

Be-9和天然铁的中子全截面实验研究

报告人：白江博

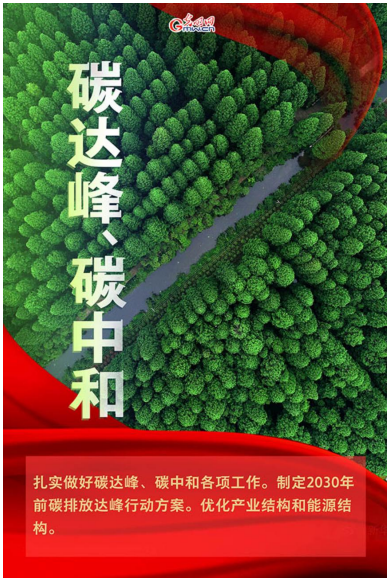
单位：中国核动力研究设计院

日期：2025 年 7 月 23 日

中国核动力
工程研究所
白江博

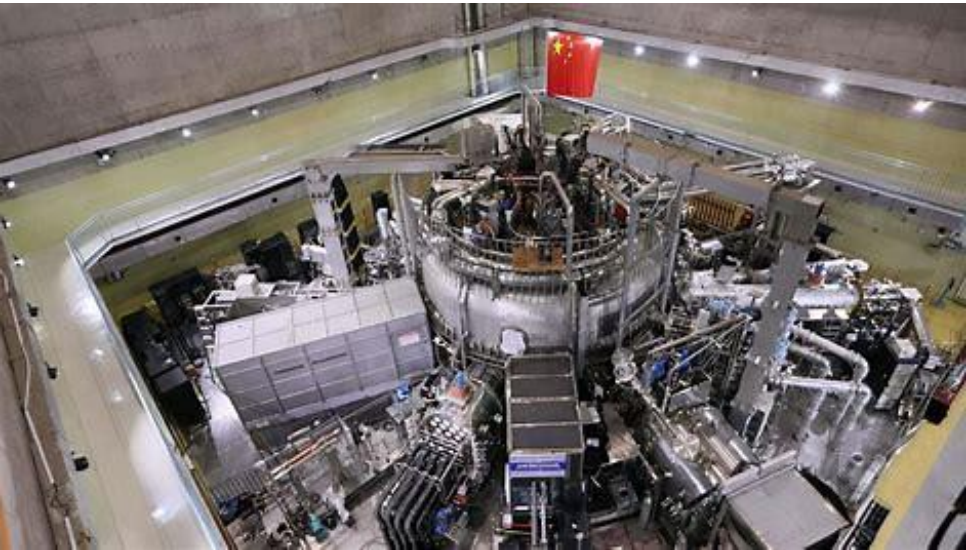
- 01 研究背景与现状
- 02 实验方法与数据处理方法
- 03 ^9Be 中子全截面实验研究
- 04 $^{\text{nat}}\text{Fe}$ 中子全截面实验研究
- 05 总结

01 | 研究背景与现状



我宣布中国将力争于 2030 年前实现二氧化碳排放达到峰值、2060 年前实现碳中和，这意味着中国作为世界上最大的发展中国家，将完成全球最高碳排放强度降幅，用全球历史上最短的时间实现从碳达峰到碳中和。这无疑将是一场硬仗。中方言必行，行必果，我们将碳达峰、碳中和纳入生态文明建设整体布局，全面推行绿色低碳循环经济发展。

——2021年4月16日，
习近平在中法德领导人视频峰会上的讲话



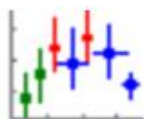
系统	功率等级/MWe	冷却剂	出口温度/℃	燃料循环	中子范围
超高温气冷堆	250 ~ 300	氦	900 ~ 1000	开式	热中子
气冷快堆	1200	氦	850	闭式	快中子
钠冷快堆	50 ~ 150 300 ~ 1500 600 ~ 1500	钠	500 ~ 550	闭式	快中子
铅冷快堆	20 ~ 180 300 ~ 1200 600 ~ 1000	铅	480 ~ 570	闭式	快中子
超临界水冷堆	300 ~ 700 1000 ~ 1500	水	510 ~ 625	开式/闭式	热/快中子
熔盐堆	1000	氟化物盐	700 ~ 800	闭式	热/快中子

中子全截面

新一代核能系统的设计和运行对中子反应截面数据的**数量、质量和种类**提出了**更高的需求**，尤其是对中子全截面数据的需求。

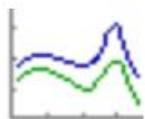
是描述中子与核相互作用的基本量,是中子和物质相互作用的**概率总和**。

● 被誉为**最基础的中子反应截面**，在核物理基础科学、核技术应用、**核能工程与核临界装置设计**领域中有着重重要的作用。



EXFOR

Experimental nuclear reaction data

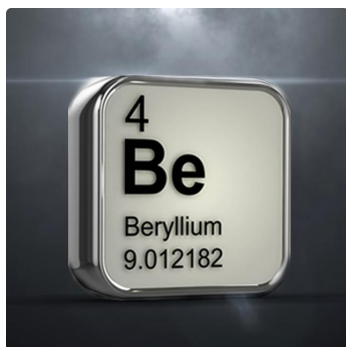


ENDF

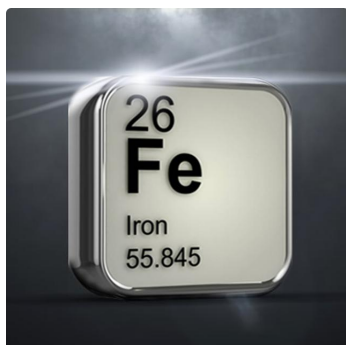
Evaluated nuclear reaction libraries



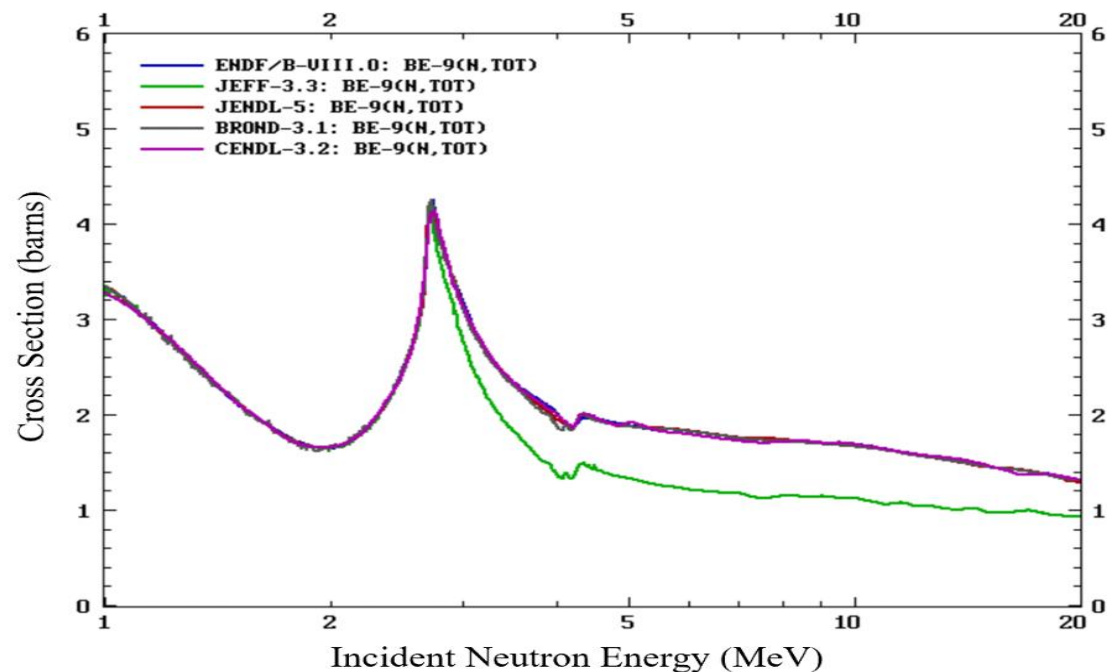
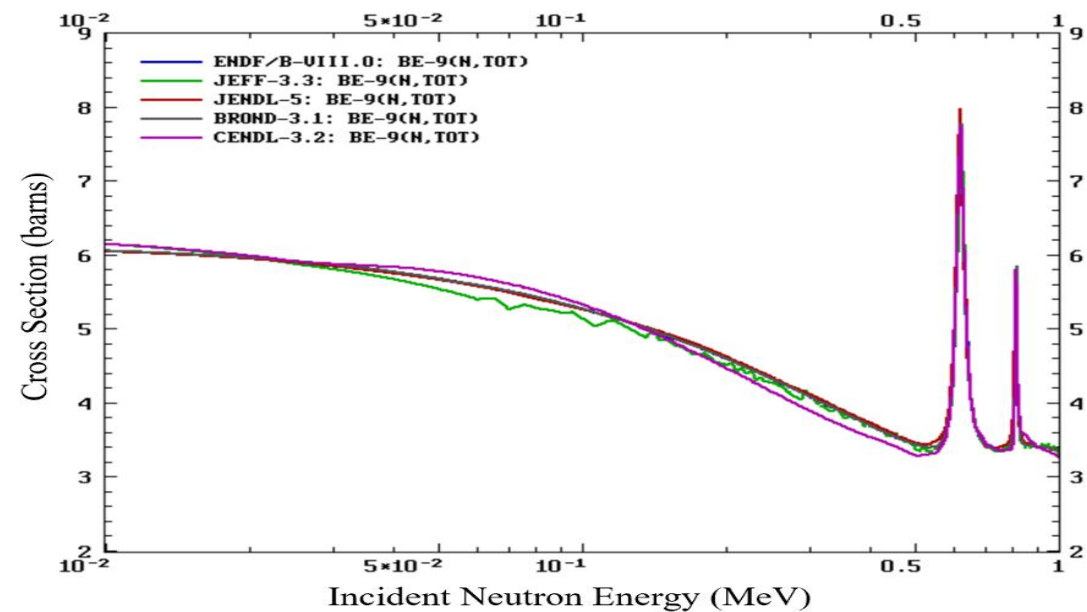
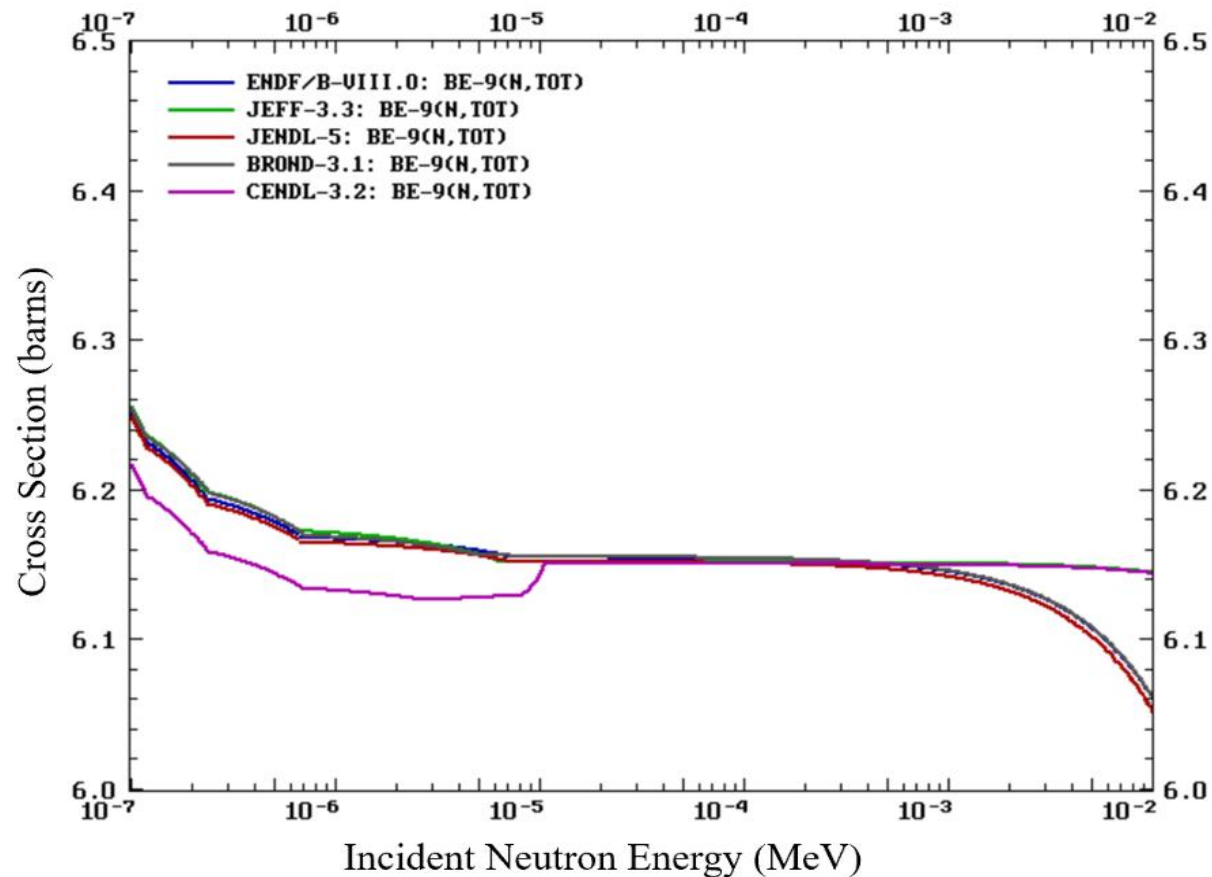
Be、Fe是核系统相关材料中使用最多的几种材料



Be金属的原子序数较低，具有很小的热吸收截面，能够在反应堆中用作中子慢化剂和中子反射层来使用，也可以在中子增值包层材料中作为一种面向高温等离子体的材料，在聚变堆设计中扮演非常重要的中子增殖作用。



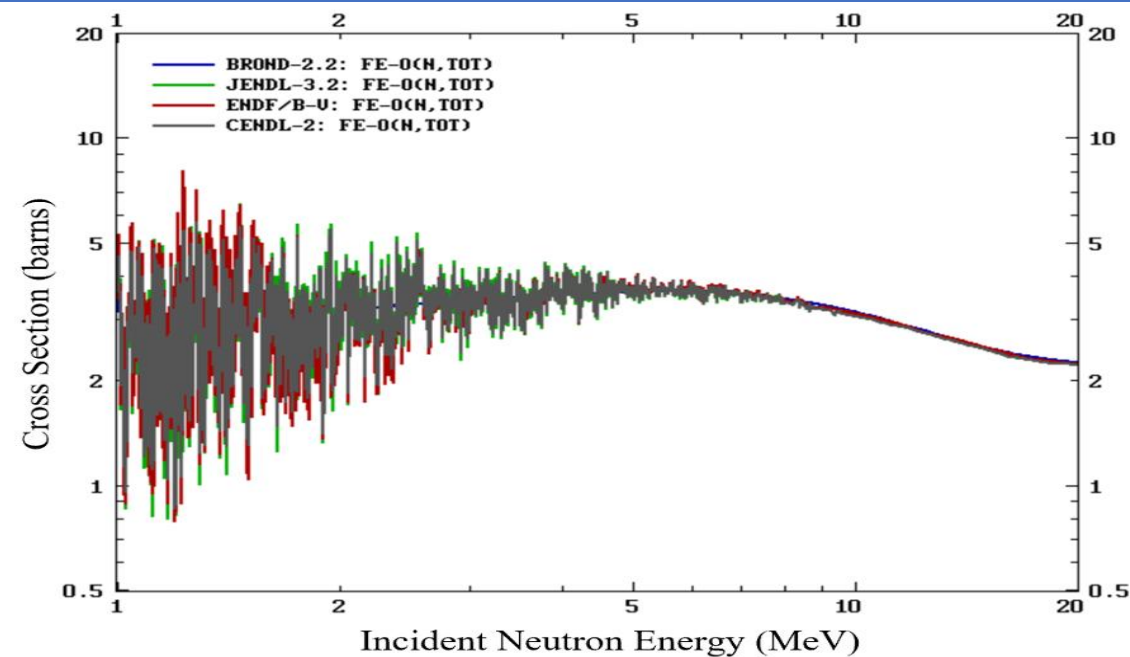
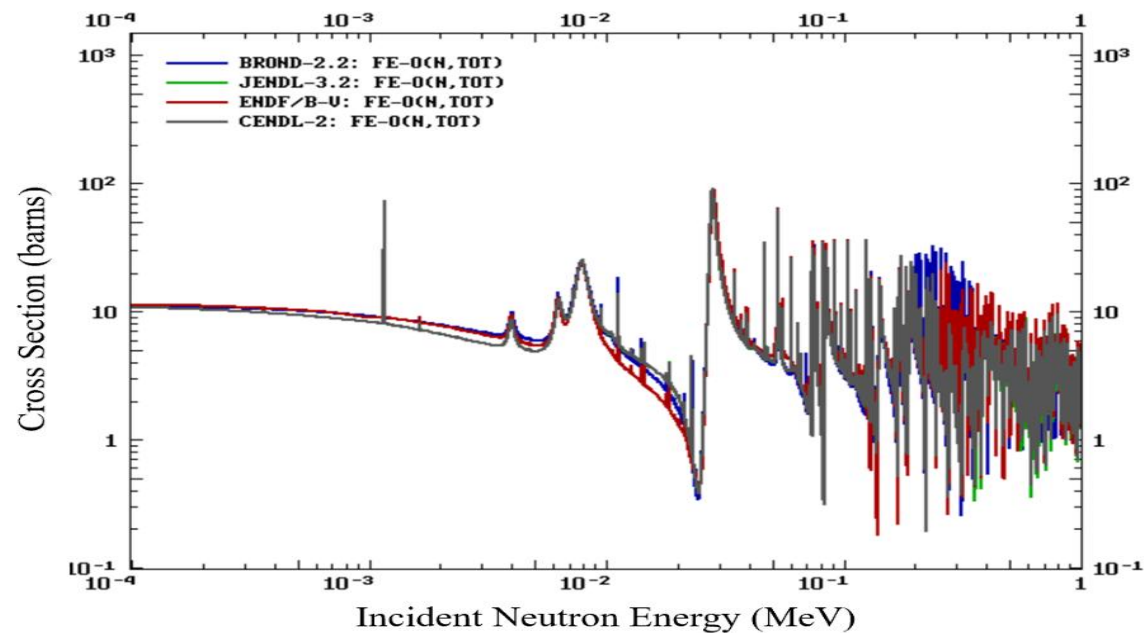
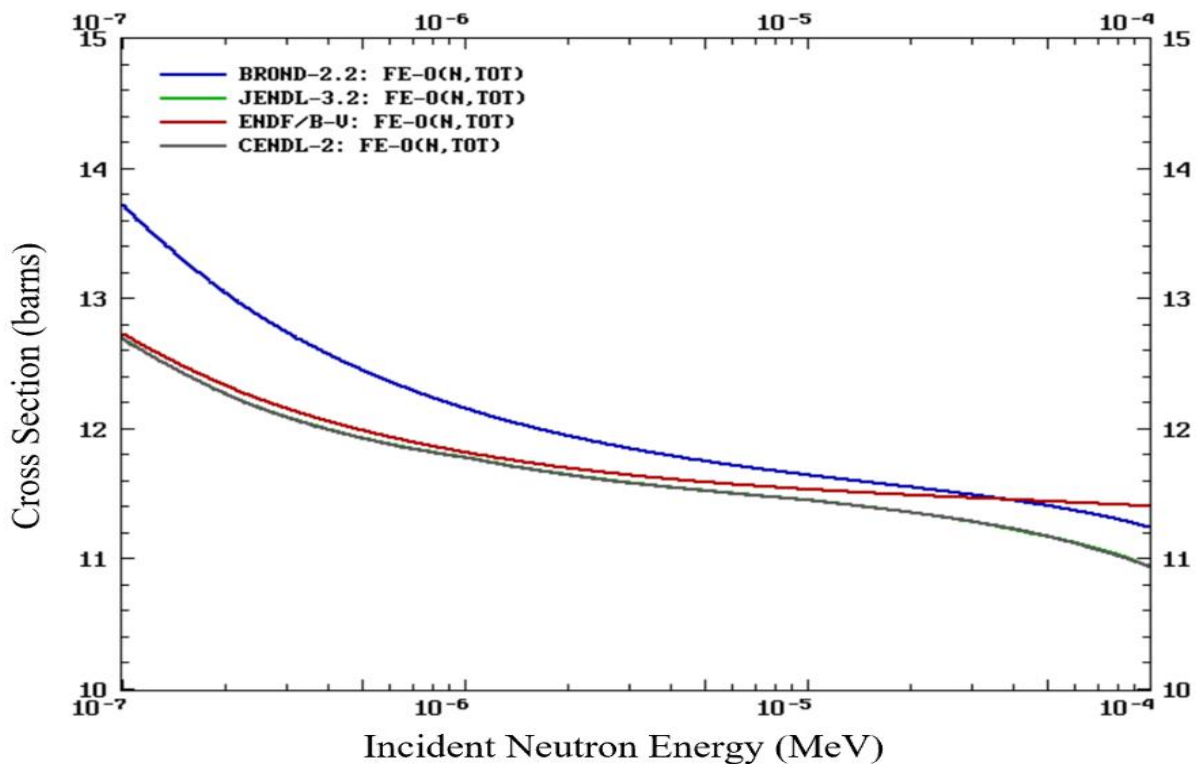
Fe作为最重要的结构材料，在绝大多数核设施与核设备中都被大量应用，被列为国际核数据评价工程CIELO所包含的6个核素中的其中之一。



评价数据在部分能区存在明显偏差，需要去澄清分歧。

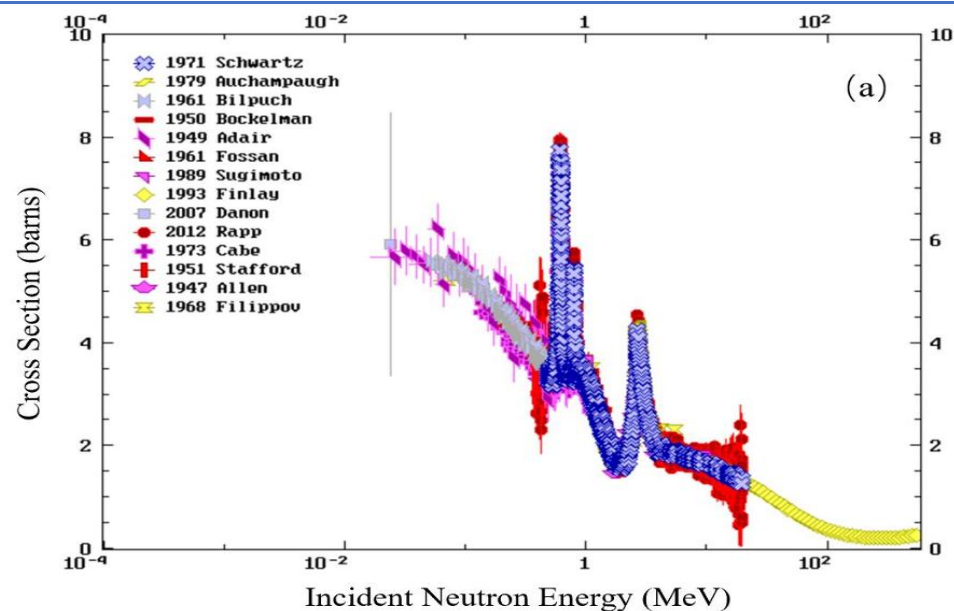
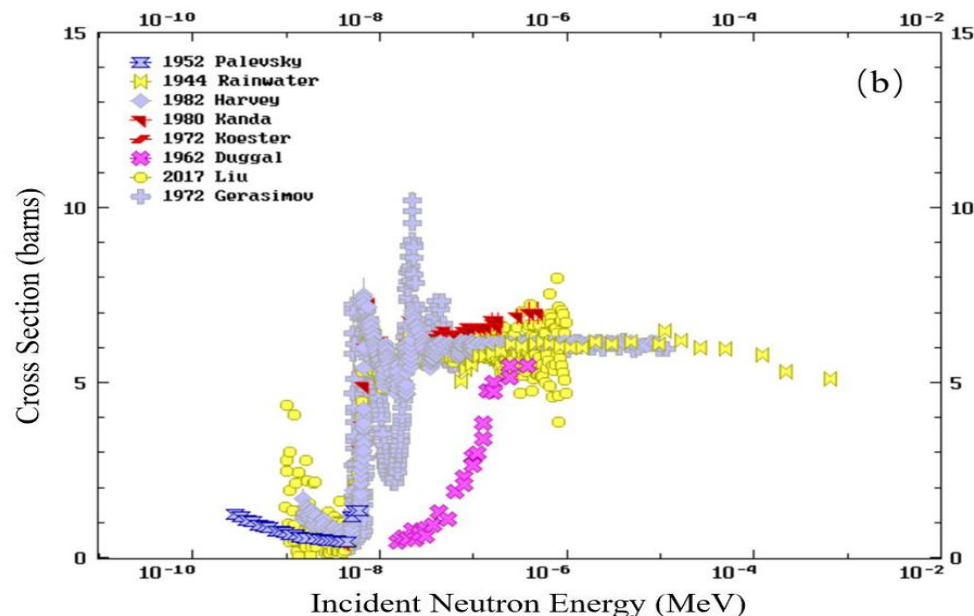
01 | 研究现状

——^{nat}Fe评价库截面现状



中子截面评价数据的产生是以实验测量数据为基础的。实验测量数据虽然是离散、不完整的，但依然是第一性的；也是理论研究者检验模型计算结果的金标准。

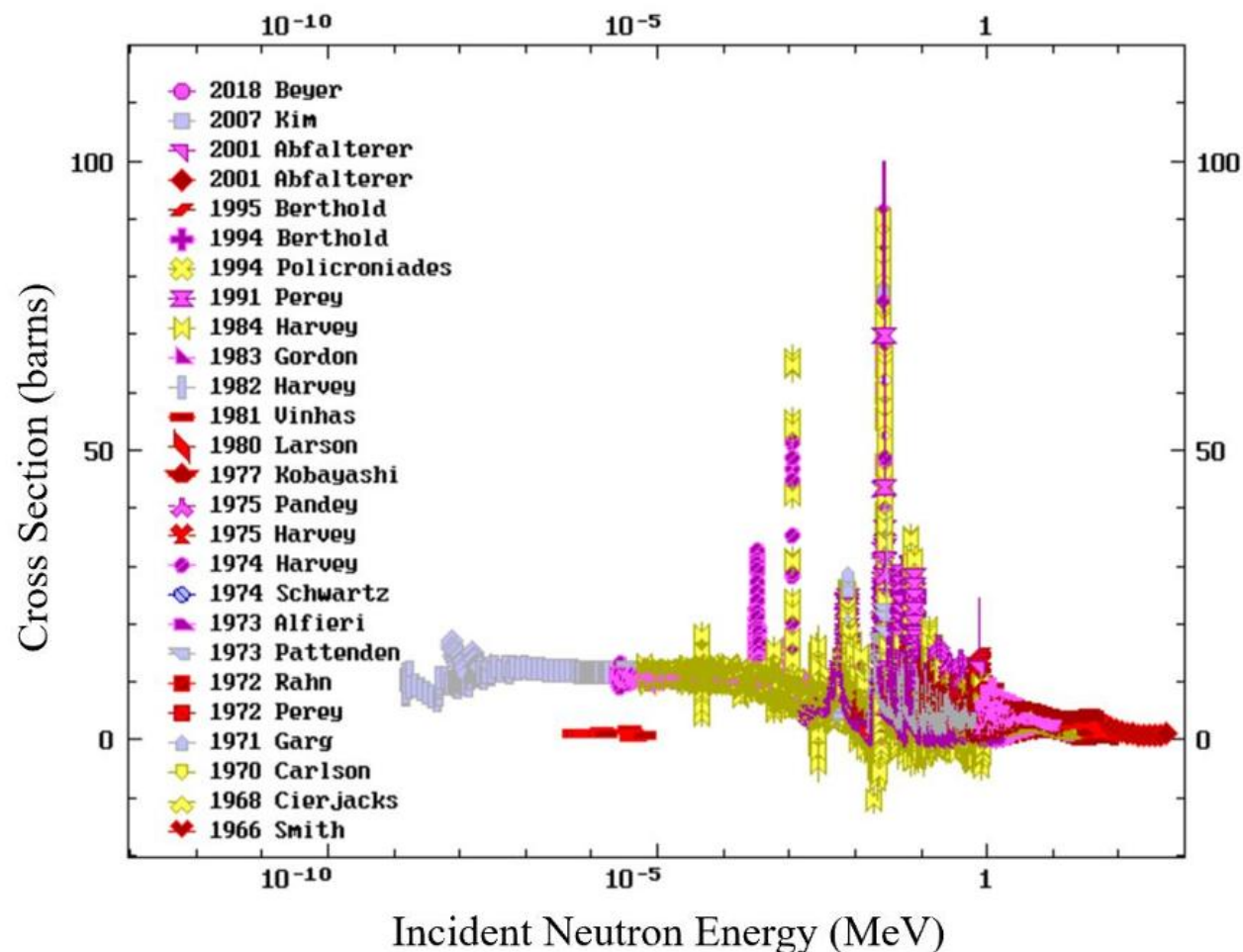
01 研究现状—— ^9Be 实验库现状



IAEA现有评价数据库的全截面主要是核物理专家们尽可能多收集到的实验数据进行客观的分析，结合理论模型的计算给出的。

但全截面的实验数据存在数据点不够多和不同实验给出的数据存在偏差的问题。 Be 和 Fe 的全截面也存在这样的问题。

实验数据	中子源	探测器	样品	方法	能区
2012 M. J. Rapp	韧致辐射 x 射线在 Ta 靶上产生的光致白光中子	闪烁探测器	直径 7.5cm 厚度 2、4、8cm 的天然 Be	飞行时间法 输运测量	0.4–20MeV
2007 Y. Danon	光致核反应产的光致中子源	同上	99.9%纯度的 2、3 和 5cm 厚的 Be 样品	同上	24–940KeV
1993 R. W. FINLAY	800MeV 能量质子在钨靶上产生的散裂中子源	同上	天然铍样品 3 块	同上	5–600MeV
1989 M. Sugimoto	$^9\text{Be}(d, n)^{10}\text{B}$ 反应产生的中子	同上	2cm 直径厚度为 1cm 的圆柱型样品再去组合成多种厚度	同上	1–10MeV



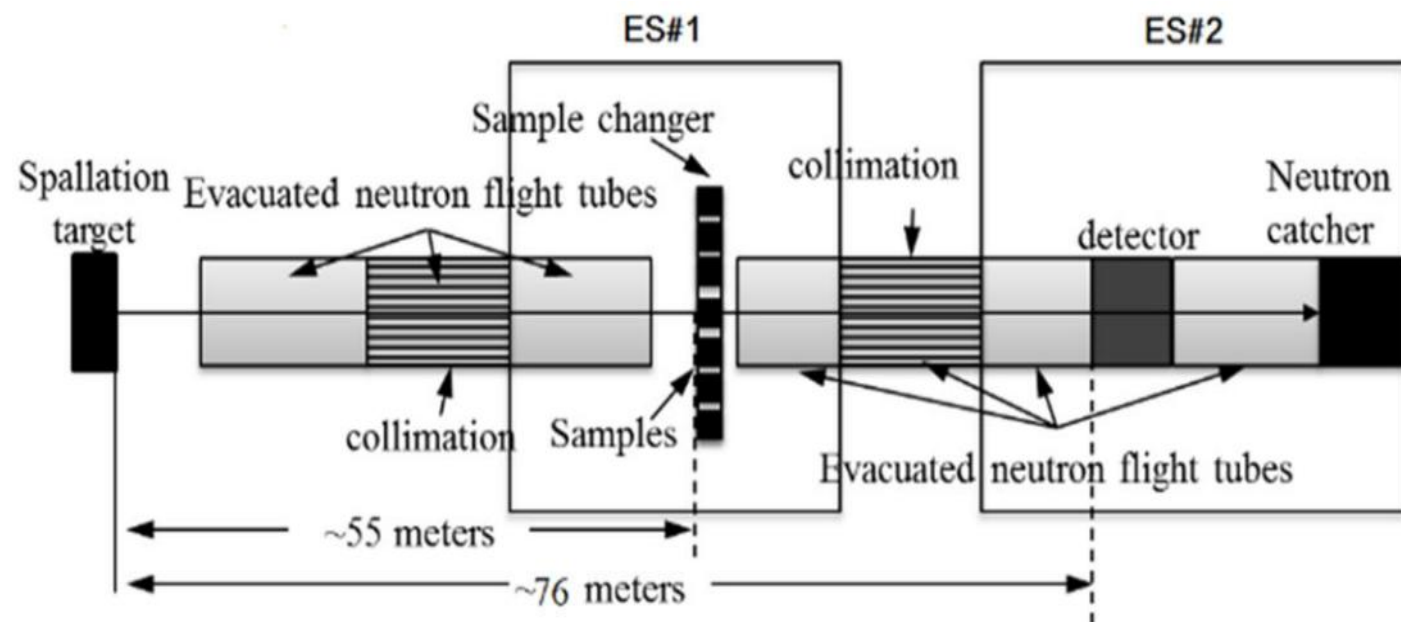
- 天然铁的EXFOR实验库中80%以上的数据集是1980年以前的结果
- 大部分结果是单能点或较窄能量区间内的测量数据，基于白光中子源较宽能量区间内的测量结果极少
- 不同数据集在重叠能量区间内给出的天然铁中子全截面实验数值偏差较大

采用透射法测量中子的全截面

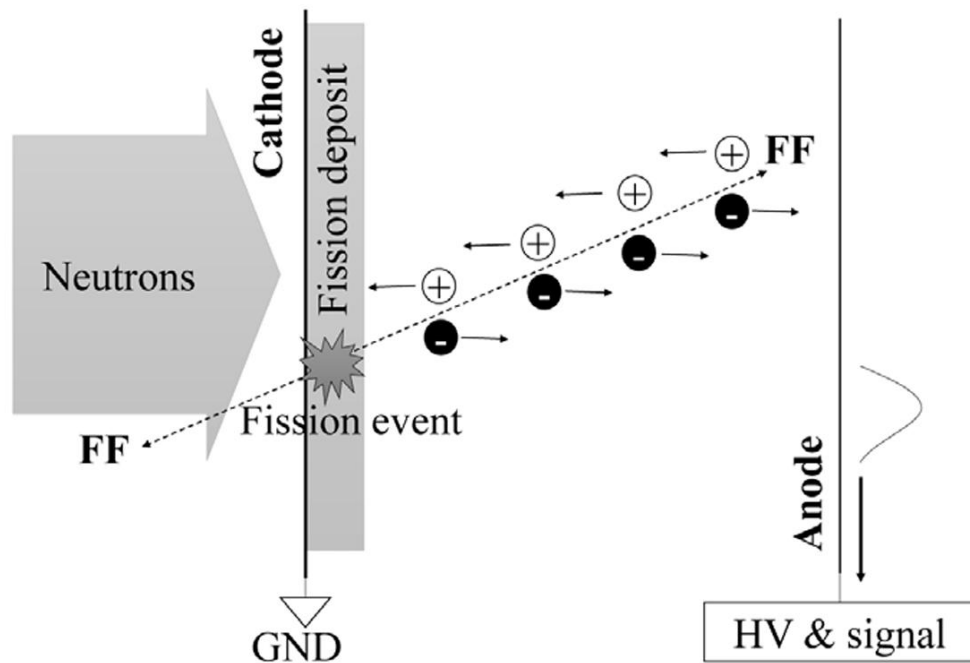
$$\phi_t = \phi_0 e^{-n\sigma_{Tot}t}$$

$$T_{(Ei)} = \frac{(C_{I(Ei)} - B_{I(Ei)})/P_I}{(C_{O(Ei)} - B_{O(Ei)})/P_O}$$

$$\sigma_{Tot} = \frac{1}{nt} \ln \left(\frac{1}{T} \right)$$



实验上需要测量中子透射率，及就是有样品状态下测量的计数与无样品状态下测量的计数之比。



Bethe-Block公式

$$\left(-\frac{dE}{dX}\right)_{ion} = \frac{4\pi e^4 Z^2}{m_0 v^2} N Z \left[\ln\left(\frac{2m_0 v^2}{I}\right) - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right]$$

飞行时间法 确定中子能量

$$E_n = m_n c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{L}{c \times T_{of}}\right)^2}} - 1 \right)$$

$$T_{of} = T_f - \left(T_v - \frac{L}{c}\right)$$

02 | 实验方法与数据处理方法

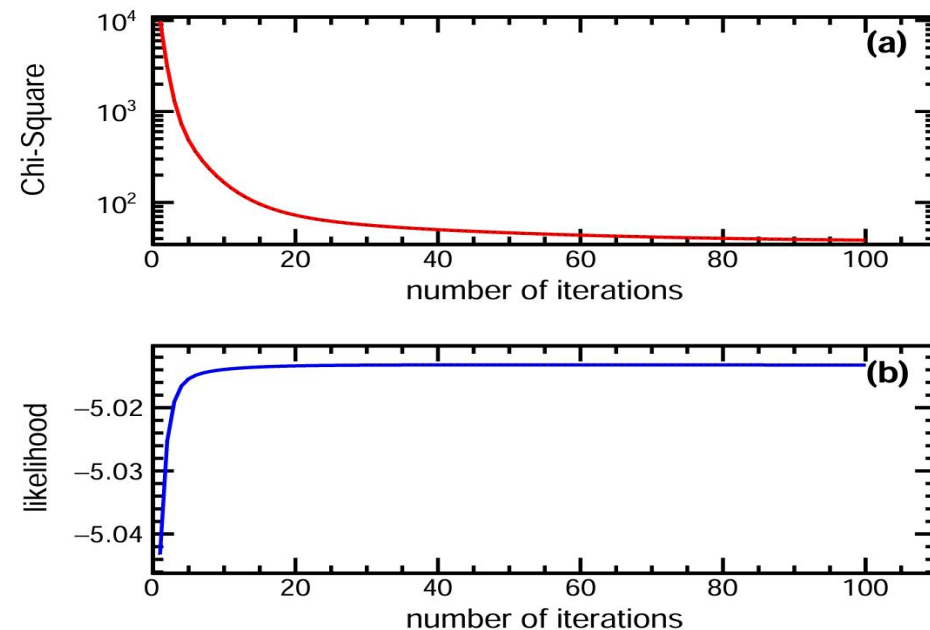
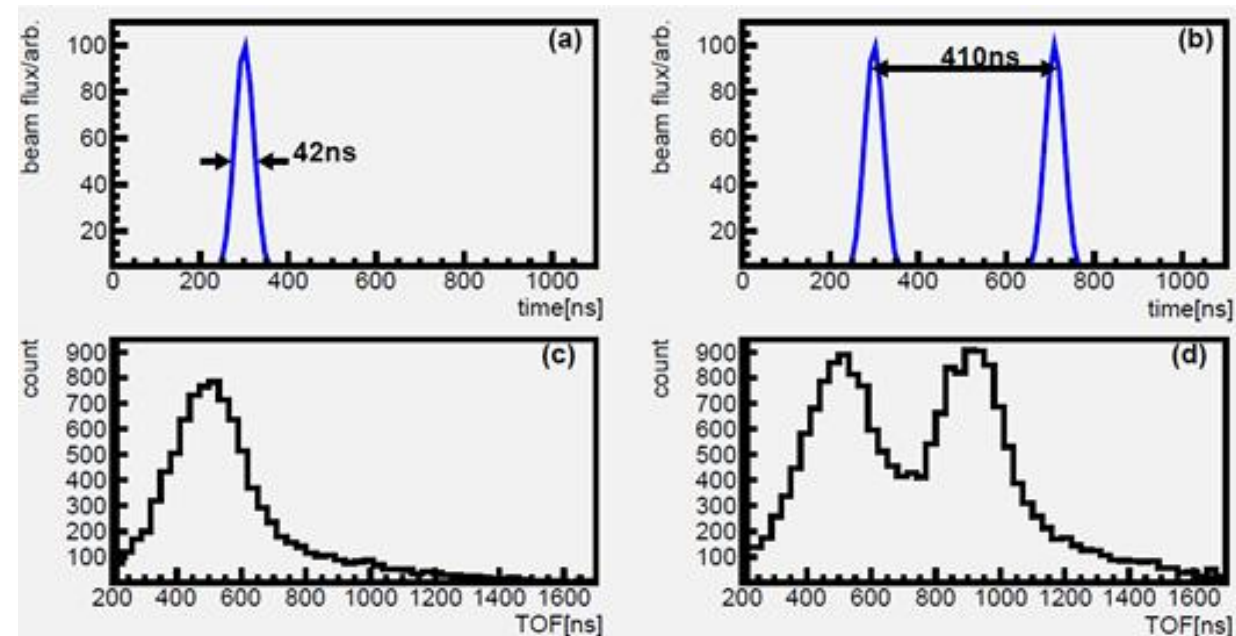
——双束团解谱方法

使用基于**贝叶斯方法和迭代事例重分布方法**来进行双束团解谱

$$C_i^{(k+1)} = E_i \frac{C_i^{(k)}}{C_{i-\Delta}^{(k)} + C_i^{(k)}} + E_{i+\Delta} \frac{C_i^{(k)}}{C_i^{(k)} + C_{i+\Delta}^{(k)}}$$

解谱迭代后的谱，bin计数的协方差

$$\text{Cov}[C_i^{(k)}, C_j^{(k)}] = \sum_{m,n} \frac{\partial C_i^{(k)}}{\partial E_m} \frac{\partial C_j^{(k)}}{\partial E_n} \text{Cov}[E_m, E_n]$$



能量分辨

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{1}{\sqrt{1-\beta_n^2}} \times \left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta_n^2}} + 1 \right) \times \sqrt{\left(\frac{\Delta T}{T} \right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{L} \right)^2}$$

$\frac{\Delta E}{E}$ 是相对能量分辨， β_n 是相对论因子， ΔT 和 ΔL 分别是总的时间误差和飞行距离的误差。 ΔT 大约为60.3 ns，主要来自于60 ns的质子束半宽度和5.7 ns的探测系统时间分辨。 ΔL 是散裂靶与周围冷却体对中子的慢化而引起的，可以用FLUKA模拟得到。

截面相对不确定度计算方法

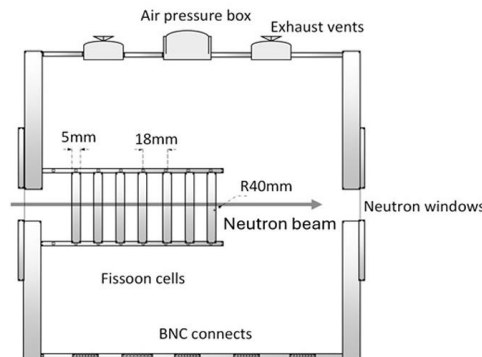
$$\frac{\Delta T}{T} = \sqrt{\left(\frac{\Delta C_I}{C_I - B_I} \right)^2 + \left(\frac{\Delta C_O}{C_O - B_O} \right)^2 + \left(\frac{\Delta B_I}{C_I - B_I} \right)^2 + \left(\frac{\Delta B_O}{C_O - B_O} \right)^2 + \left(\frac{\Delta P_I}{P_I} \right)^2 + \left(\frac{\Delta P_O}{P_O} \right)^2}$$

$$\frac{\Delta \sigma_{tot(E_i)}}{\sigma_{tot(E_i)}} = \frac{\Delta T_{(E_i)}}{nl \sigma_{tot(E_i)} T_{(E_i)}}$$

中子源状态

束流功率**100 KW**，频率**25 HZ**，双束团模式。

FIC探测器



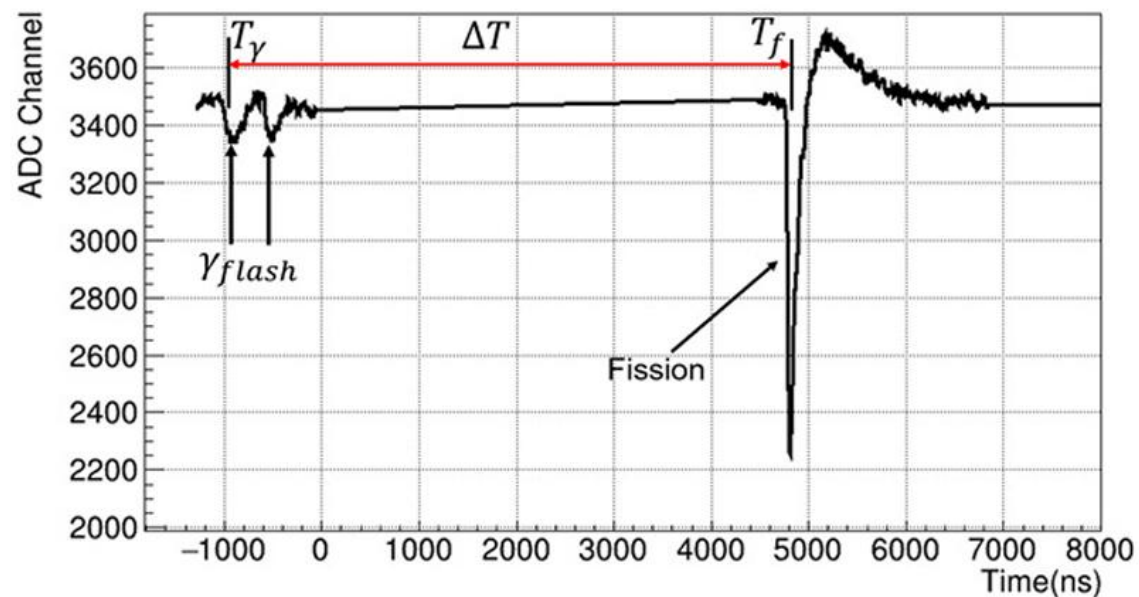
靶片信息

Coating type	Mass/mg	Uncertainty (%)	Plate type	Plate thickness /mm
^{235}U -1	5.173	1.0	stainless	0.02
^{235}U -2	6.319	0.9	Al	0.09
Th-1	3.477	1.2	Al	0.09
Th-2	3.207	1.3	Al	0.09
Th-3	3.372	1.3	Al	0.09
^{238}U -1	4.991	1.1	stainless	0.02
^{238}U -2	4.987	1.1	stainless	0.02

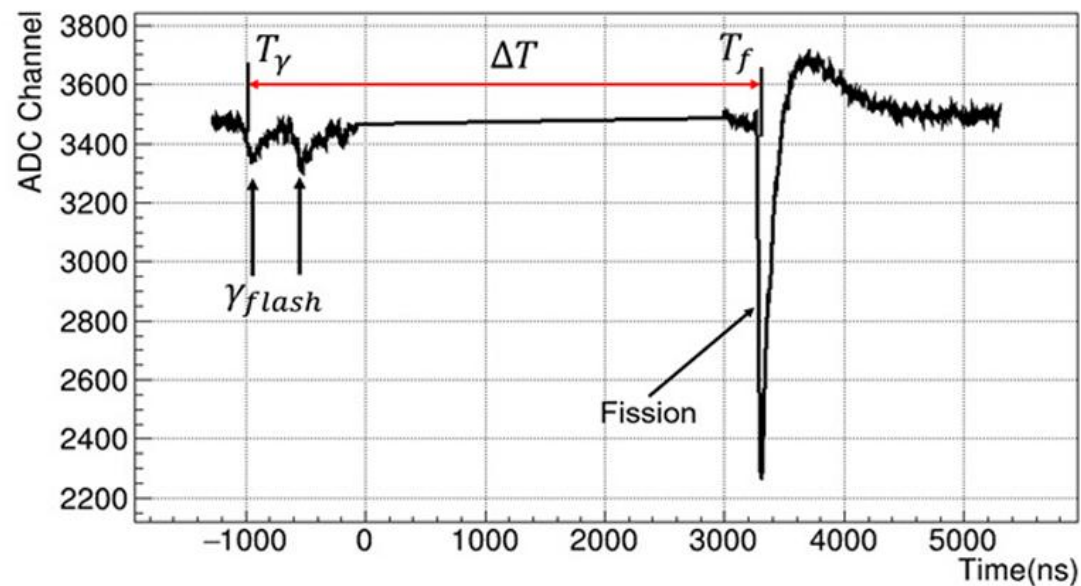
选用的铍样品

Sample	Diameter/mm	Thickness/mm	Mass/g	Atomic density/(atoms/barns)	Combined uncertainty (%)	Calculated density/(g/cm ³)
Be-1	70.00±0.02	9.99±0.004	71.1472±0.001	0.12366±0.00007	0.06	1.849
Be-2	70.00±0.02	20.00±0.004	142.1155±0.001	0.24701±0.00014	0.06	1.847
Be-3	70.00±0.02	29.99±0.004	213.2921±0.001	0.37072±0.00021	0.06	1.848

双束团模式下，快裂变电离室信号波形

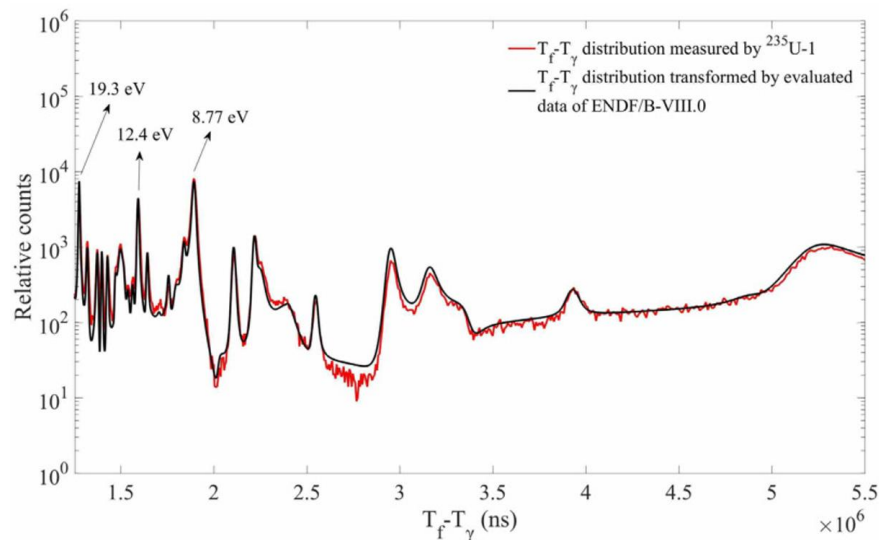


^{235}U 裂变室



^{238}U 裂变室

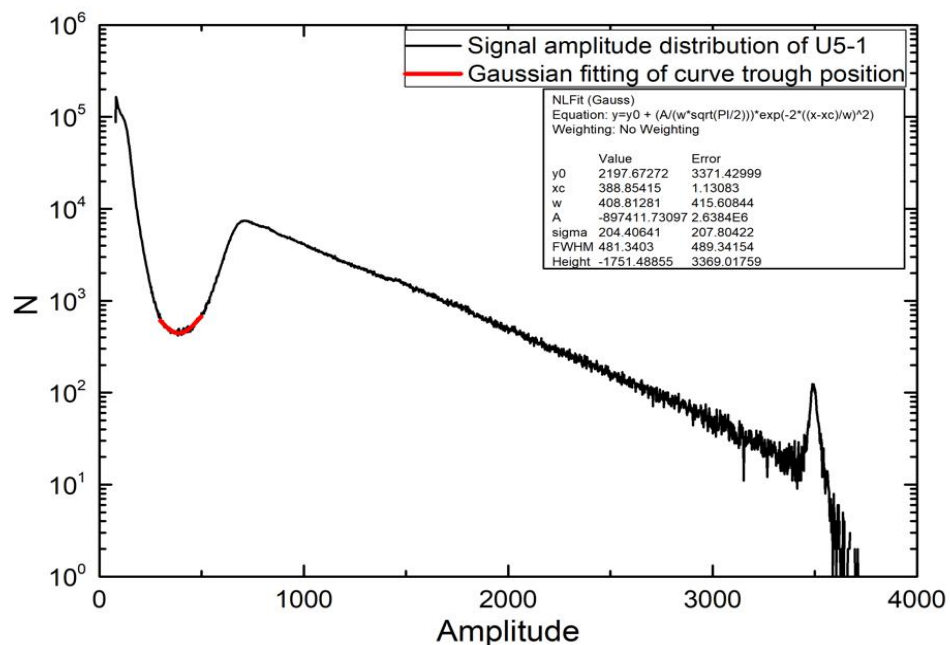
飞行距离 标定



^{235}U 和 ^{238}U 裂变单元的飞行距离

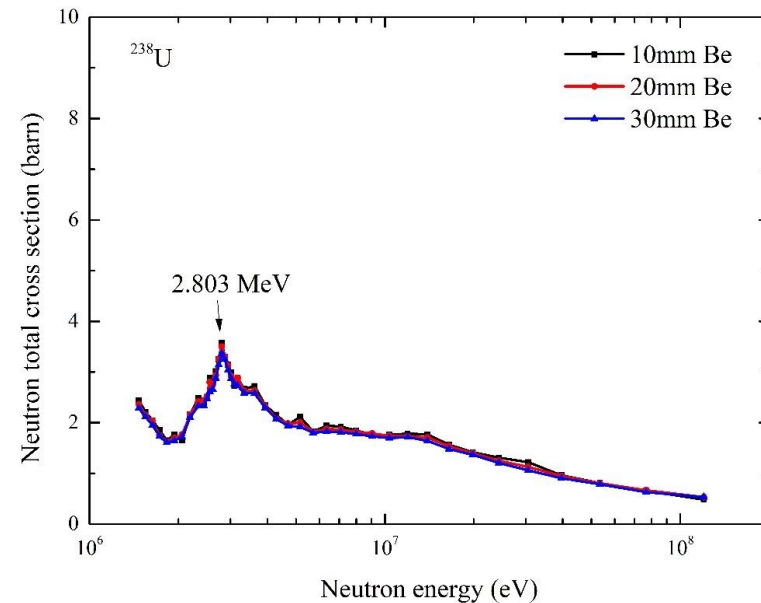
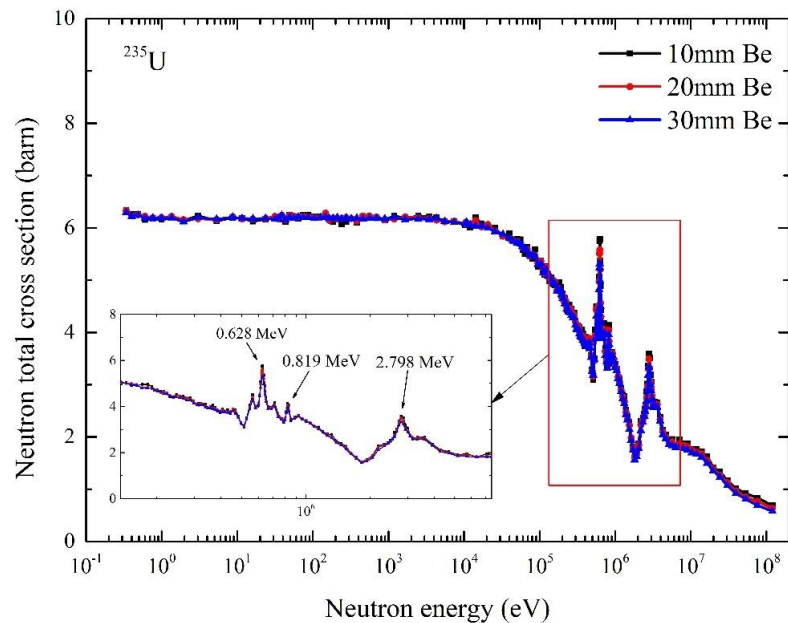
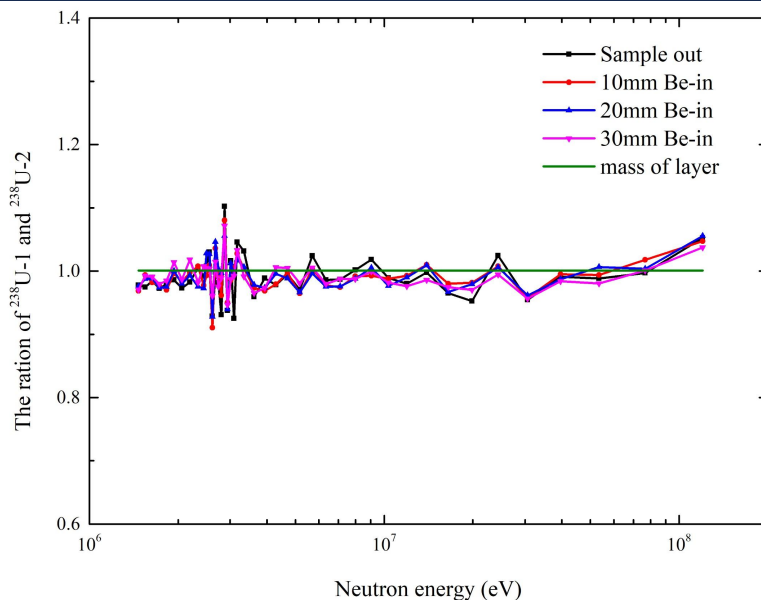
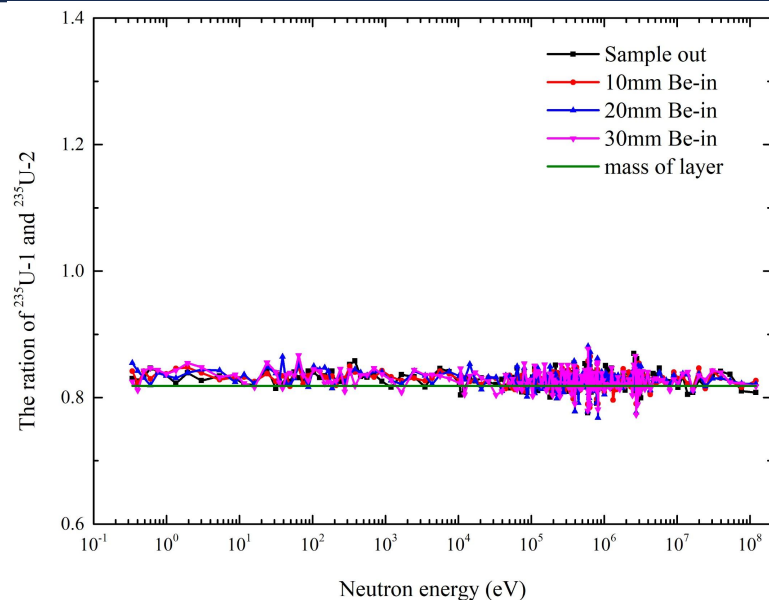
裂变单元	飞行距离 L(m)
^{235}U -1	77.570
^{235}U -2	77.588
^{238}U -1	77.660
^{238}U -2	77.678

裂变阈值 设置



^{235}U 和 ^{238}U 裂变单元的裂变阈值

裂变单元	^{235}U -1	^{235}U -2	^{238}U -1	^{238}U -2
裂变阈值 (Channel)	389	354	417	400



➤ 可以将 ^{235}U -1与 ^{235}U -2、 ^{238}U -1与 ^{238}U -2探测单元的计数进行合并，来增加统计计数，降低统计误差。

➤ ^{235}U 和 ^{238}U 探测单元测量的三种厚度的铍样品的中子全截面分别都符合得很好。

➤ 斯拟合共振能量分别约为0.63，0.82和2.8MeV。

03

⁹Be中子全截面实验研究

——能群划分方法与能量不确定度

能群划分方法

(共186个能点)

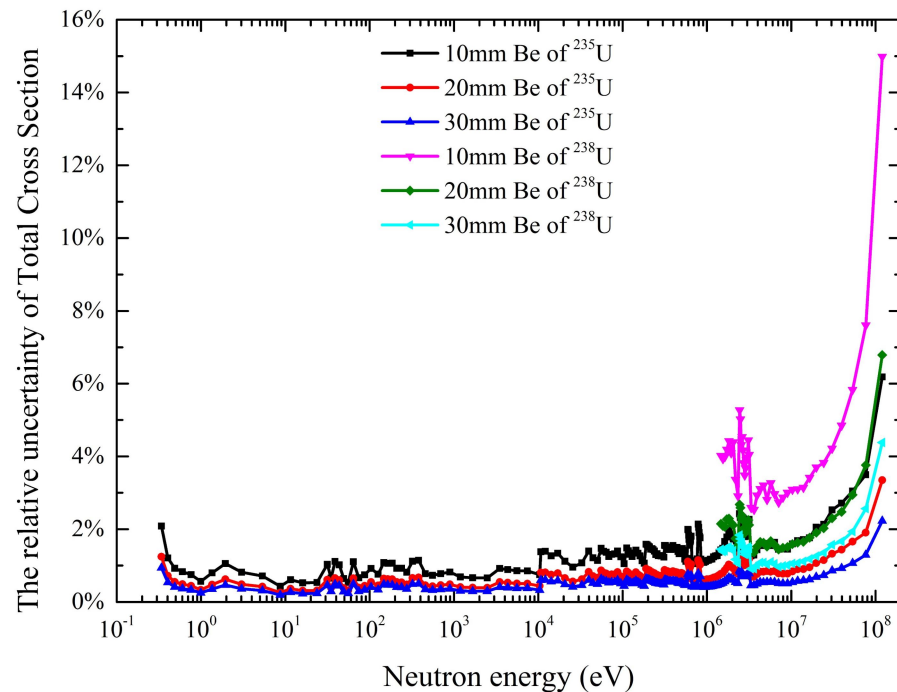
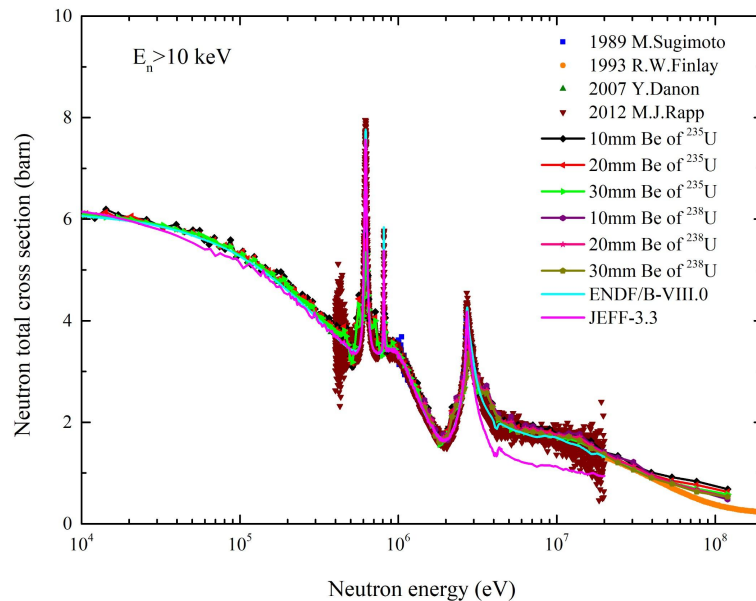
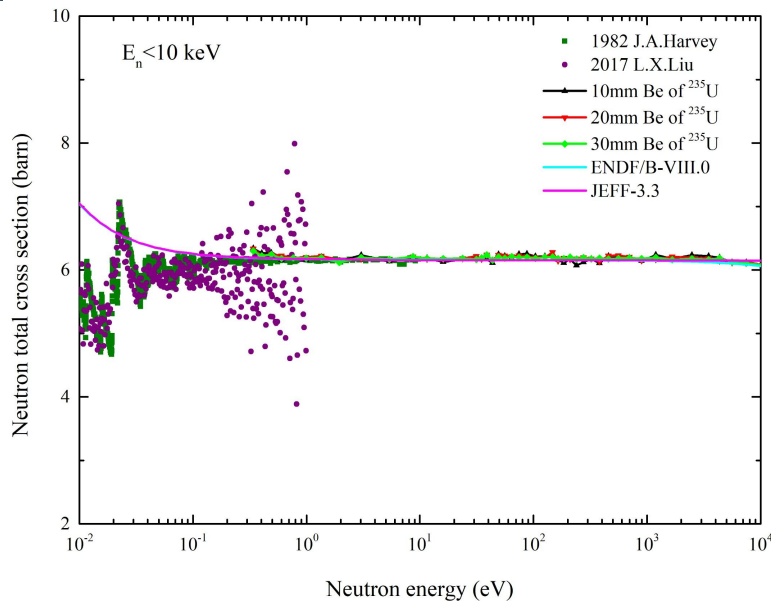
TOF (ns) region	Bin width/ns	TOF relative errors	Energy/eV	Energy points number
520–3120	120	3.8%–23.0%	3.3E6–1.2E8	22
3120–3640	40	1.1%–1.3%	2.4E6–3.2E6	12
3640–6120	120	2.0%–3.3%	8.5E5–2.3E6	21
6120–6320	40	0.6%–0.7%	7.9E5–8.3E5	5
6320–6920	120	1.7%–1.9%	6.7E5–7.7E5	5
6920–7320	40	0.5%–0.6%	5.9E5–6.5E5	9
7320–10000	120	1.2%–1.6%	3.1E5–5.8E5	23
1E4–1.3E4	200	1.5%–2.0%	1.9E5–3.1E5	15
1.3E4–1.7E4	400	2.4%–3.0%	1.1E5–1.8E5	10
1.7E4–2.4E4	800	3.3%–4.7%	5.6E4–1.0E5	9
2.4E4–2.9E4	1600	5.0%–6.7%	4.0E4–5.0E4	3
2.9E4–5.5E4	4000	7.3%–13.8%	1.1E4–3.3E4	7
5E4–1E5	1E4	10.0%–20.0%	3.5E3–1.0E4	5
1E5–4.75E5	2.5E4	5.3%–25%	1.5E2–2.5E3	15
4.75E5–1E6	5E4	4.9%–10.5%	31.5–1.3E2	11
1E6–2E6	2.5E5	12.3%–24.4%	8.7–23.8	4
2E6–1E7	8E5	8.0%–39.5%	0.34–5.3	10

一些代表性能点处的能

量不确定度

E_n/eV	$\Delta T/\text{ns}$	$\Delta L/\text{cm}$	$\Delta E/E$
1	60.3	12.2	3.1×10^{-3}
10	60.3	13.6	3.5×10^{-3}
10^2	60.3	24.0	6.2×10^{-3}
10^3	60.3	20.2	5.3×10^{-3}
10^4	60.3	18.0	5.1×10^{-3}
10^5	60.3	15.4	7.9×10^{-3}
10^6	60.3	8.8	2.2×10^{-2}
10^7	60.3	10.0	7.0×10^{-2}
10^8	60.3	18.4	2.3×10^{-1}

^9Be 中子全截面实验研究 ——全截面结果比较与不确定度



- 10keV以下，三种厚度实验结果相互之间符合得很好，相对偏差在2%以内。
- 在10keV以下能区，我们的三种厚度铍样品得到的中子全截面结果与ENDF/B-VIII.0评价数据的偏差在2.5%以内。
- 比起其他实验的全截面结果，在大部分能区，我们的全截面结果与ENDF/B-VIII.0评价数据符合得更好。
- 在10keV至20MeV能区内，我们的中子全截面结果与ENDF/B-VIII.0评价数据的偏差在15%以内。

- 30mm铍样品得到的截面不确定度是最好的。
- 在0.3eV到120MeV能区内，30mm铍样品得到的截面不确定度在2%以内。

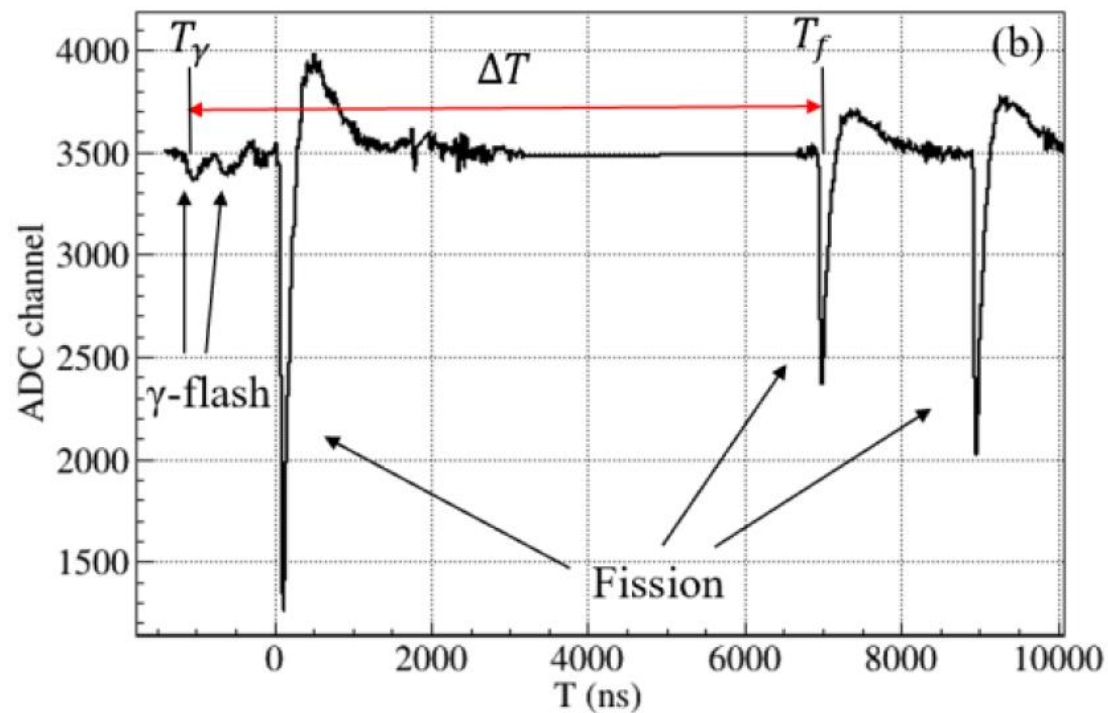
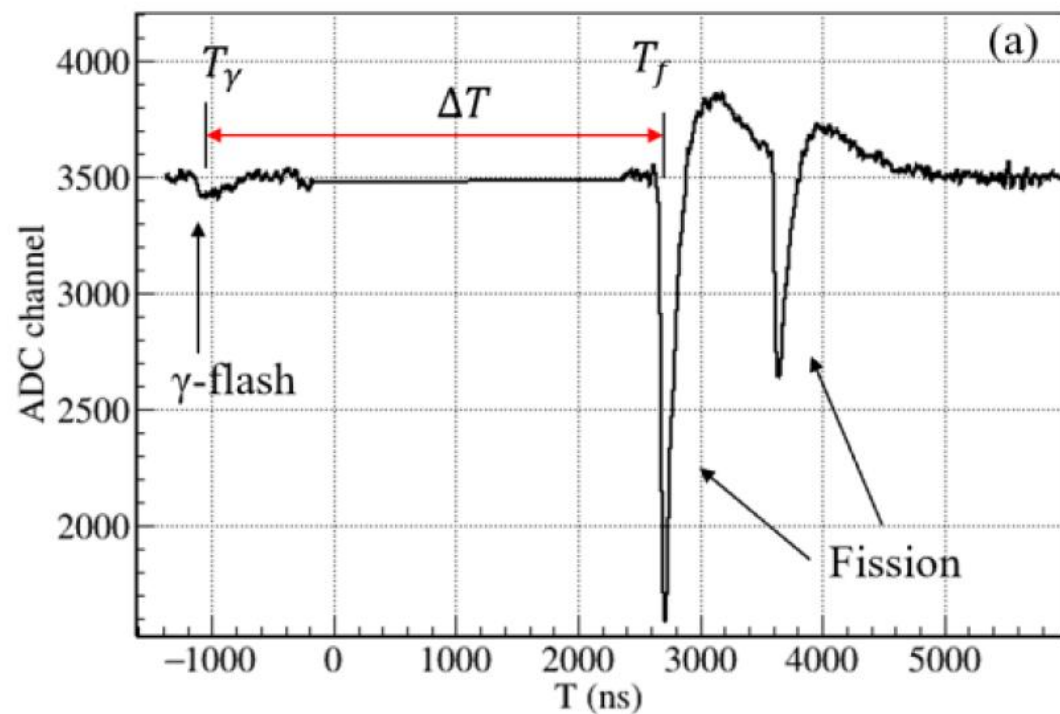
分别在单束团（2%左右束流时长）和双束团模式下，开展了实验，以验证双束团结果的可靠性，并得到精度更高、能区更宽的^{nat}Fe中子全截面。

天然铁样品信息

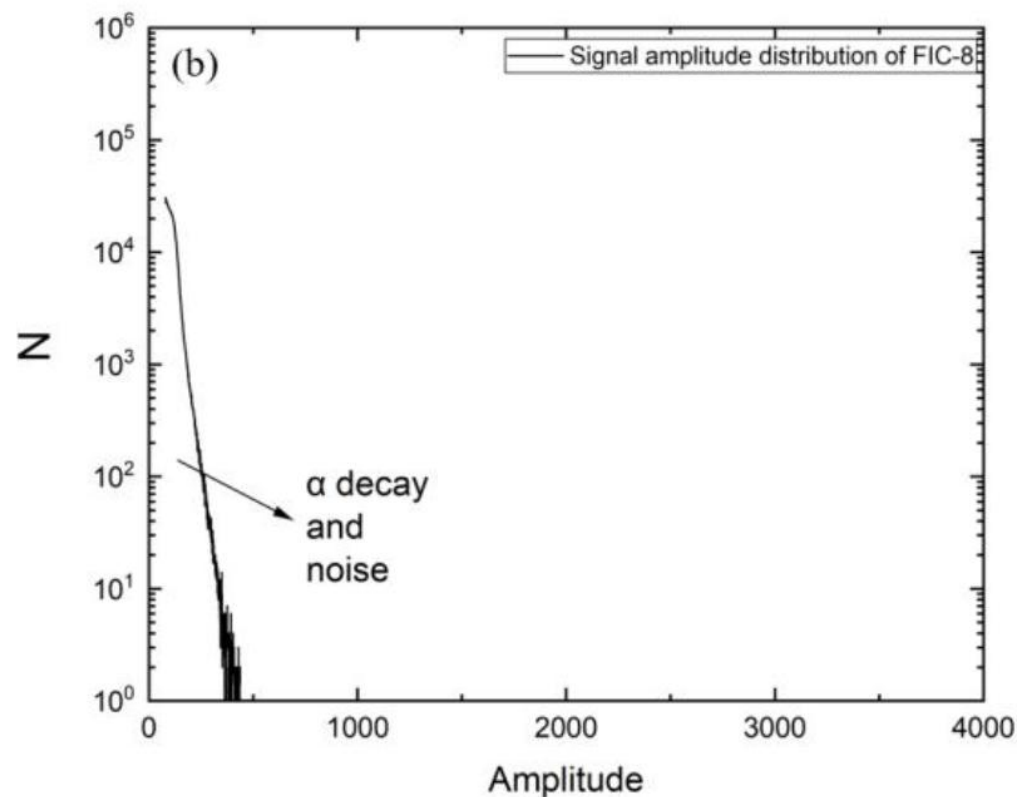
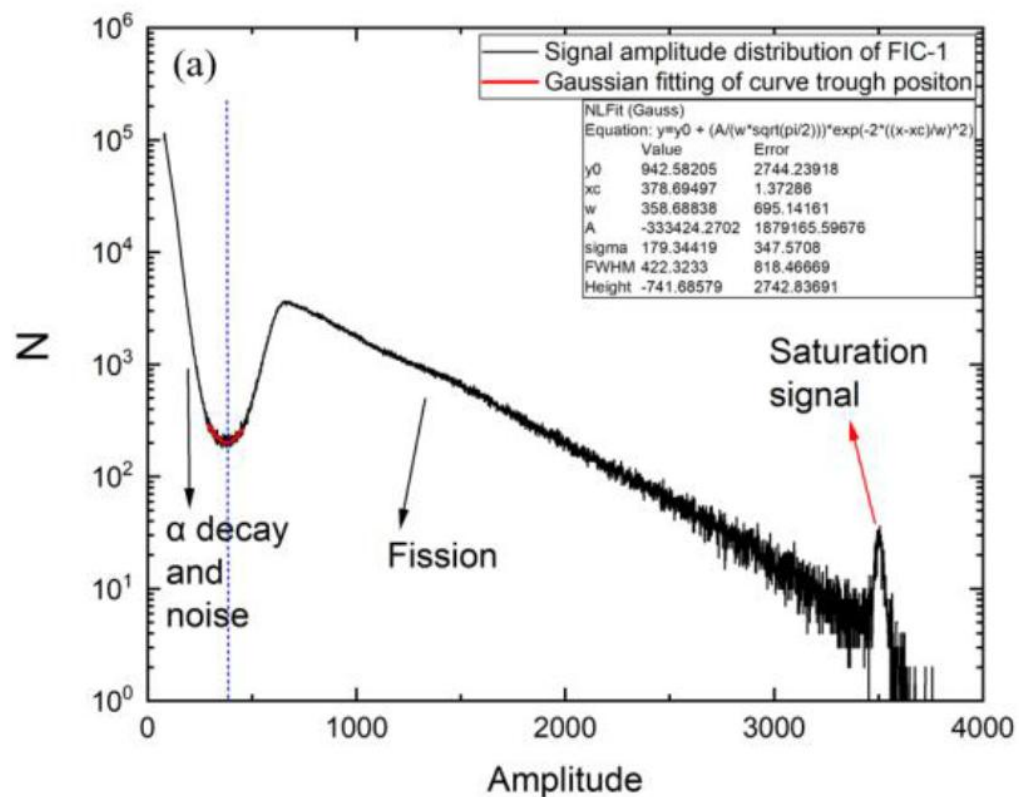
Sample	Diameter (mm)	Thickness (mm)	Mass (g)	Atomic density (atoms/barns)	Density (g/cm ³)
Iron-20	70.00±0.02	20.000±0.004	605.36±0.01	0.16915±0.00014	7.865
Iron-40	70.00±0.02	40.000±0.004	1211.1±0.1	0.3384±0.0014	7.867

FIC 裂变单元靶片信息

FIC number	FIC- 1	FIC- 2	FIC- 3	FIC- 4	FIC- 5	FIC- 6	FIC- 7	FIC- 8
Coating materials	²³⁵ U	²³⁵ U	²³⁵ U	²³⁸ U	²³⁸ U	²³⁸ U	²³⁵ U	/

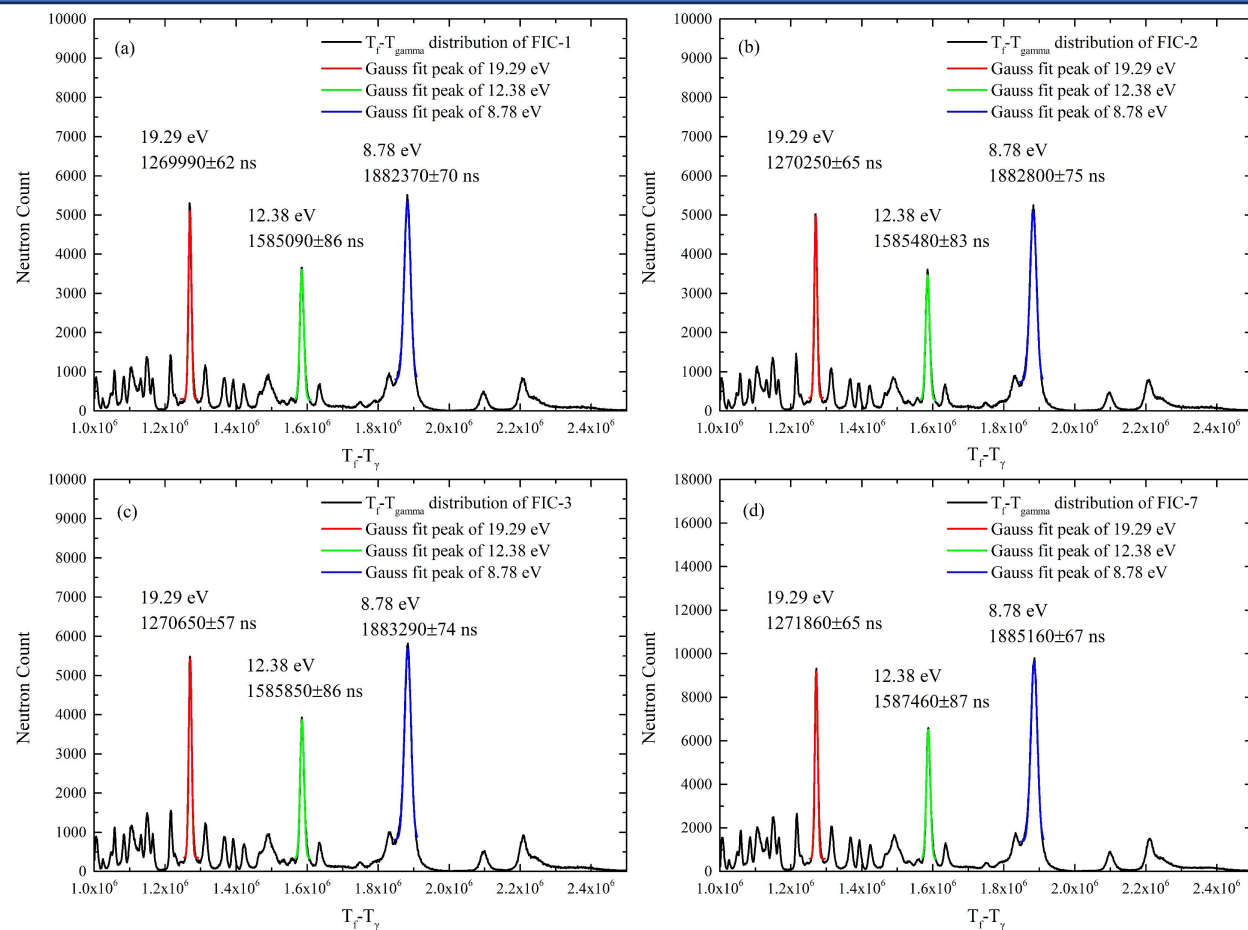


单、双束团条件下， ^{235}U 裂变室的信号波形



裂变阈值设置

FIC Number	FIC-1	FIC-2	FIC-3	FIC-4	FIC-5	FIC-6	FIC-7
Fission Threshold (Channel)	379	377	327	420	436	410	314

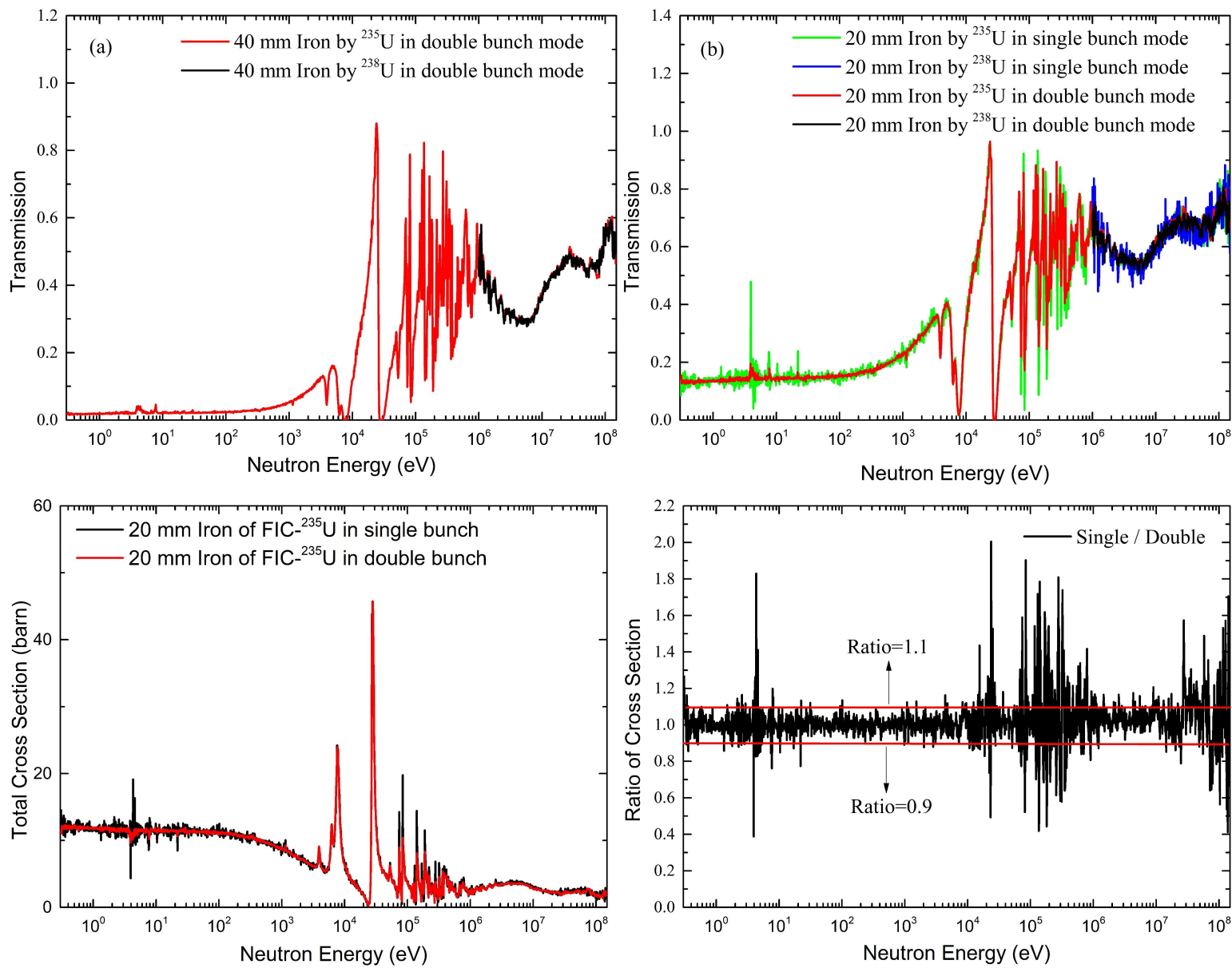


飞行距离标定结果

FIC 编号	FIC-1	FIC-2	FIC-3	FIC-4	FIC-5	FIC-6	FIC-7
飞行距离 (m)	77.147	77.165	77.184	77.203	77.222	77.222	77.241

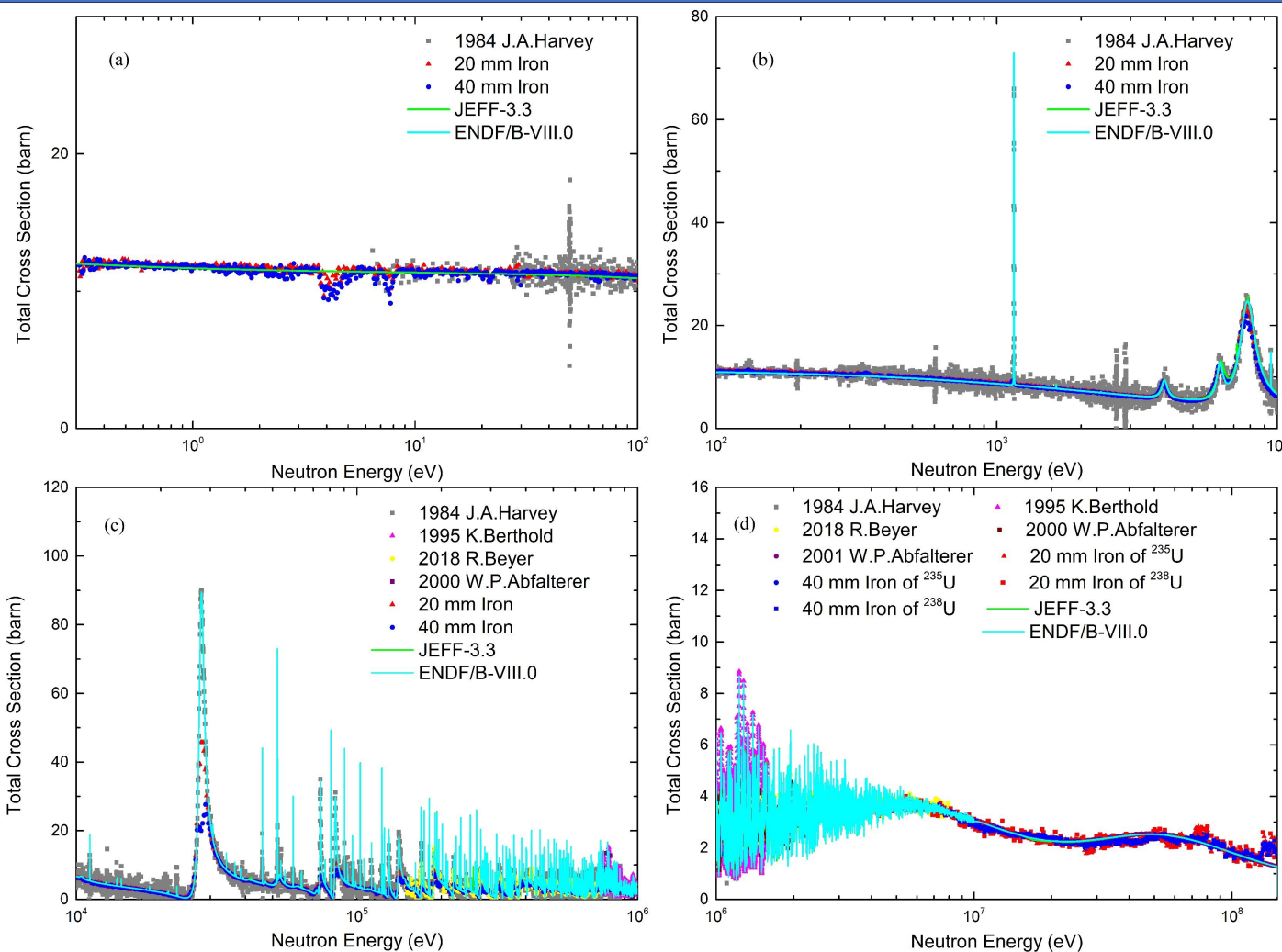
04 | ^{nat}Fe 中子全截面实验研究

——单双束团下透射率结果与二者全截面之比

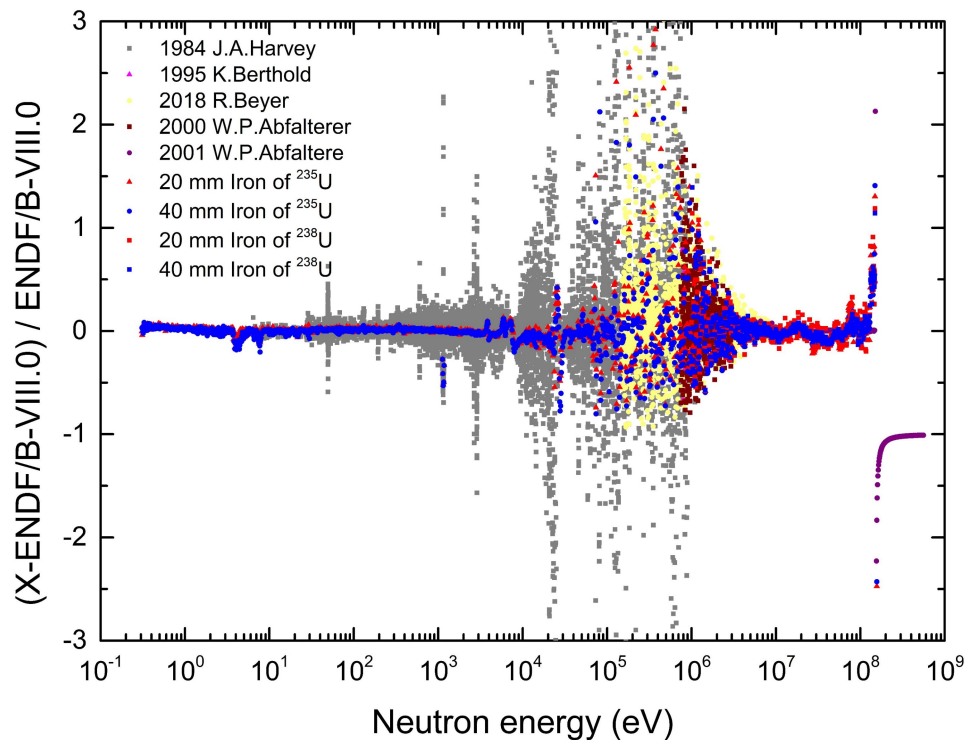


➤ 单束团模式和双束团模式下的中子全截面结果是相符合的。但是，单束团模式的结果波动较大。因此，**双束团**模式下的**解谱**结果被优先**推荐**。

➤ 0.3eV到150MeV，大部分能点的**单束团模式**和**双束团模式**的中子全截面**之比**在1附近，10%以内波动。



双束团模式下得到的 ^{nat}Fe 的中子全截面结果在0.3-100 eV(a)、100 eV-10 keV (b)、10 keV-1 MeV(c) and 1-150 MeV(d)与评价库中JEFF-3.3和ENDF/B-VIII.0评价结果和EXFOR中之前的实验结果比较

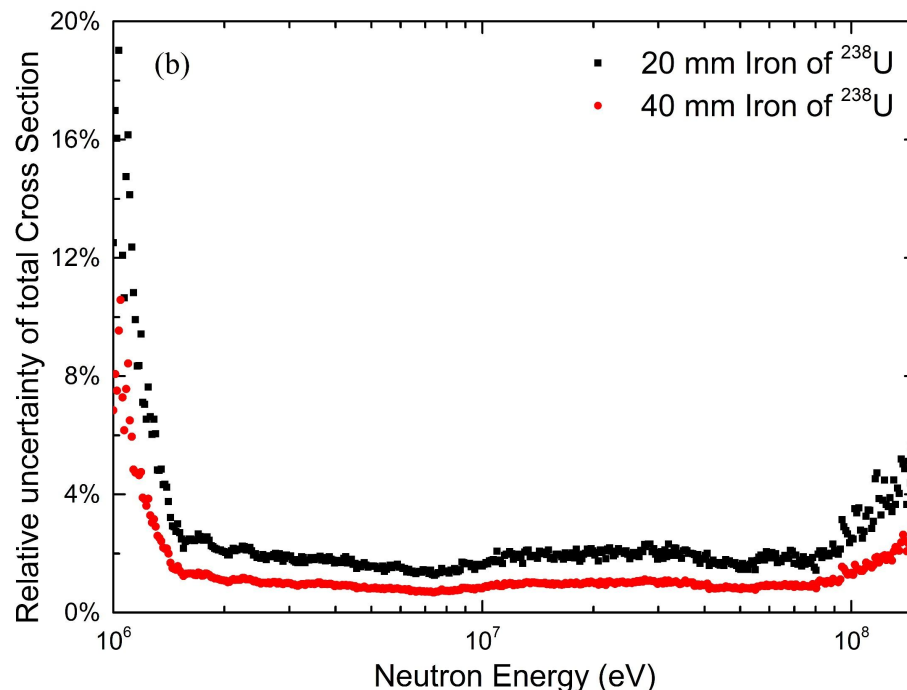
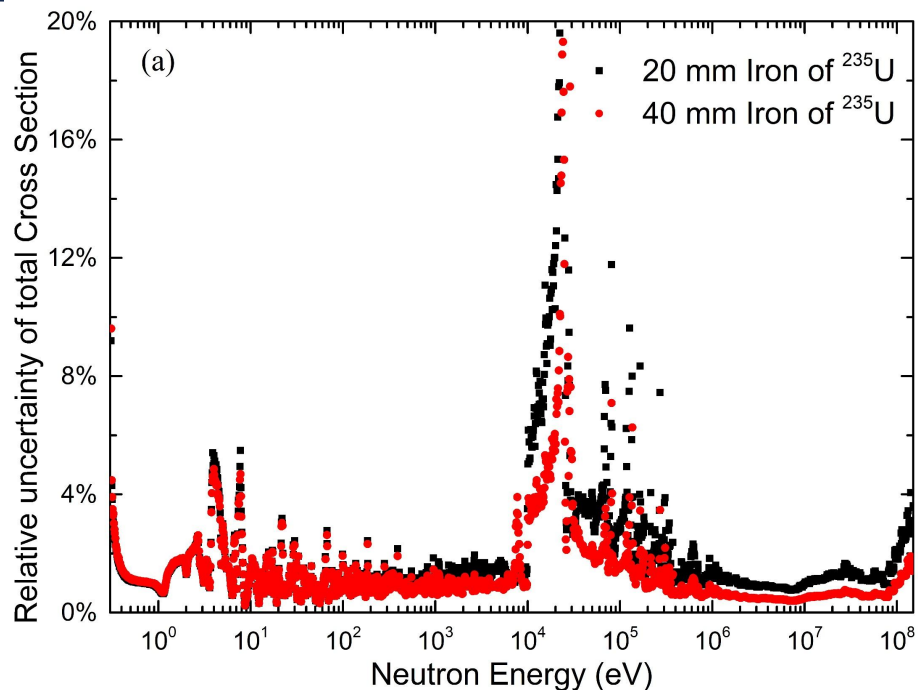


The quantitative comparison of relative deviations $(X-\text{ENDF/B-VIII.0})/\text{ENDF/B-VIII.0}$ versus neutron energy.

The Mean Relative Percentage Deviations (MRPD (%)) of experimental data vs ENDF/B-VIII.0 in defined energy bins.

Energy Range (eV)	1984 J.A. Harvey (6.4 eV-2.3 MeV)	1995 K. Berthold (0.75-2.2 MeV)	2018 R. Berthold (0.15-8 MeV)	2000 W.P. Abfalterer (0.75-3 MeV)	2001 W.P. Abfalterer (5.29-556 MeV)	This ^{235}U (0.3 eV-150 MeV)	This ^{238}U (1-150 MeV)
0.3-10 ²	10.2	/	/	/	/	2.9	/
10 ² -10 ⁴	21.9	/	/	/	/	6.0	/
10 ⁴ -10 ⁶	117.4	9.7	48.8	72.8	/	60.1	/
10 ⁶ -10 ⁹	49.0	4.0	24.4	29.9	122.7	18.5	19.1

- 全截面结果比起1984年J. A. Harvey的实验结果与评价数据符合得更好，偏差更小。
- 结果证明俄罗斯的评价库在0.3eV-50eV能区对 ^{nat}Fe 的评价结果应略有偏大，中国的评价库在0.4eV-100eV能区对 ^{nat}Fe 的评价结果应略有偏小。



Jiangbo Bai, Jingyu Tang,
Liqun Shi et al.,
Physics Letters B. 863, (2025)
139355

- 在大部分能点处，使用40mm铁样品得到的铁全截面的相对不确定度在**2%以内**。
- 在1MeV–1.5MeV能区， ^{238}U 相对**较低的裂变截面**导致了全截面不确定度的相对较大。
- 在140MeV–150MeV能区，中子**通量的相对较低**导致了这一能区的全截面相对不确定度较大。
- 在1.5MeV–140MeV，使用20mm铁样品和40mm铁样品用FIC- ^{238}U 得到的铁全截面相对不确定度分别在**2%和1%附近**。

针对在核能装置与核设施中大量使用的金属铍和铁存在的中子全截面数据精度不够高、能区不够宽，在部分能区五大主流评价库数据存在分歧和Back-n中子全截面测量谱仪的中子定时精度不高、实验效率低的问题。

在中国散裂中子源反角白光中子源上开展了多次 ^9Be 和 $^{\text{nat}}\text{Fe}$ 的中子全截面测量实验，得到了0.3eV-120MeV能区 ^9Be 的中子全截面结果和0.3eV-150MeV能区 $^{\text{nat}}\text{Fe}$ 的高精度的中子全截面实验结果，取得了一些重要的创新性成果。

05 | 总结与展望

——工作总结

➤ 首次通过一次实验（避免了不同实验间的系统误差），得到了0.3eV-120MeV能区的高精度铍中子全截面结果，通过**独创的能量分bin方法**，本工作得到的铍中子全截面结果的**自身相对误差基本在2%以内**；与国际现有实验结果相比，与ENDF/B-VIII.0评价数据符合得更好。

➤ 首次在单束团模式和双束团模式下，采用了高效率NTOX谱仪，测量得到了0.3eV-150MeV能区的天然铁中子全截面结果，**不仅验证了双束团解谱程序在全截面测量工作中的可靠性，也得出了解谱后双束团实验结果误差更小的结论**，比起EXFOR收录的最新的几组白光源实验数据的全截面结果，我们的全截面结果比与评价数据符合得更好，偏差更小。

敬请各位前辈、老师批评指正！

Be-9和天然铁的中子全截面实验研究



报告人：白江博



日期：2025 年 7 月 23 日

中国核动力
工程研究所
白江博



中国核动力研究设计院