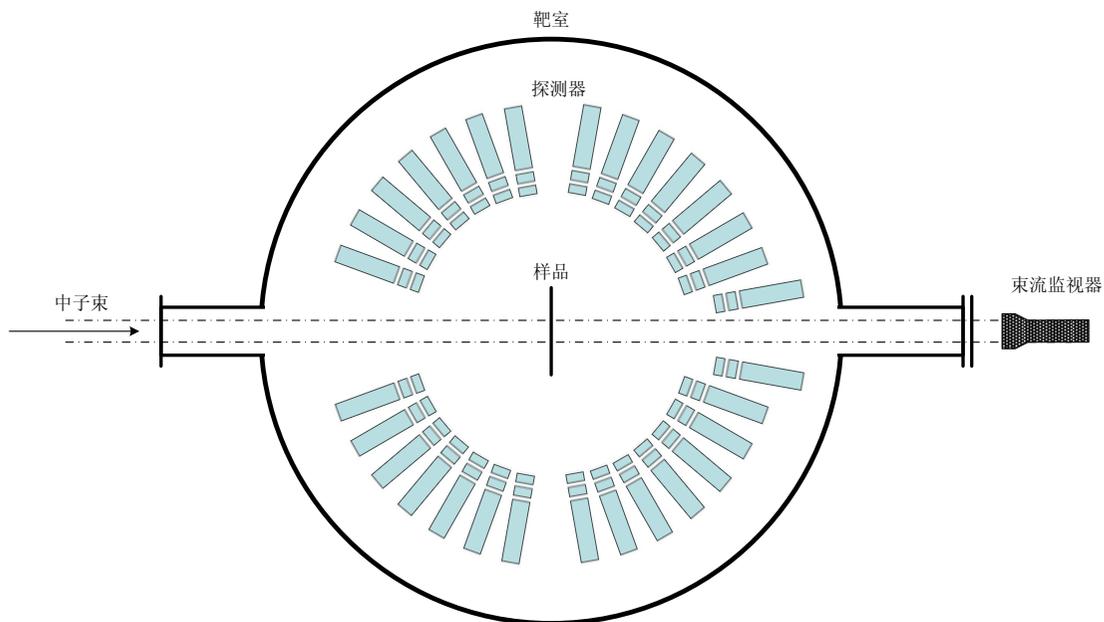
裂变截面测量系统



裂变瞬发中子测量系统



带电粒子探测器阵列



小结

- 建成了我国首个宽能区白光中子源；
- 束线参数测量及首批物理实验的探测器全部研制完成，首批物理实验全部完成。
- 后续探测系统的升级计划正在进行中，同时束线已对外开放，下半年已安排1000多小时的束流时间。

谢谢

欢迎批评指正