

中子引起的核反应理论及评价核数据

韩银录

中国原子能科学研究院

2023年9月21日 西安



一. 引言

二. 评价核数据和核反应理论模型

三. 核数据对实验结果需求

四. 小结



中子与靶核 ($11 \leq Z \leq 100$) 反应, 在入射中子能量 **20 MeV** 以下, 包括的反应道有:

$(n, \text{tot}), (n, \text{el}), (n, \text{non}), (n, \gamma), (n, n'),$
 $(n, \text{p}), (n, \text{d}), (n, \text{t}), (n, {}^3\text{He}), (n, \alpha), (n, 2n),$
 $(n, \text{np}+\text{pn}), (n, 2\text{p}), (n, \text{n}\alpha+\alpha\text{n}), (n, \text{nd}+\text{dn}),$
 $(n, \text{nt}+\text{tn}), (n, 3n), (n, \text{1f}), (n, \text{nf}), (n, \text{2nf})$ 。



中子评价核数据:

中子引起的所有反应道的反应截面, 角分布(微分截面), 发射中子、质子、氘、氚、氦-3、 γ 和 α 的双微分截面, **裂变中子能谱**。

靶核和剩余核的分立能级最多41条。



评价核数据自治:

$$\sigma_{n,tot} = \sigma_{n,el} + \sigma_{n,non}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{n,non} = & \sigma_{n,n'} + \sigma_{n,p} + \sigma_{n,d} + \sigma_{n,t} + \sigma_{n,^3He} \\ & + \sigma_{n,\alpha} + \sigma_{n,2n} + \sigma_{n,np} + \sigma_{n,pn} \\ & + \sigma_{n,n\alpha} + \sigma_{n,\alpha n} + \sigma_{n,2p} + \sigma_{n,3n} + \sigma_{n,f} \end{aligned}$$

$$\sigma_{n,n'} = \sigma_{n,n1} + \dots + \sigma_{n,n41} + \sigma_{n,c}$$



$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \int \frac{d^2\sigma}{d\varepsilon d\Omega} d\Omega$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \int \frac{d^2\sigma}{d\varepsilon d\Omega} d\varepsilon$$

$$\sigma = \int \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega = \int \frac{d\sigma}{d\varepsilon} d\varepsilon$$



能量守恒（平衡）：

入射能量 = 出射能量



国际上中子评价核数据库：

美 国	ENDF/B-VIII.0	2018
欧 洲	JEFF-3.3	2017
日 本	JENDL-5.0	2021
中 国	CENDL-3.2	2020
俄罗斯	BROND-3.1	2016
IAEA	TENDL-2021	2021



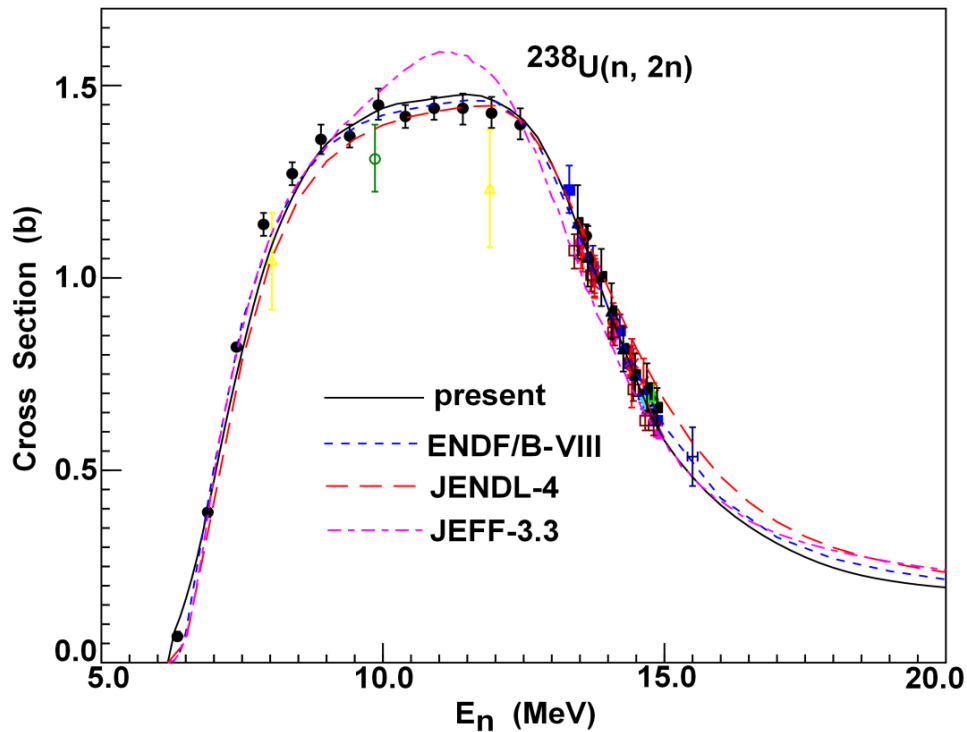
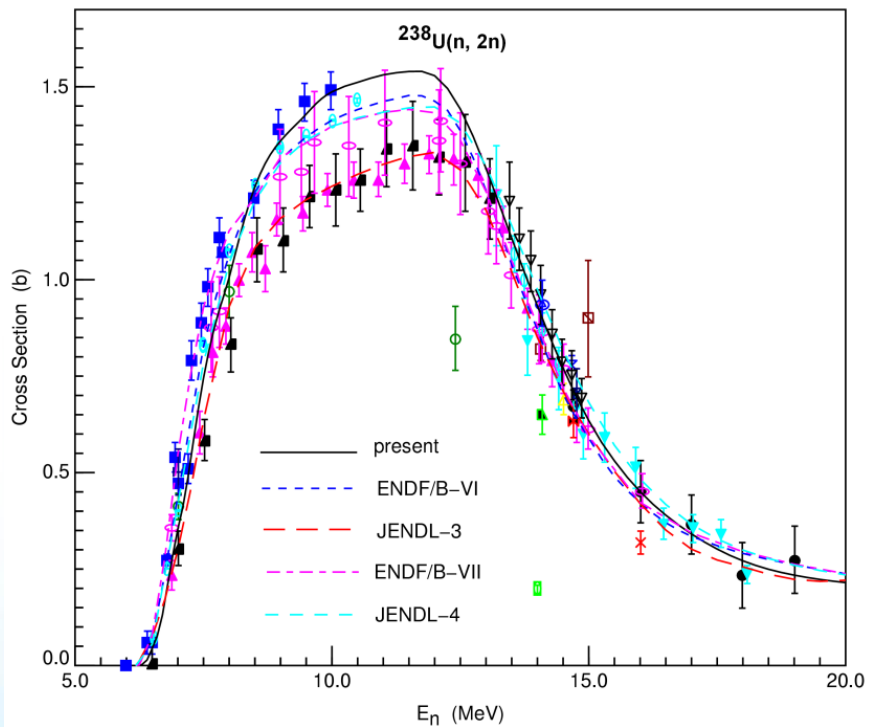
评价核数据：

1. 实验数据;
2. 核反应理论模型计算。

评价核数据库的更新：

1. 用户的需求;
2. 新实验数据的给出;
3. 核理论模型的发展和改进。





国际上核反应理论模型程序： (中子与核 ($11 \leq Z \leq 100$) 反应)

美国：	GNASH:	$E \leq 250$ MeV	
	EMPIRE	$E \leq 200$ MeV	IAEA合作
	TNG	$E_n \leq 20$ MeV	
	CoH3	$E \leq 20$ MeV	
日本：	CCONE	$E \leq 200$ MeV	
欧洲：	TALYS:	$E \leq 200$ MeV	



中国核反应理论模型程序：

UNF: $E_n \leq 20$ MeV (中国原子能科学研究院：张竞上)

MEND: $E \leq 250$ MeV (南开大学：蔡崇海)

(γ , n, p, d, t, ^3He , α)

轻核反应程序系列：

LUNF: $E_n \leq 30$ MeV (张竞上)

^6Li , ^7Li , ^9Be , $^{10,11}\text{B}$, ^{12}C , ^{14}N , ^{16}O 和 ^{19}F 。





中核集团
CNNC

中国原子能科学研究院

CHINA INSTITUTE OF ATOMIC ENERGY

核反应理论模型

1. 球形（变形）光学模型

唯象光学模型势和微观光学模型势。

2. 核反应统计理论

复合核反应理论-Hauser-Feshbach理论；

蒸发模型；

预平衡反应理论-角动量和宇称相关的激子模型；

轻粒子发射理论模型。

3. 发射粒子的双微分截面-理论模型

系统学 - Kalbach公式。



4. 能级密度模型

$$\rho(U, J, \pi) = F(\pi)F(J, U) \underline{\rho(U)}$$

(1) Gilbert and Cameron

(2) Back-Shifted 费米气体模型

(3) Ignatyuk 模型

(4) 微观理论模型

5. 裂变模型

单峰 (双峰) 裂变位垒.

穿透几率: Hill-Wheeler 公式

裂变谱- Madland-Nix 模型

6. 直接反应模型: 耦合道理论, 扭曲波玻恩近似理论.



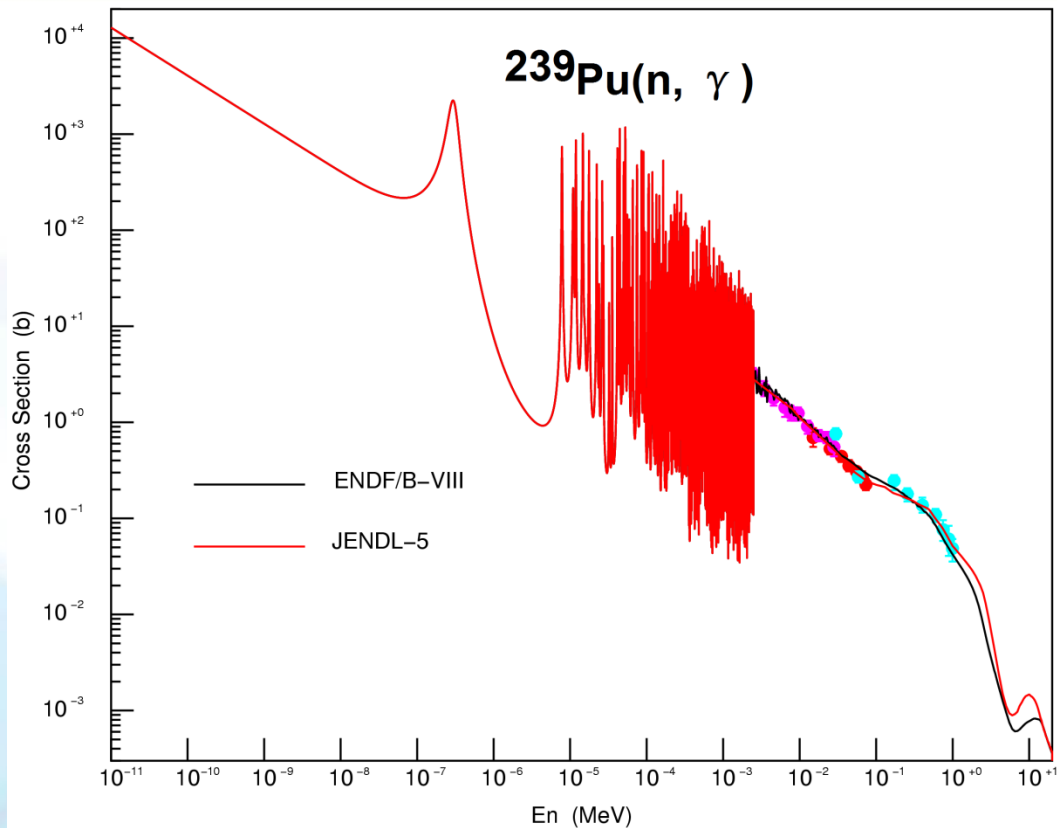
核数据理论计算和评价对实验数据的需求：

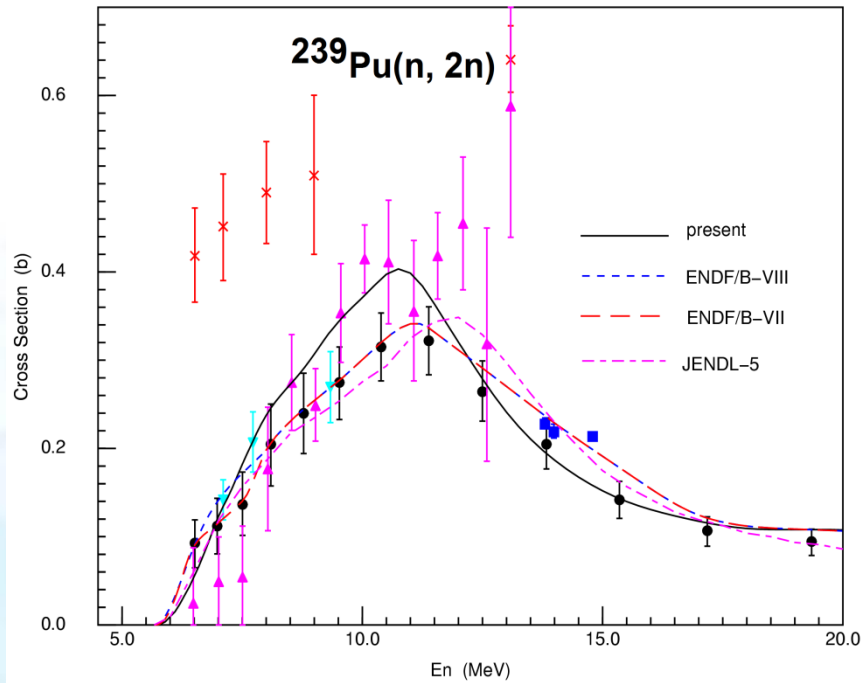
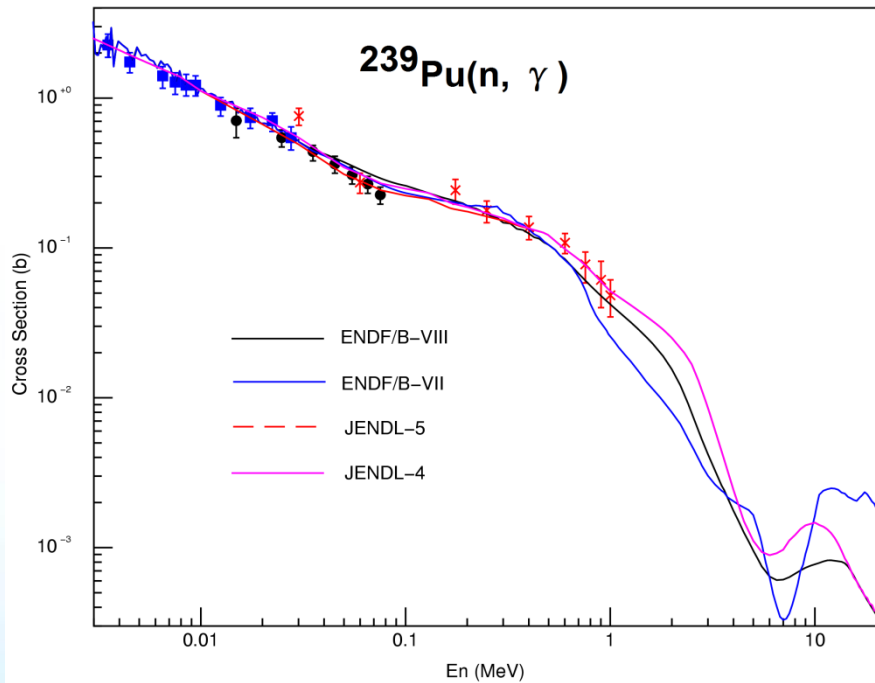
1. 重点核素及重点反应道；
2. 重点反应道的截面和角分布；
3. 澄清实验数据的分歧；
4. 无实验数据（中子能量在 200 MeV以下）。

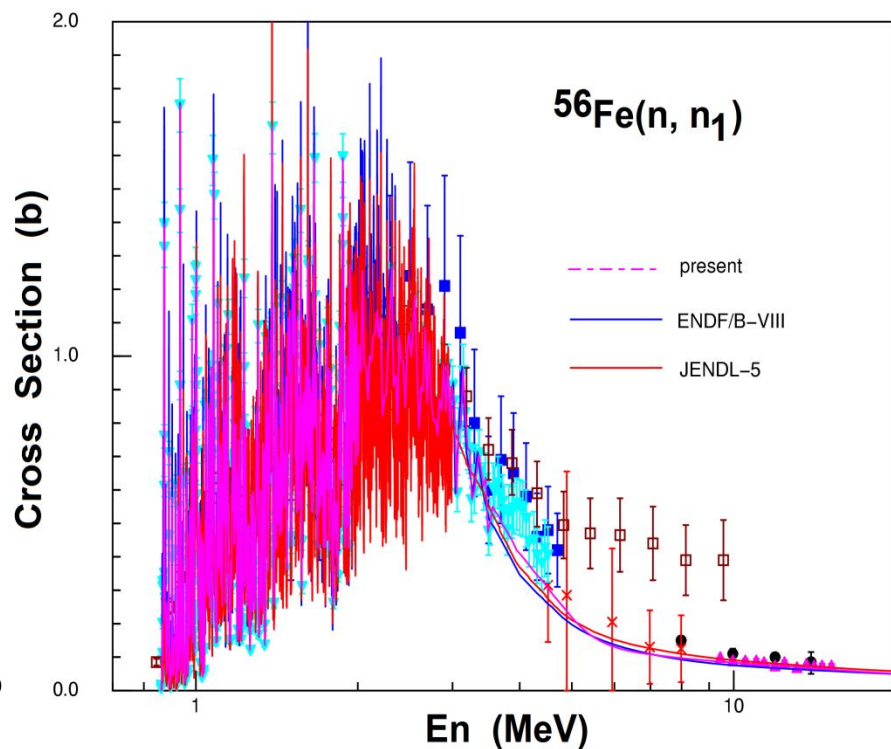
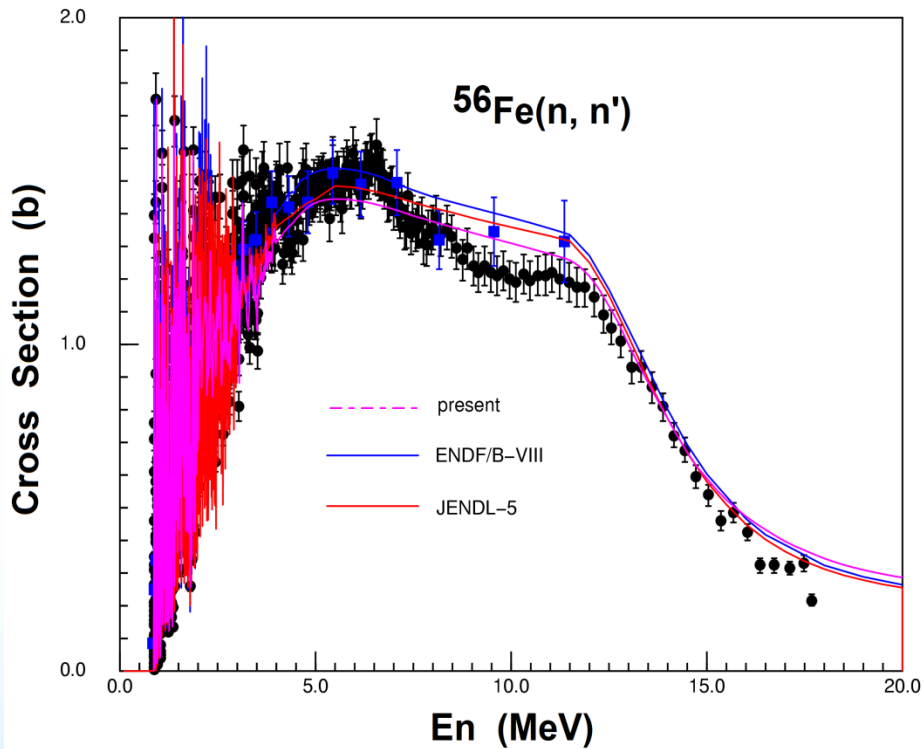


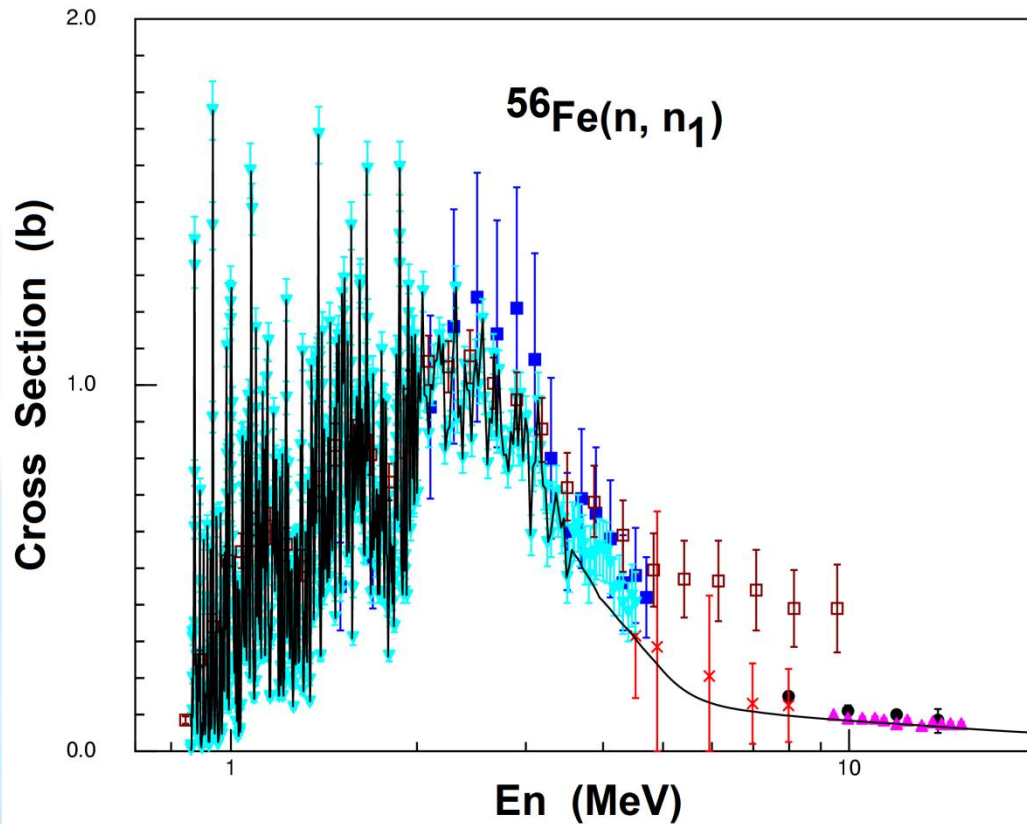
**(n, tot),
(n, el),
(n, γ),**

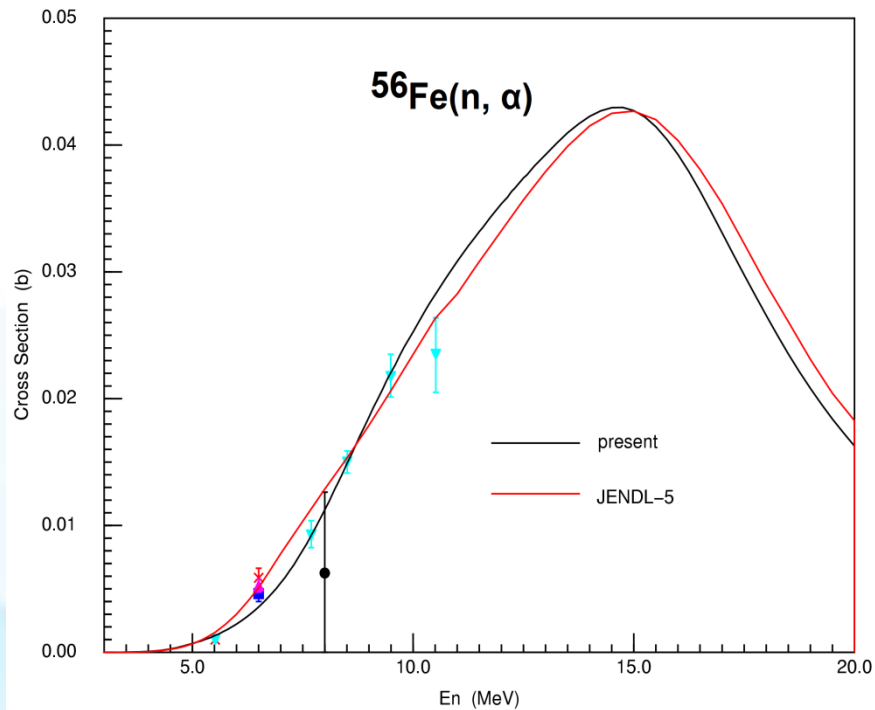
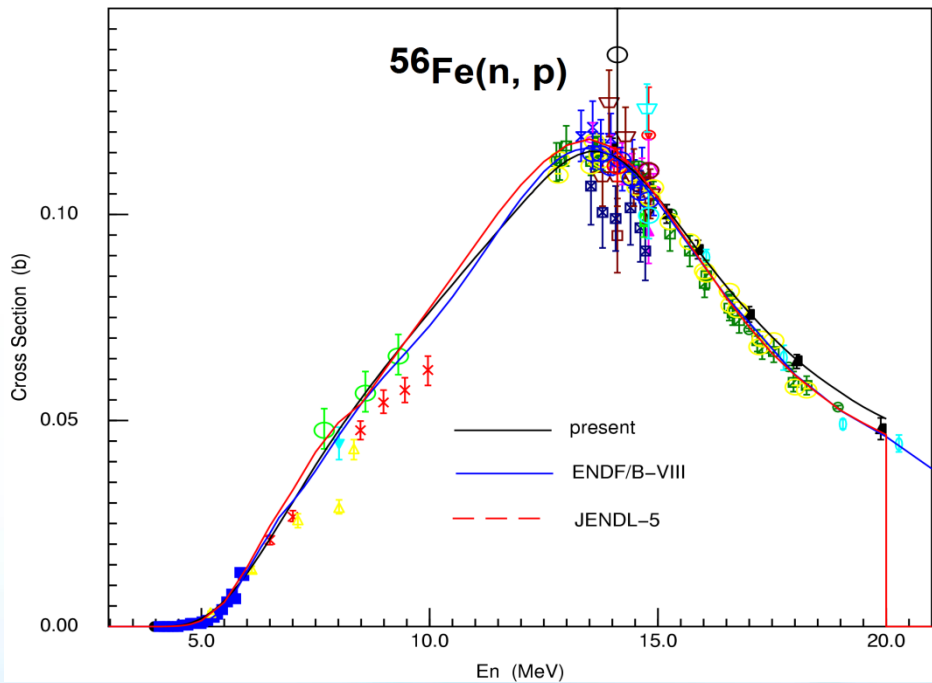
**(n, f),
(n, α).**

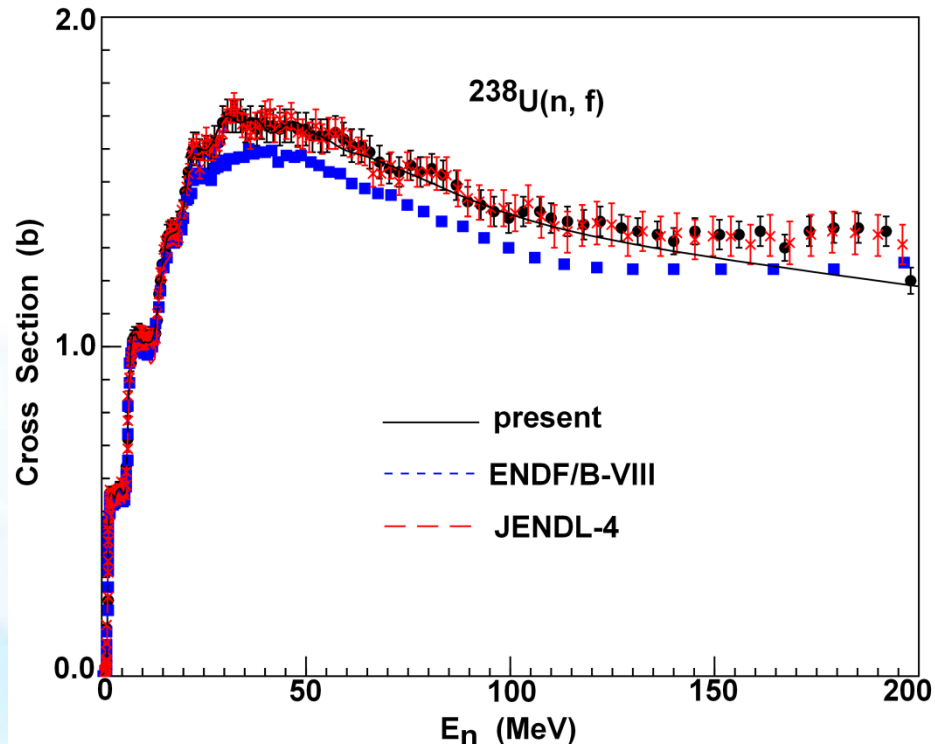
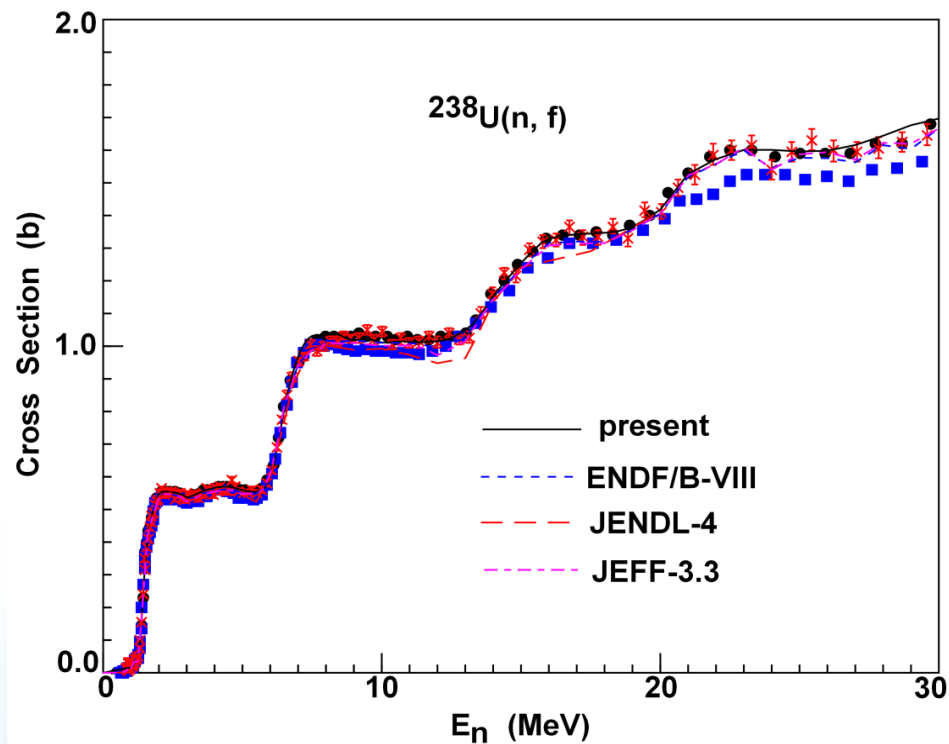






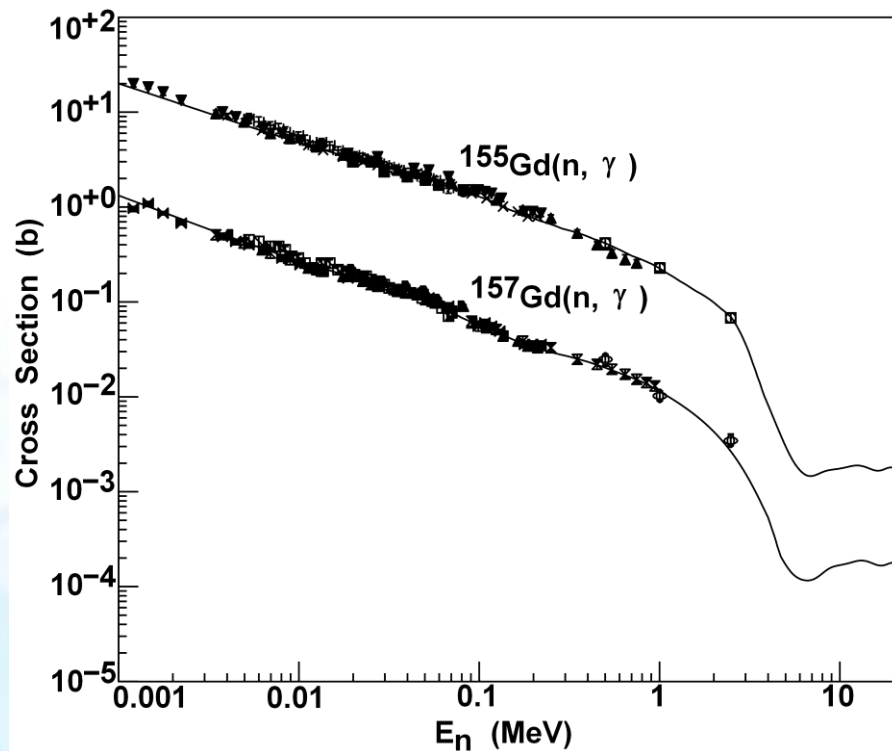
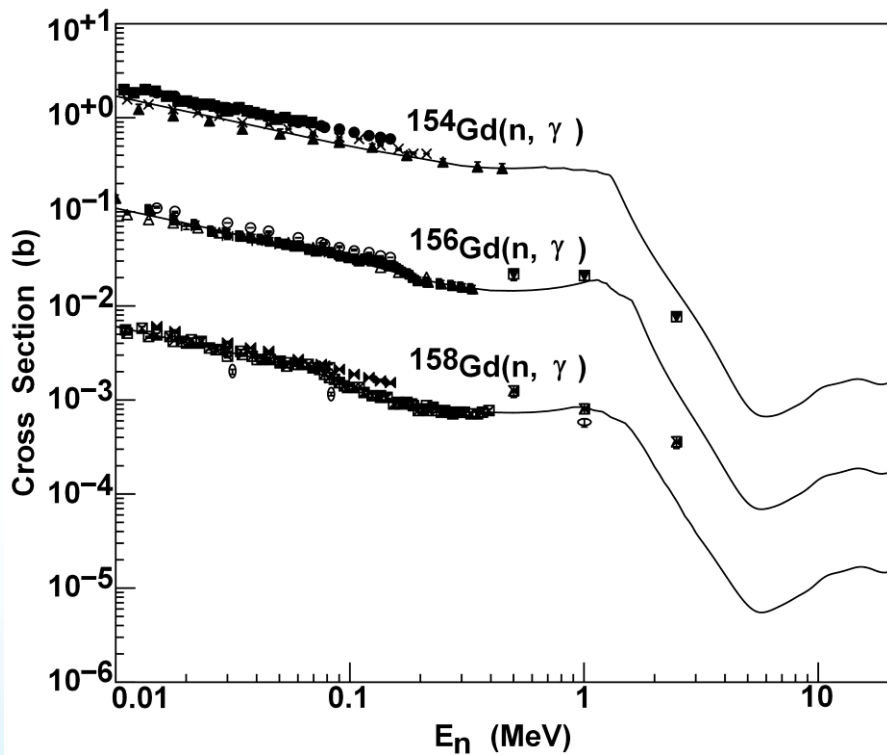


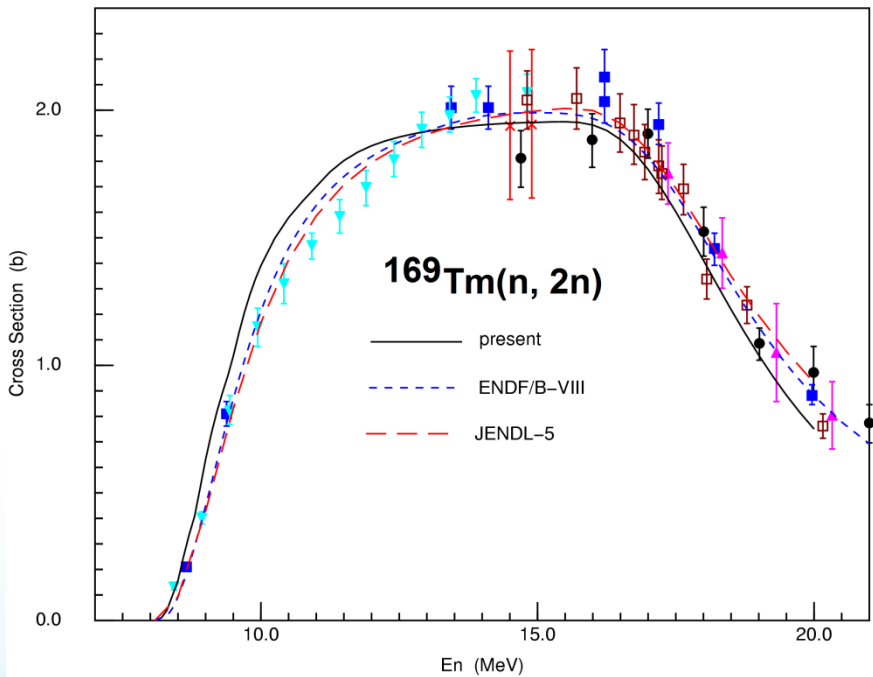




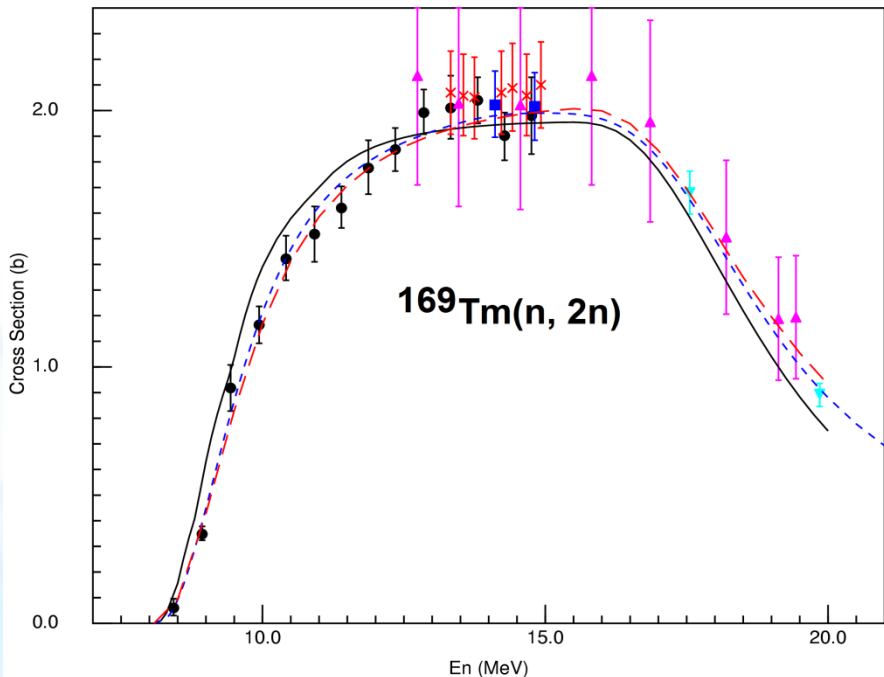
Tovesson(2014), Shcherbakov(2001), Lisowski(1991)





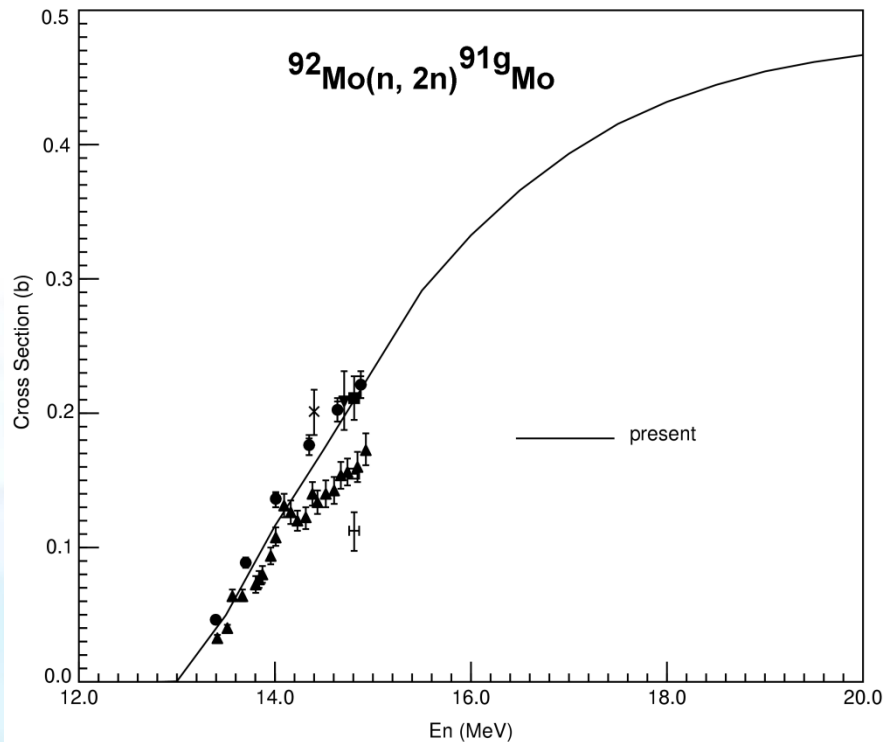
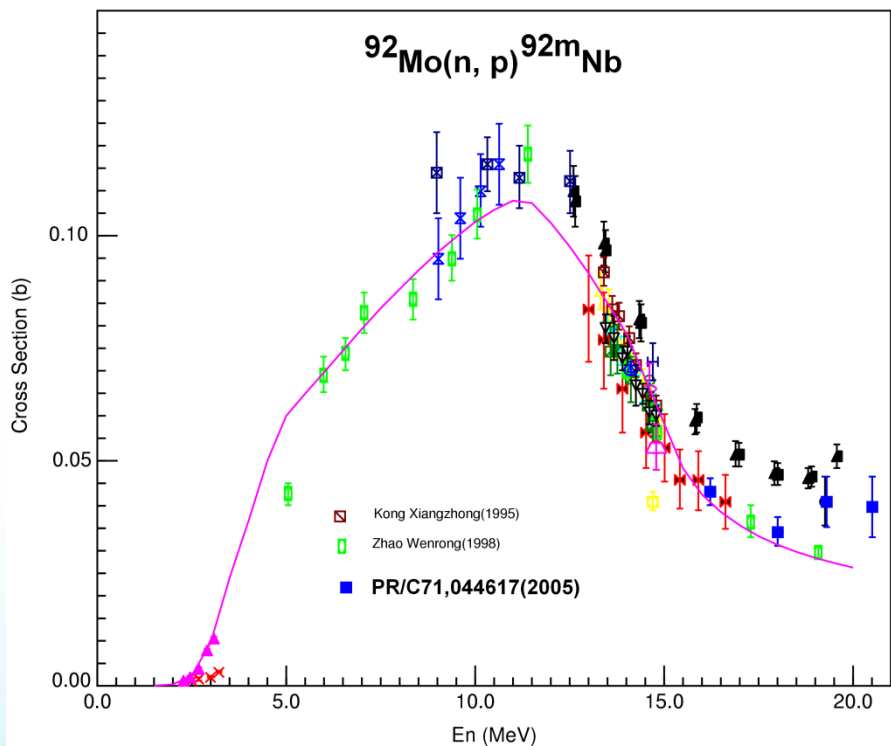


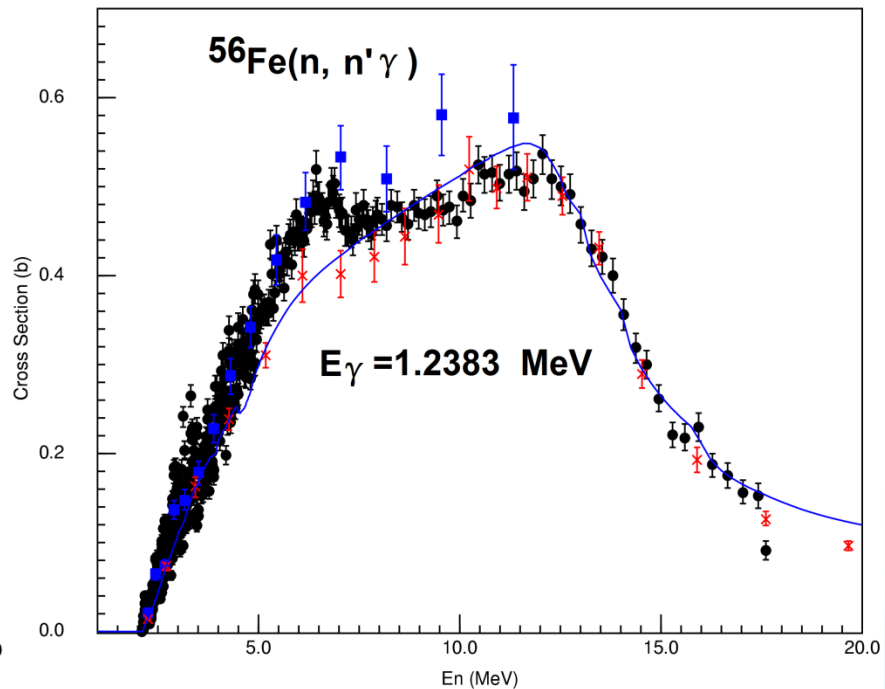
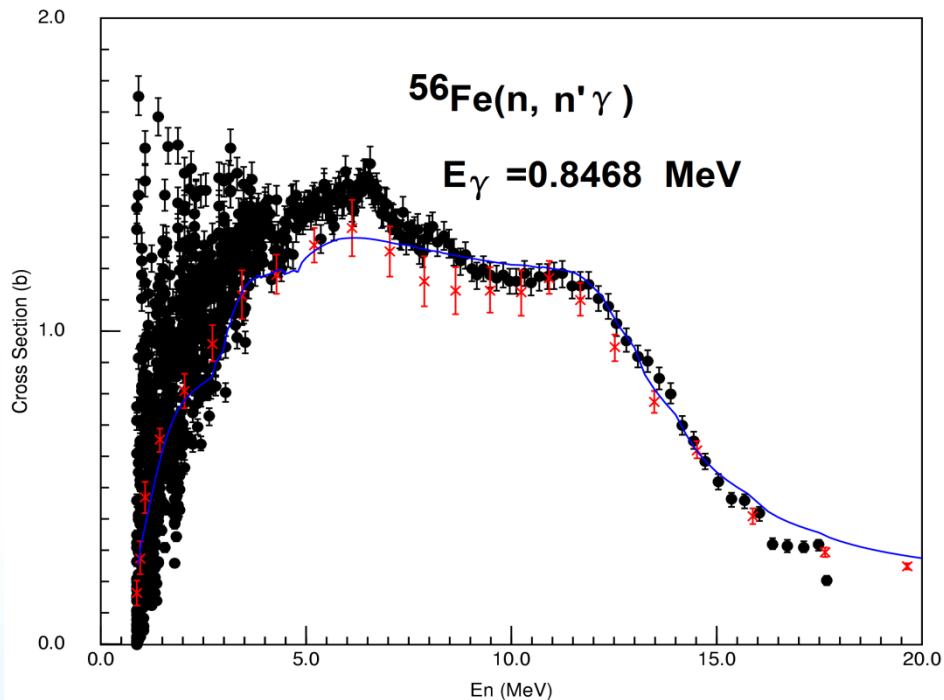
美国

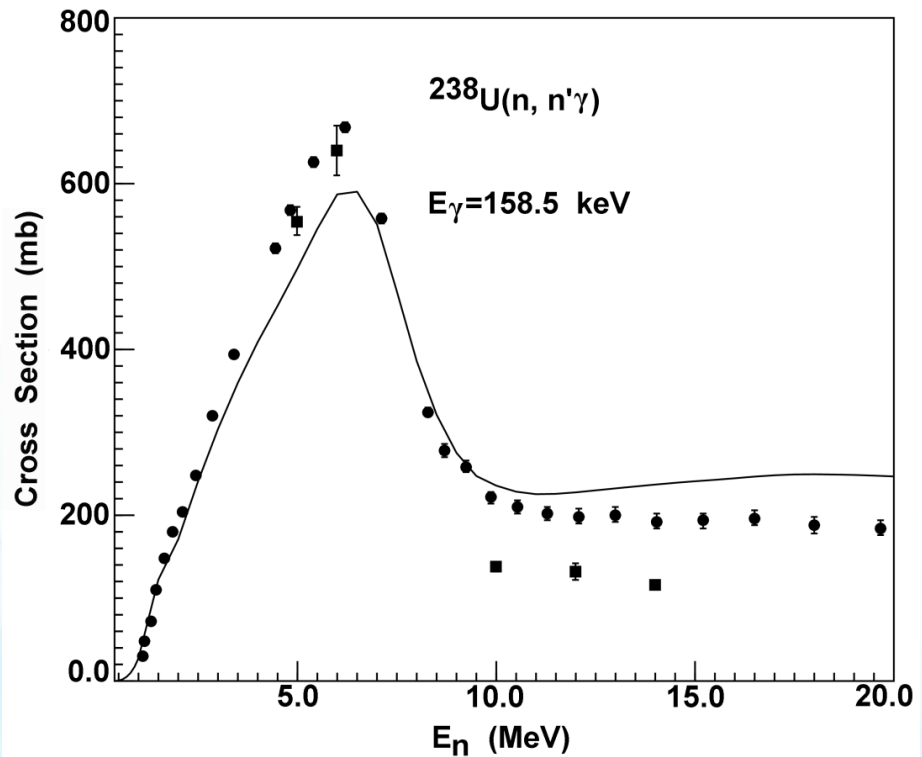
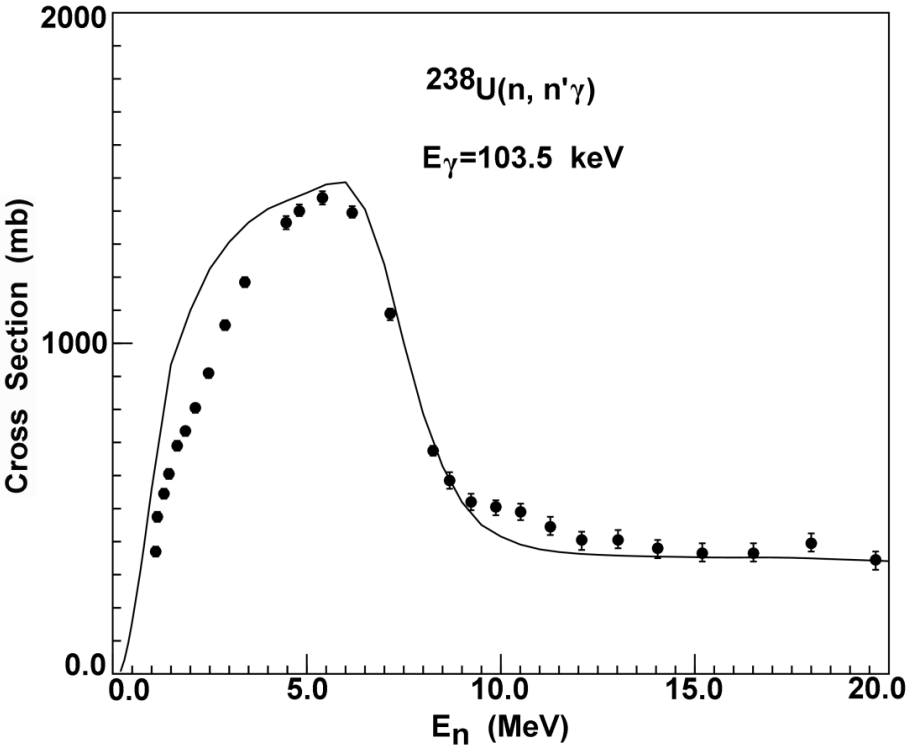


法国,日本



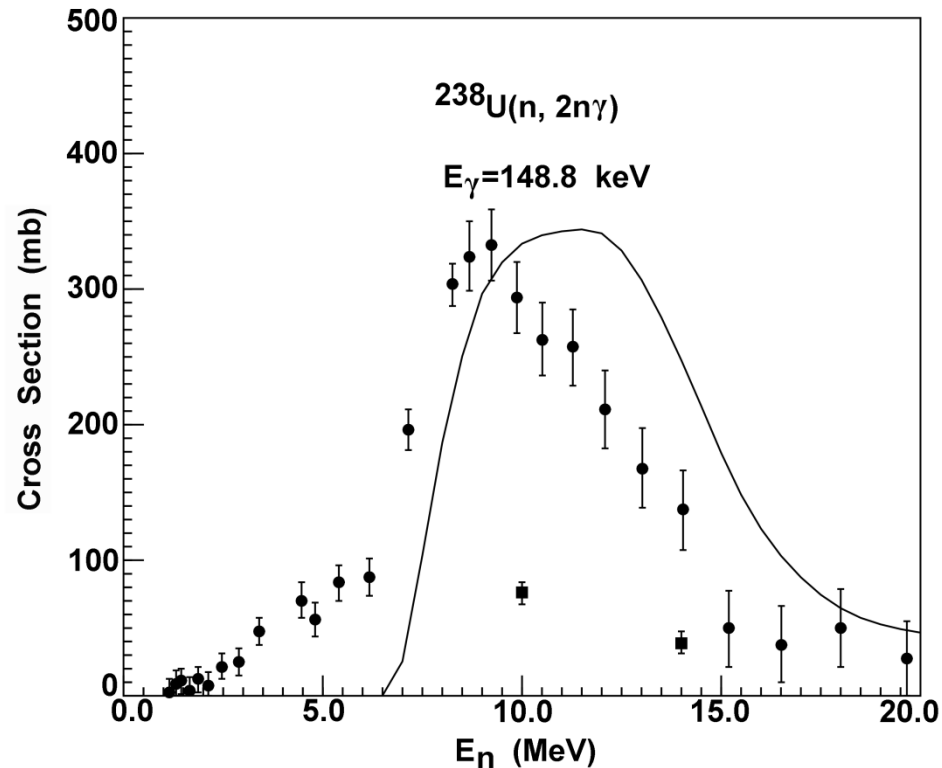
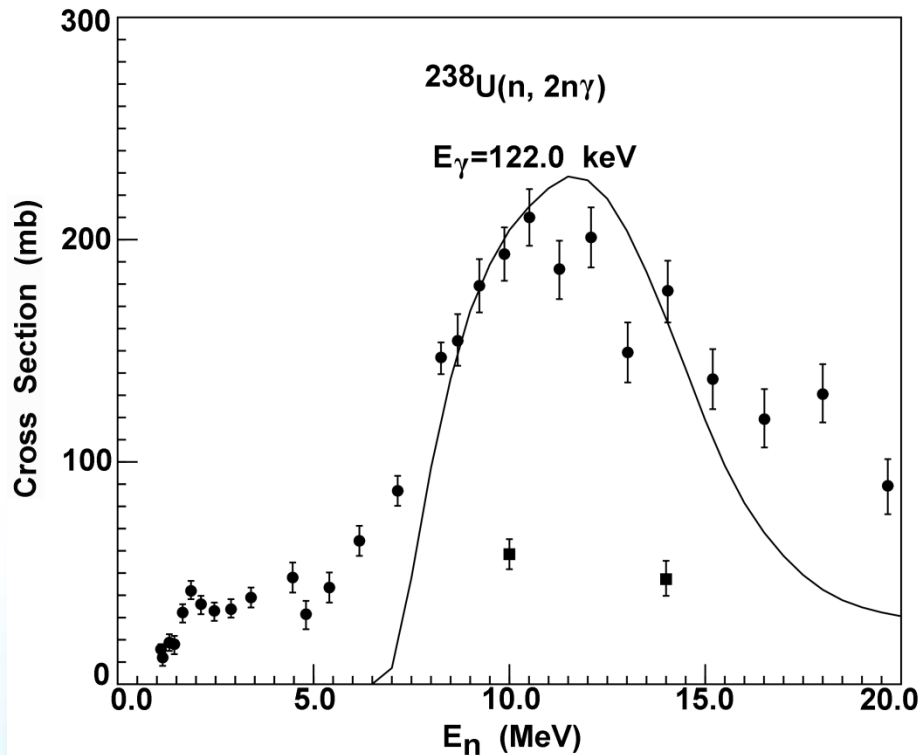






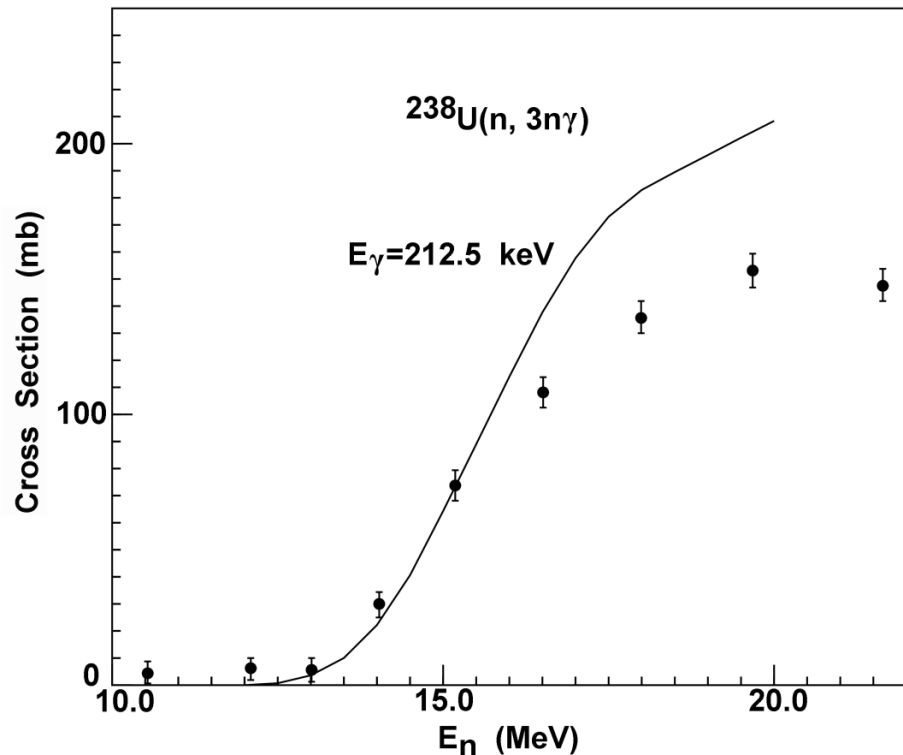
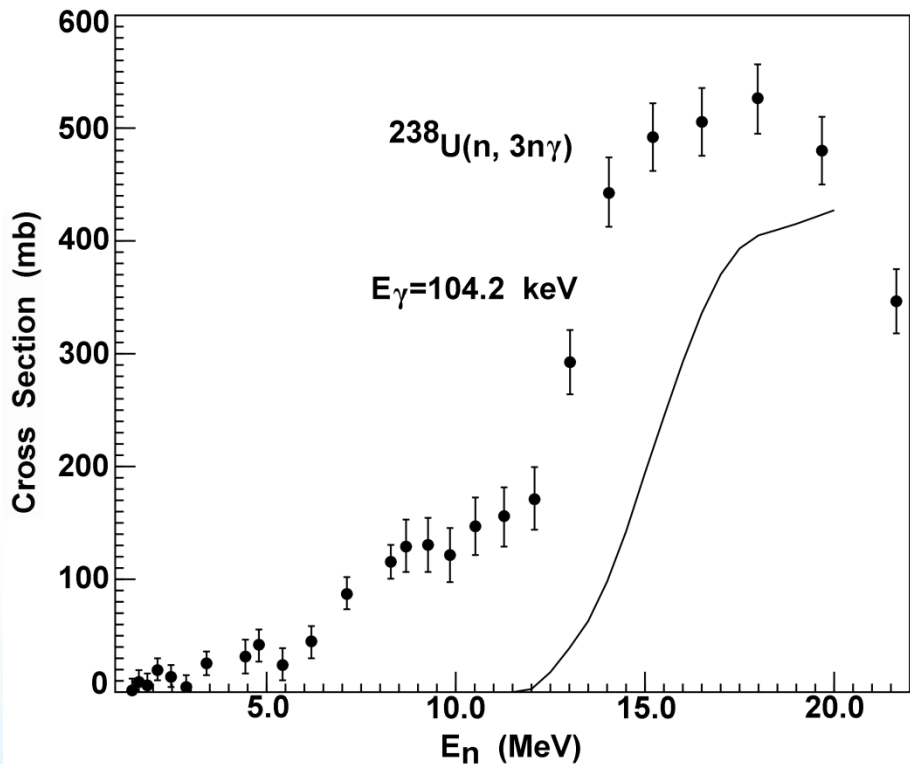
N. Fotiades (2004)





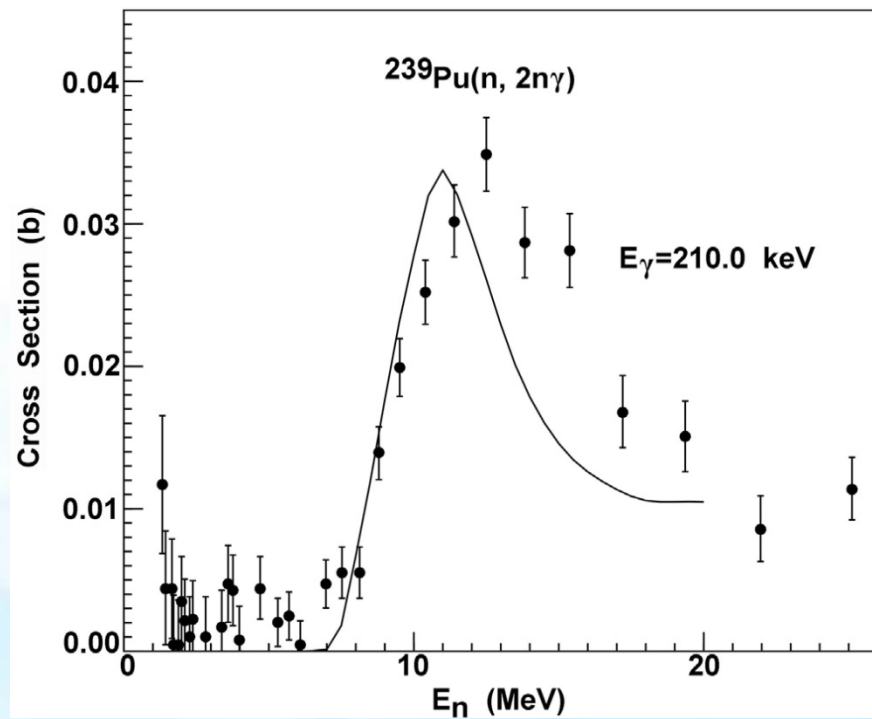
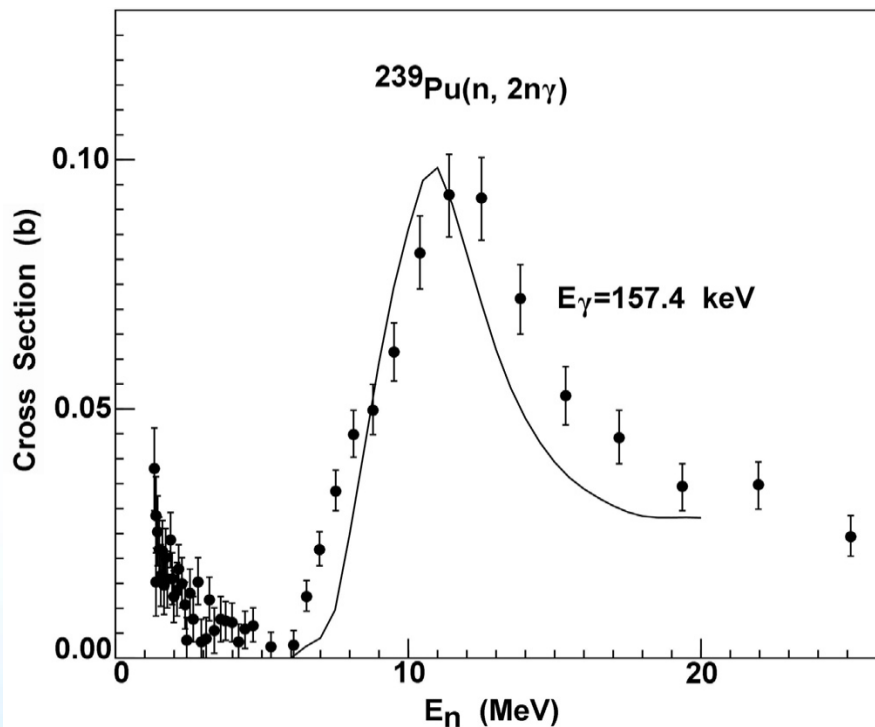
N. Fotiades (2004)

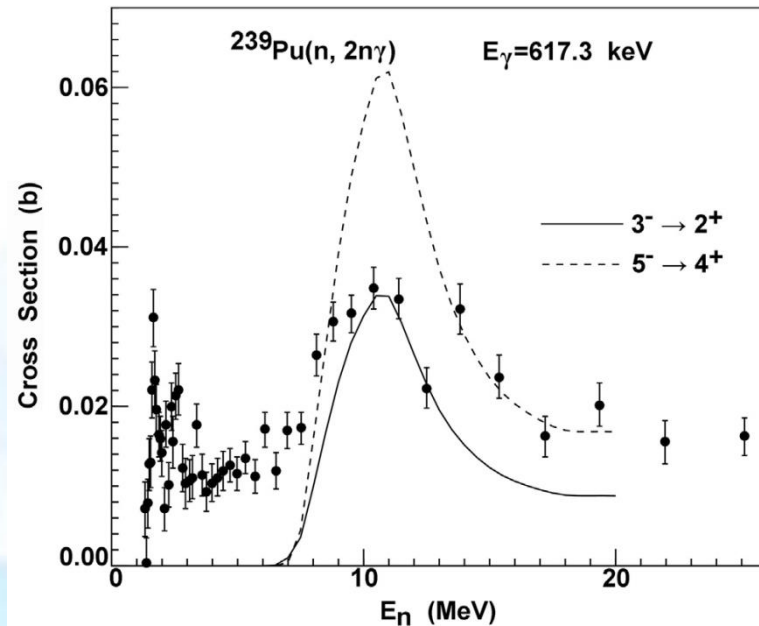
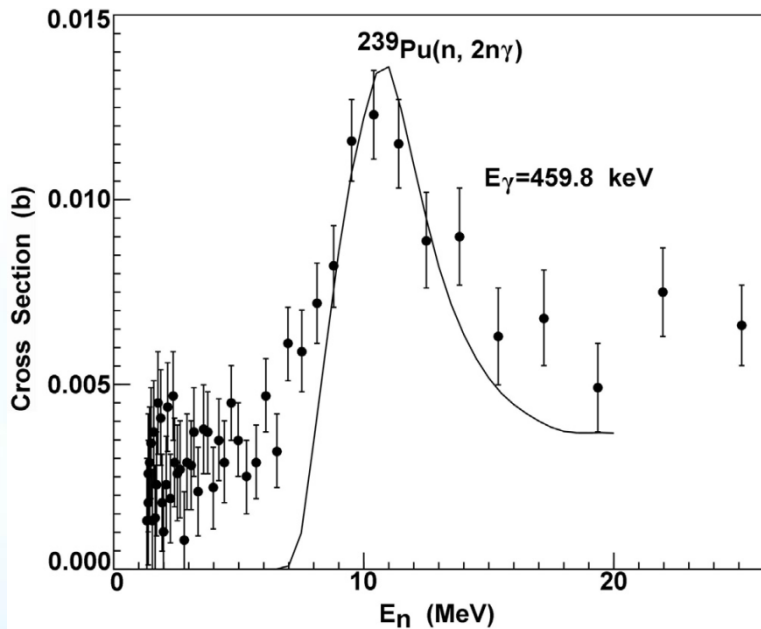


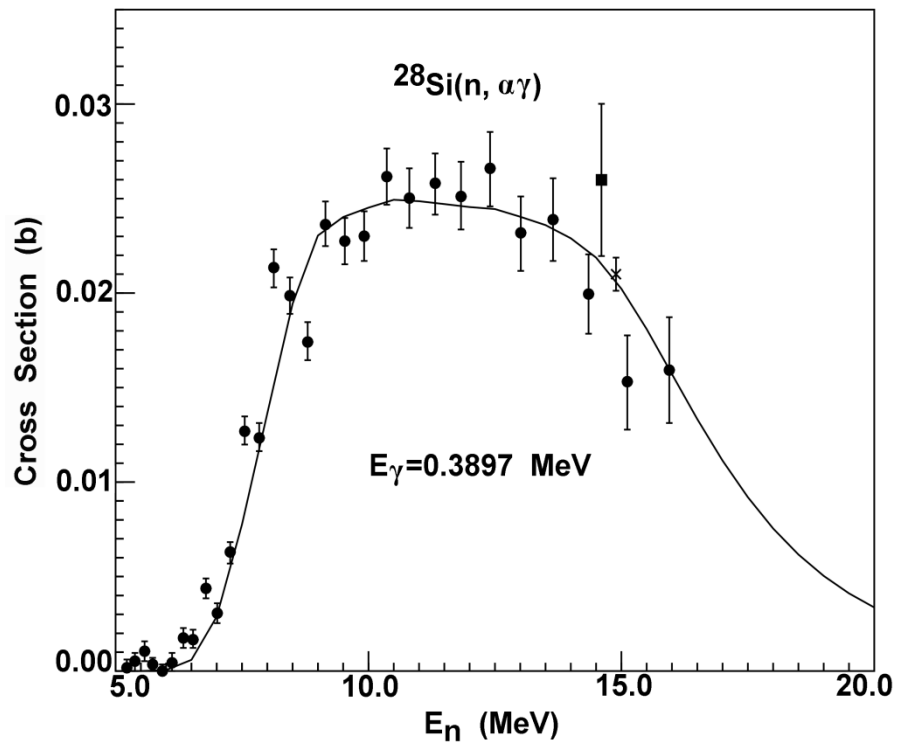
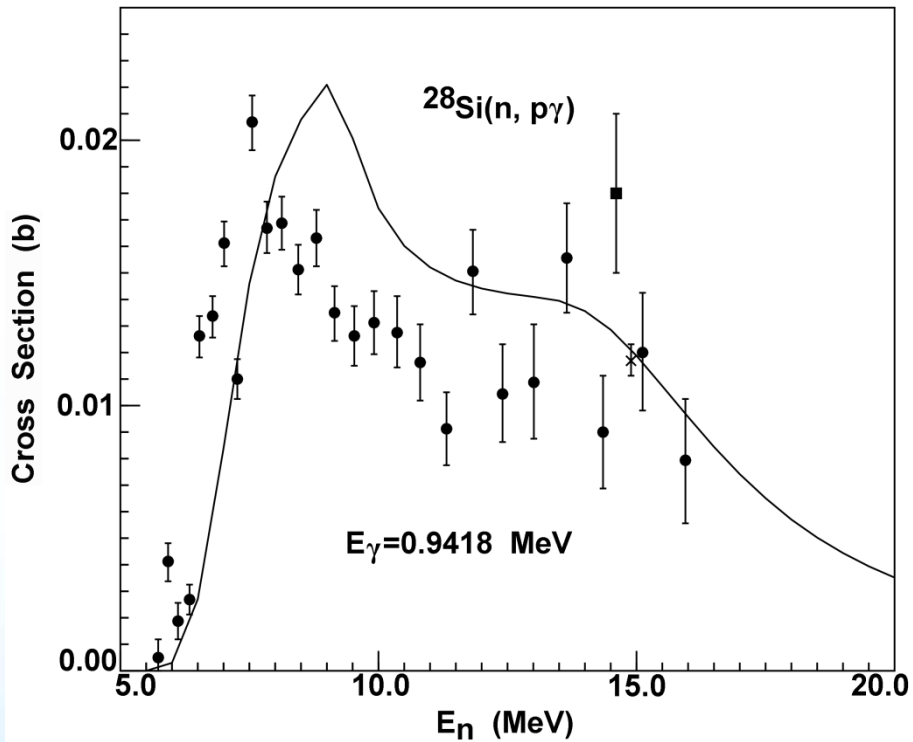


N. Fotiades (2004)





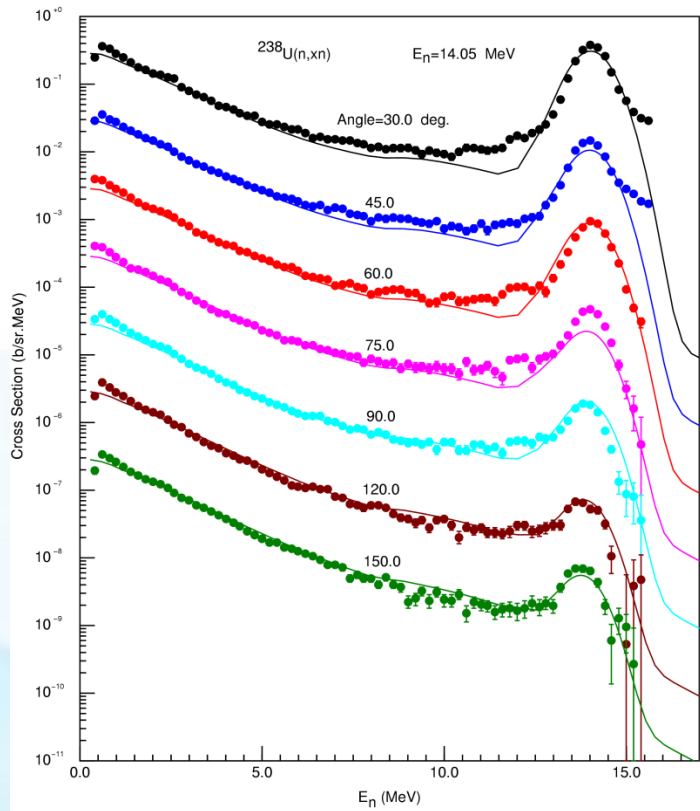
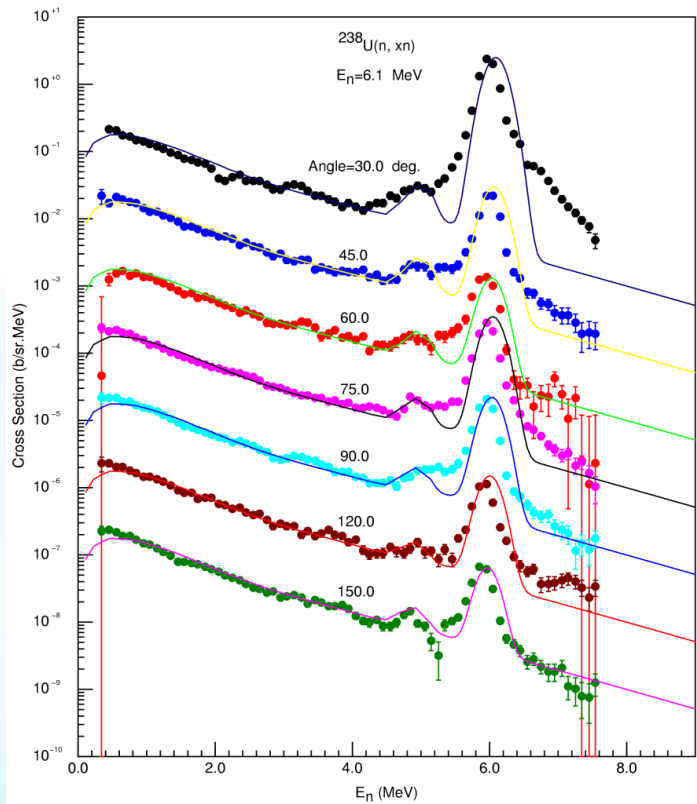




发射中子、质子、氘、氚、氦-3、 γ 和 α 的双
微分截面，**裂变中子能谱**。

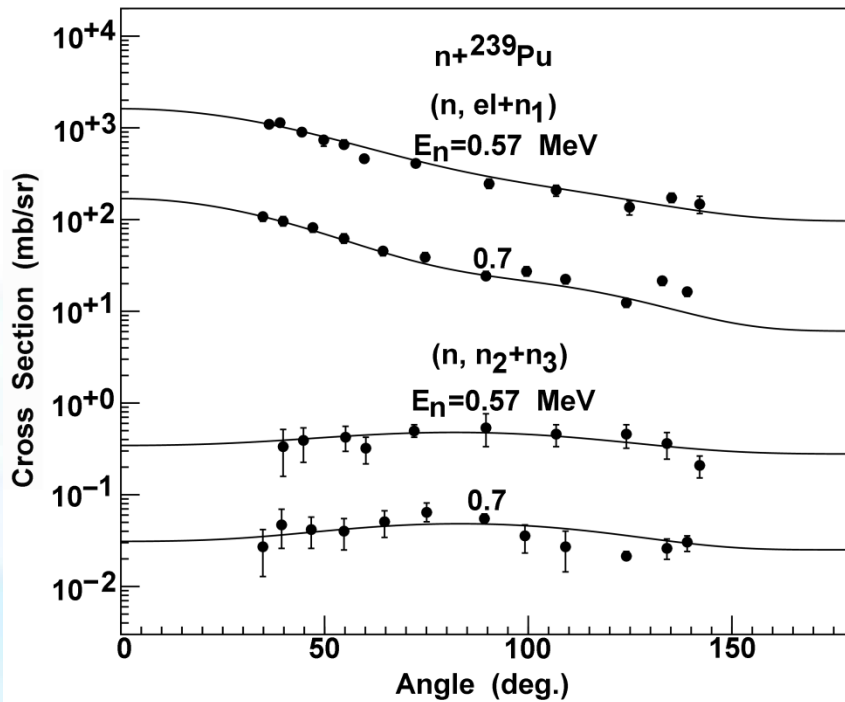
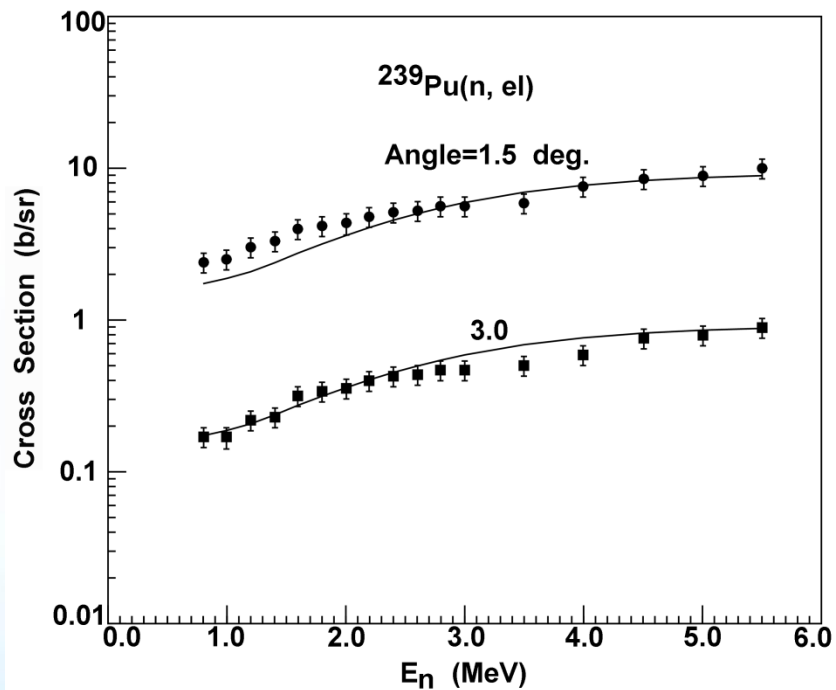
单能点中子引起的反应。





Baba(1989)







中核集团
CNNC

中国原子能科学研究院

CHINA INSTITUTE OF ATOMIC ENERGY

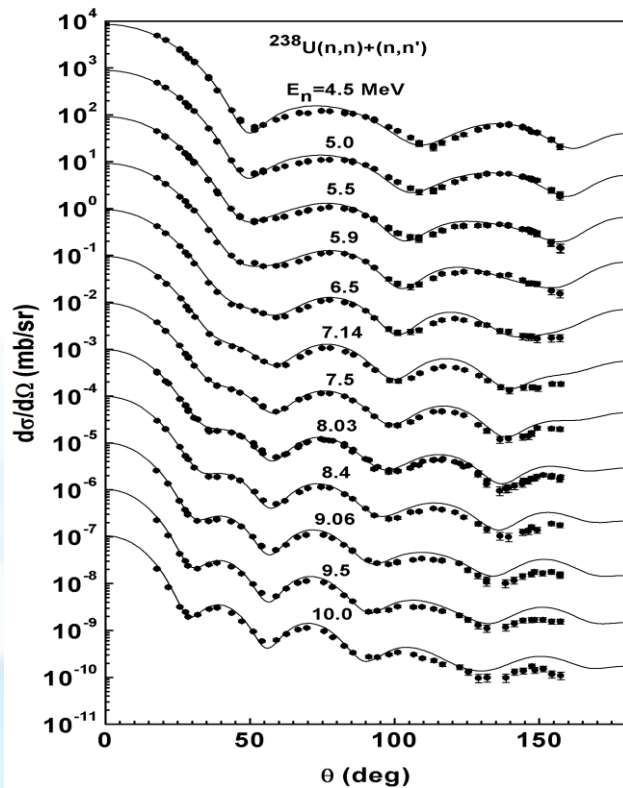
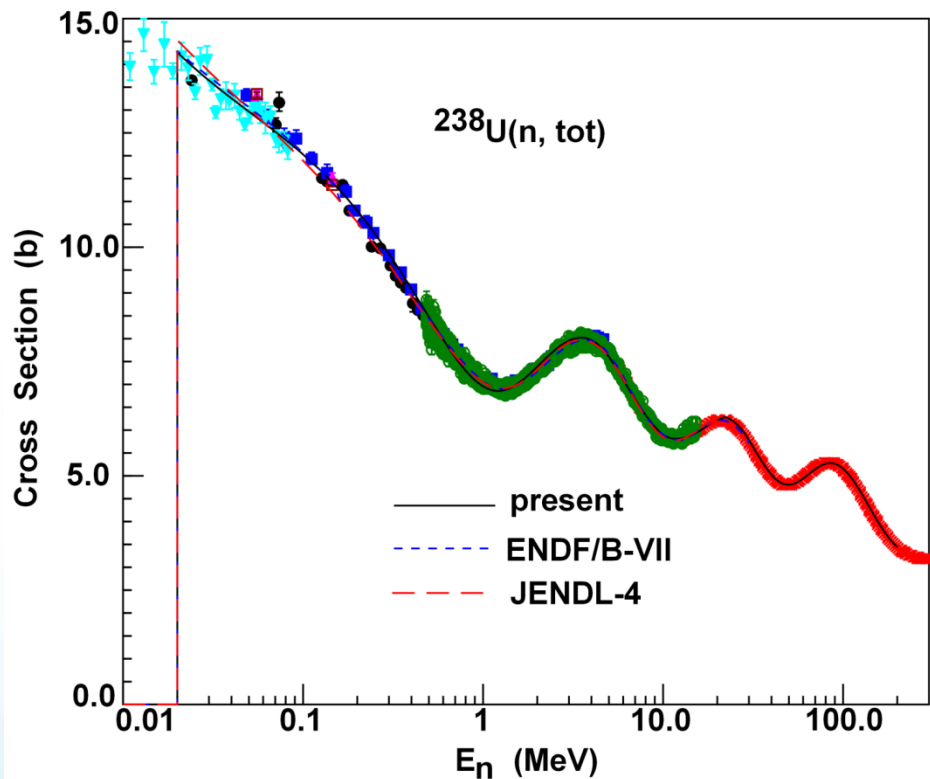
核反应理论模型的改进和发展:

(1) 唯象光学模型势

建立在实验测量的总截面，去弹性散射截面，弹性散射截面和角分布基础上(分立能级的非弹性散射截面和角分布)，并有一定数量的可调节的参数。

适用于稳定核及稳定核附近的不稳定核。



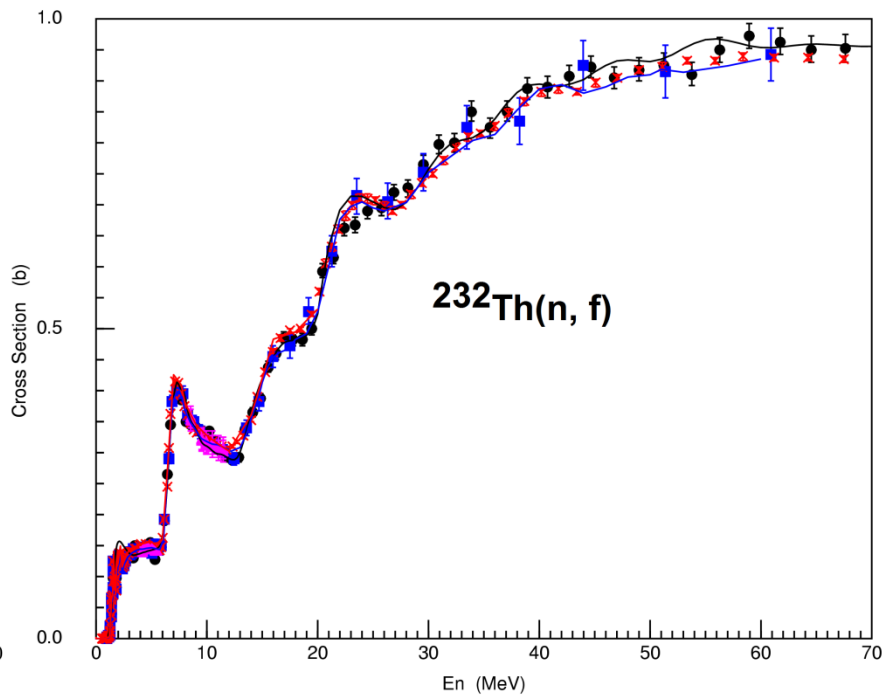
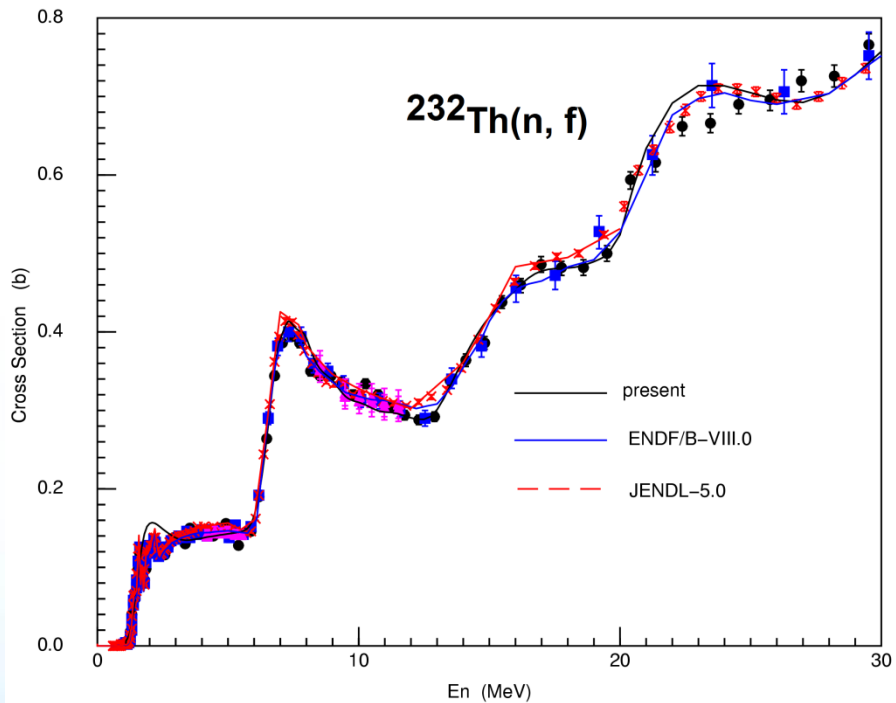


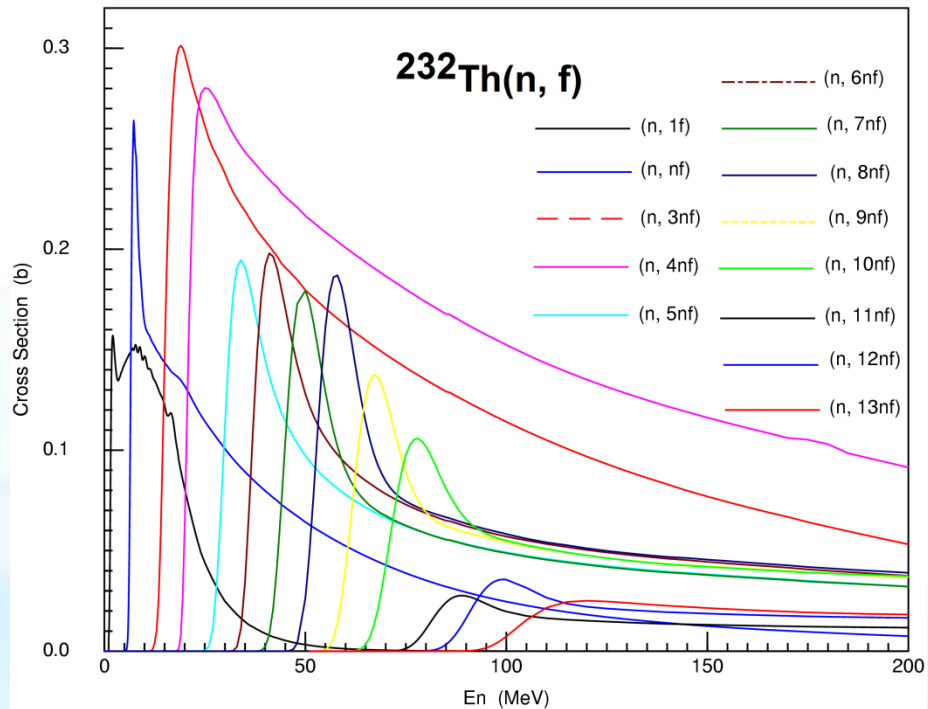
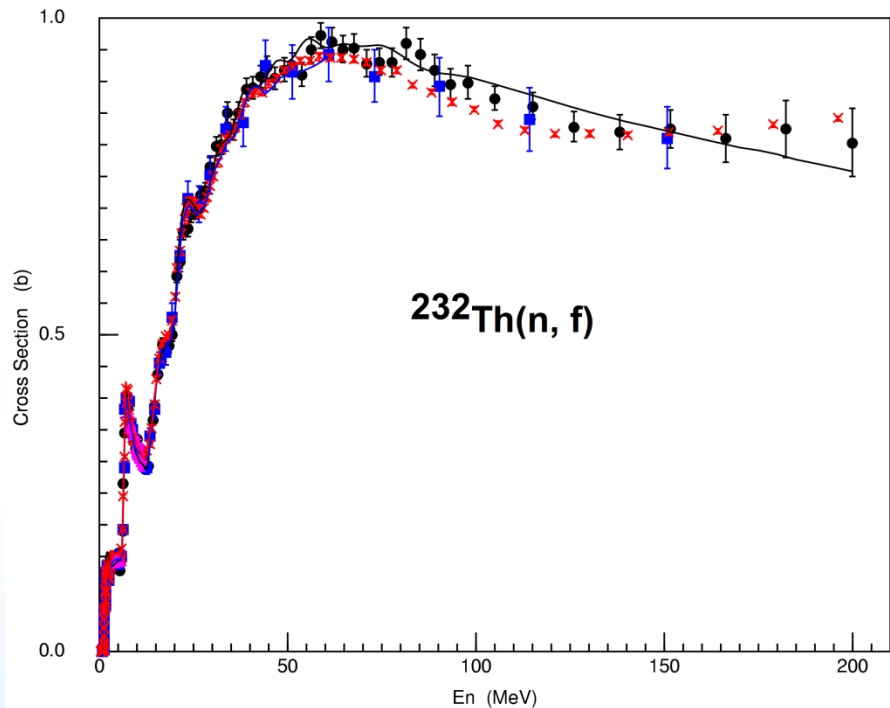
(2) 核能级密度理论模型。

(3) 核裂变理论模型。

(4) 核结构相关的理论模型。









四. 小 结

1. 评价核数据的研制

精确的实验测量数据，好的理论模型，合理的模型参数，可靠的研究方法。

2. 理论模型和参数的改进。

3. 全套评价核数据的检验。



谢谢大家!

