

基于贝叶斯神经网络的n-p散射截面评价

任文凯，刘杰，夏聪，邬泽鹏，张国辉

北京大学物理学院重离子物理研究所

目录

1. 研究背景、意义与现状

2. 原理和方法

3. 研究成果

4. 总结

1. 研究背景、意义与现状

- 中子标准截面

- 中子核反应标准截面是**中子核数据库的基础和重要组成部分**
- 中子核反应标准截面是中子探测、核反应截面实验测量、中子应用技术的前提

IAEA 中子标准截面^[1]

核反应	中子能量范围
H(n, n)	1 keV ~ 20 MeV
³ He(n, p)	0.0253 eV ~ 50 keV
⁶ Li(n, t)	0.0253 eV ~ 1 MeV
¹⁰ B(n, α)	0.0253 eV ~ 1 MeV
¹⁰ B(n, α ₁ γ)	0.0253 eV ~ 1 MeV
C(n, n)	10 eV ~ 1.8 MeV
Au(n, γ)	0.0253 eV, 0.2 MeV~2.5 MeV, 30 keV MACS
²³⁵ U(n, f)	0.0253 eV, 7.8 e~11 eV, 0.15 MeV~200 MeV
²³⁸ U(n, f)	2 MeV ~ 200 MeV

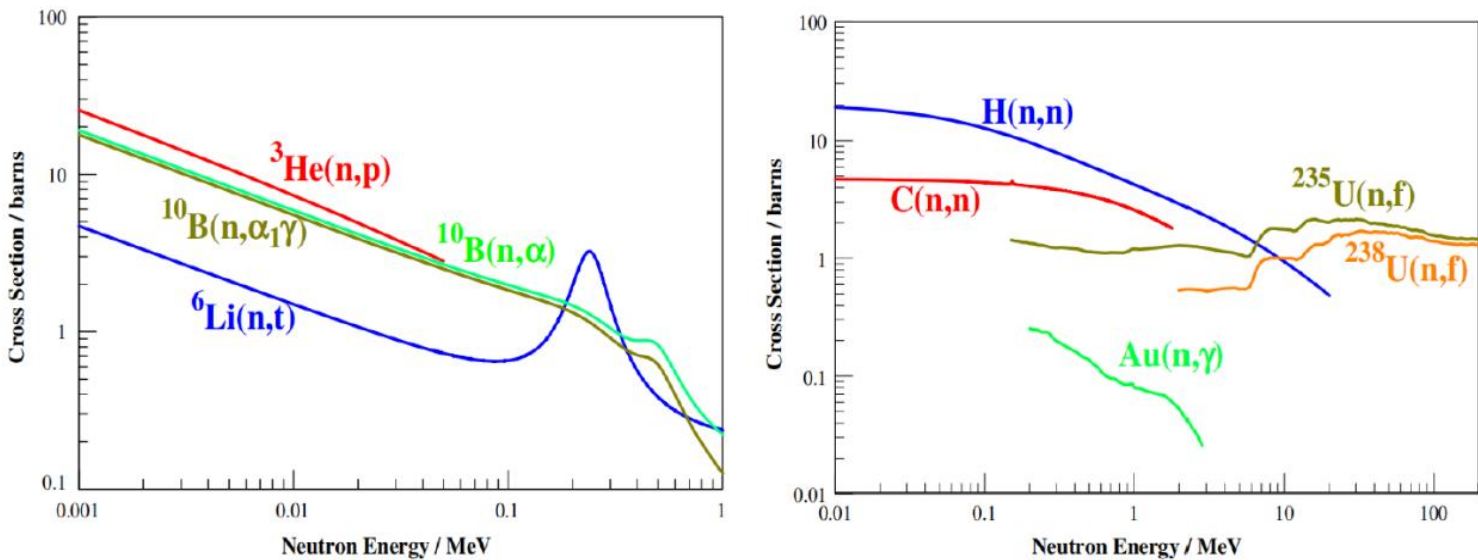


图1 中子标准核反应截面的激发函数^[1]

[1] A.D. Carlson et al., Nucl. Data Sheets 148, 143 (2018)

1. 研究背景、意义与现状

• 中子标准截面现状 n-p散射

- n-p散射($^1\text{H}(n, n)$)截面是**最早**的中子标准截面；
- 在已有的1–20 MeV能区的中子标准截面数据中，n-p散射截面数据**精度最高**；
- 其他核反应截面(包括裂变)的测量大多需要依赖与n-p散射截面数据；
- 含氢元素的探测器(液体闪烁体等)被用于MeV能区的中子探测，多用于**高能中子剂量测量**。

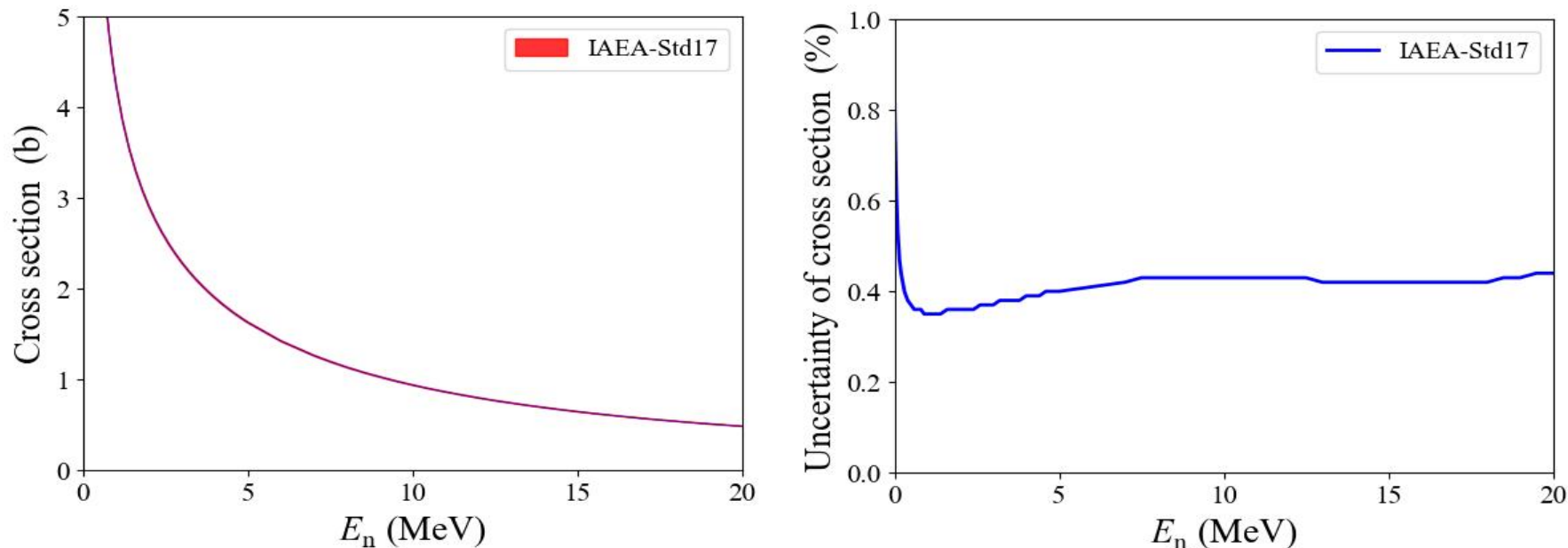


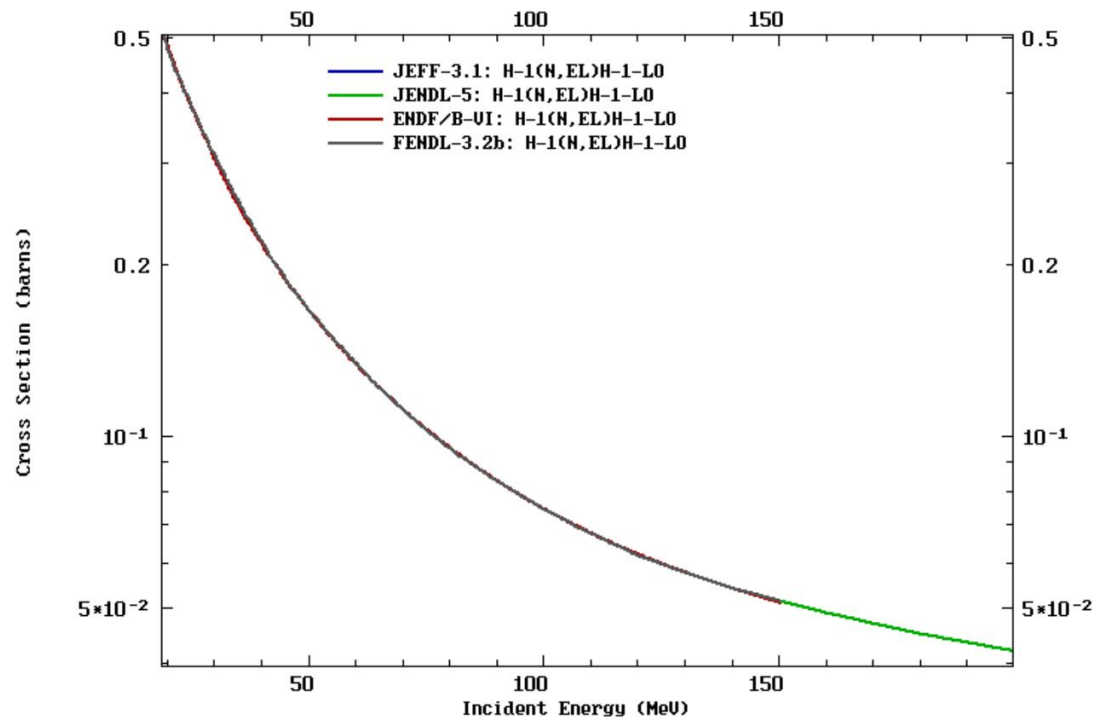
图1 1 – 20 MeV能区n-p散射标准截面和不确定度^[1]

[1] A.D. Carlson et al., Nucl. Data Sheets 148, 143 (2018)

1. 研究背景、意义与现状

• n-p散射 评价

仅有少数评价库对20 MeV以上中子能区的n-p散射截面做出了评价



20 – 200 MeV能区n-p散射截面评价结果

- ENDF/B: 在2001年发布的ENDF/B-VI库中, 对20 – 150 MeV的n-p散射截面做出了评价, 然而, 在更新版本后, 却又删除该能区评价结果
- JENDL: 早期的JENDL-3.3和JENDL-4.0数据库中, n-p散射截面的评价仅局限于20 MeV; JENDL-5数据库中, 则包含了20 – 200 MeV的n-p散射截面评价数据
- JEFF: 最新的JEFF-4.0采用了和JENDL-5一致的结果
- FENDL: 评价了20 – 150 MeV的n-p散射截面的评价数据
- BROND、ROSFOND和CENDL, 从未给出20 MeV以上的n-p散射评价数据
- **目前已有的20 MeV以上n-p散射截面的评价数据均没有给出不确定度**

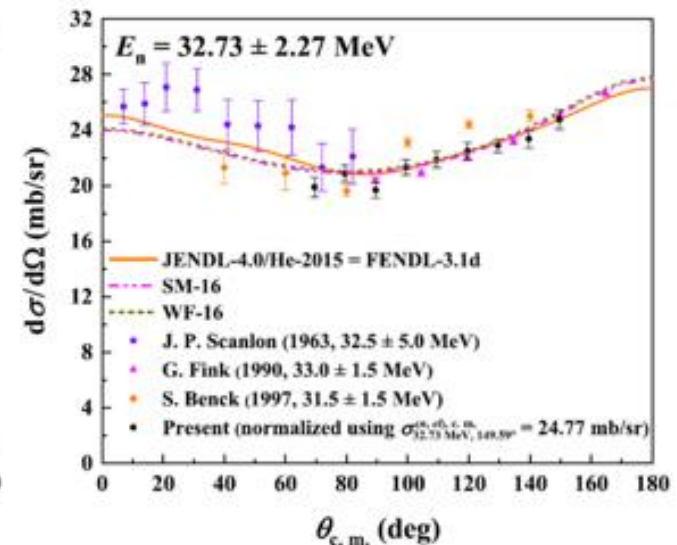
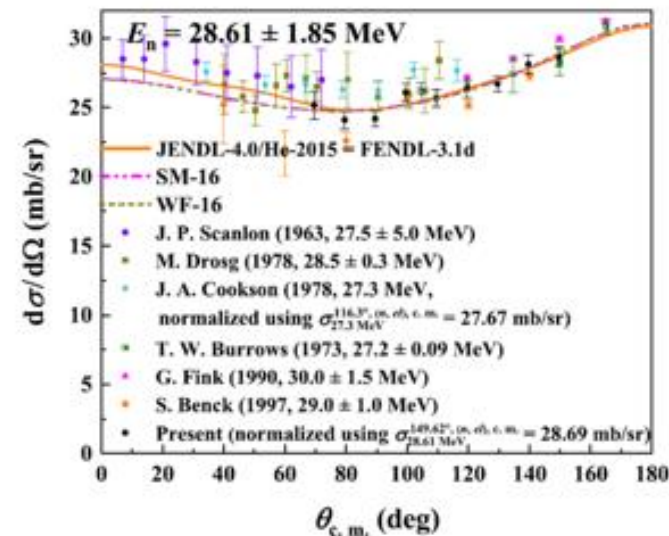
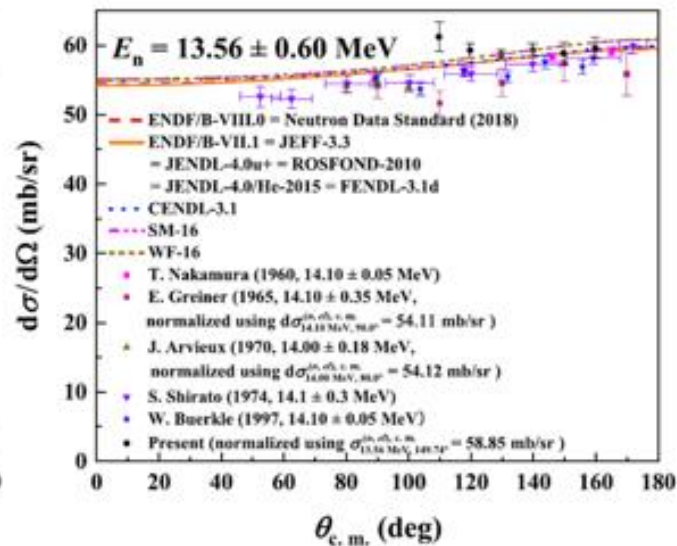
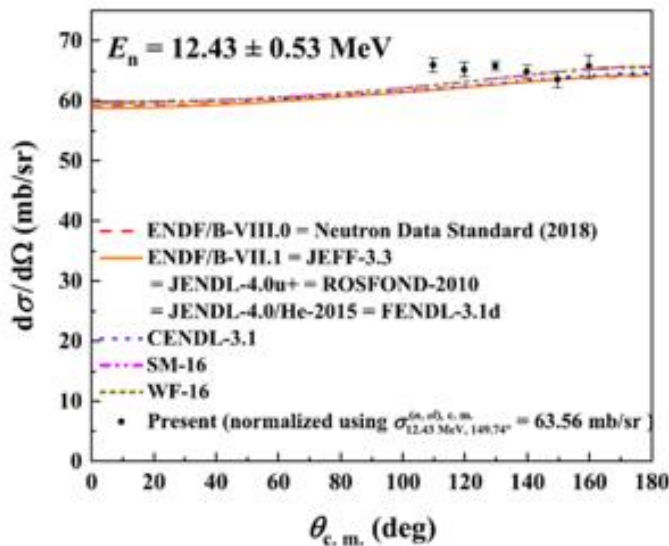
1. 研究背景、意义与现状

• n-p散射 实验基础

2019年 我们基于LPDA探测器 测量了n-p散射微分截面 (6.14 ~ 52.48 MeV (23 energy points))



LPDA探测器 [1]



[1] HaoyuJiang, et al. Eur. Phys. J. A (2021) 57:6

目录

1. 研究背景、意义与现状

2. 原理和方法

3. 研究结果

4. 总结

2. 原理和方法

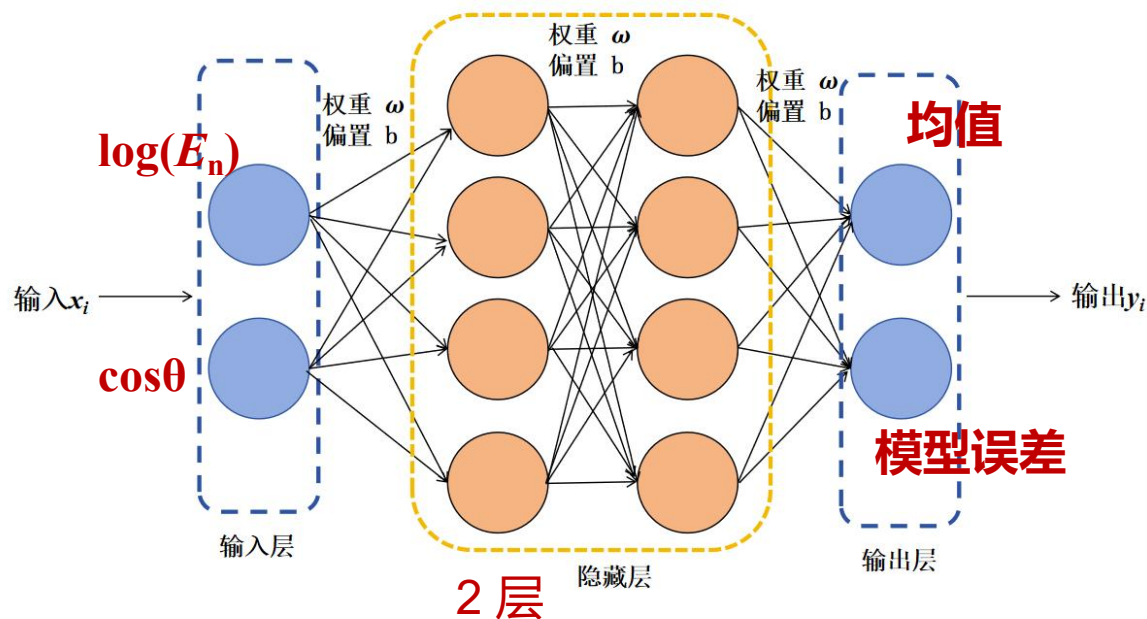
- **n-p散射 实验数据选择**
 - 截面测量结果较少
 - 微分截面测量结果较多 (53组 2301个数据) 1MeV ~ 1080 MeV

Author	Year	Neutron energy (MeV)	Author	Year	Neutron energy (MeV)	Author	Year	Neutron energy (MeV)
Haoyu Jiang+	2021	$6.14 \leq E_n \leq 52.50$	N.S.P.King+	1980	$E_n = 63.10$	E.Tagliaferri Jr	1966	$E_n = 40.00$
N.V.Kornilov+	2020	$E_n = 14.90$	M.Drosg+	1979	$25.30 \leq E_n \leq 31.10$	J.P.Scanlon+	1963	$22.50 \leq E_n \leq 109.00$
K.Kondo+	2006	$E_n = 14.20$	R.Carlini+	1978	$E_n = 790.00$	Yu.M.Kazarinov+	1962	$E_n = 200.00$
M.Sarsour+	2005	$E_n = 194.00$	M.Drosg	1978	$22.40 \leq E_n \leq 28.50$	F.Cambou	1961	$E_n = 14.60$
C.Johansson+	2005	$E_n = 95.60$	T.C.Montgomery+	1977	$25.80 \leq E_n \leq 50.00$	R.K.Hobbie+	1960	$E_n = 128.00$
T.Peterson+	2004	$E_n = 193.00$	A.J.Bersbach+	1976	$54.60 \leq E_n \leq 433.00$	T.Nakamura	1960	$E_n = 14.10$
V.Blideanu+	2004	$E_n = 96.00$	P.F.Shepard+	1974	$182.00 \leq E_n \leq 1028.00$	B.M.Golovin+	1959	$E_n = 590.00$
P.Mermod+	2004	$E_n = 94.80$	S.Shirato+	1974	$E_n = 14.10$	N.S.Amaglobeli+	1959	$E_n = 630.00$
N.Boukharouba+	2001	$E_n = 10.00$	V.J.Howard+	1974	$E_n = 129.00$	C.Y.Chih+	1957	$E_n = 90.00$
J.Rahm+	2001	$96.00 \leq E_n \leq 162.00$	T.G.Masterson	1972	$E_n = 24.00$	Yu.M.Kazarinov+	1956	$E_n = 580.00$
S.Benck+	1997	$29.00 \leq E_n \leq 72.80$	J.N.Palmieri+	1971	$E_n = 152.00$	J.D.Seagrave	1955	$E_n = 14.10$
T.E.O.Ericson+	1995	$E_n = 162.00$	L.N.Rothenberg	1970	$E_n = 24.00$	A.Galonsky+	1955	$E_n = 17.90$
L.C.Northcliffe+	1993	$E_n = 459.00$	J.L.Romero+	1970	$36.00 \leq E_n \leq 46.30$	J.J.Thresher+	1955	$105.00 \leq E_n \leq 137.00$
T.Roennqvist+	1992	$E_n = 96.00$	M.J.Saltmarsh+	1970	$E_n = 60.00$	A.J.Hartzler+	1954	$E_n = 400.00$
G.Fink+	1990	$20.50 \leq E_n \leq 52.00$	A.Suhami+	1967	$E_n = 14.20$	R.H.Stahl+	1954	$E_n = 91.00$
M.Jain+	1984	$E_n = 802.00$	I.Basar	1967	$E_n = 14.40$	J.C.Allred+	1953	$E_n = 14.10$
M.L.Evans+	1982	$E_n = 648.00$	D.F.Measday	1966	$E_n = 129.00$	T.C.Randle+	1952	$E_n = 156.00$
R.K.Keeler+	1982	$212.00 \leq E_n \leq 493.00$	D.F.Measday	1966	$E_n = 150.00$			

2. 原理和方法

- 原理 (异方差贝叶斯神经网络)

模型结构



$$\begin{aligned} h^{(0)} &= x, \\ h^{(l)} &= \text{SiLU}(W^{(l)}h^{(l-1)} + b^{(l)}), l = 1, \dots, L, \\ y(x; \omega) &= W^{(\text{out})}h^{(L)} + b^{(\text{out})}, \end{aligned}$$

贝叶斯原理: $P(\omega|D) = \frac{P(D|\omega) \cdot P(\omega)}{P(D)} \propto P(D|\omega) \cdot P(\omega),$

先验: 标准高斯分布 $N(0, 1)$

似然函数: $P(D|\omega) = \prod_{i=1}^n N(y_i | \mu_{\omega}(x_i), \sigma_i^2),$

$$\sigma_i^2 = \sigma_{\text{model}}^2(x_i, \omega) + \sigma_{y,i}^2,$$

在似然函数中引入实验误差

基于MCMC进行推断

2. 原理和方法

• 原理（异方差贝叶斯神经网络）

误差分解 [1]

基于全方差公式，误差可分解为 **随机误差 (aleatoric)** 和 **认知误差(epistemic)**

$$\text{Var}[y_i] = \underbrace{\mathbb{E}_{\omega \sim p(\omega|D)} [\text{Var}_{y_i \sim p(y_i | x_i, \omega)}(y_i)]}_{\text{aleatoric uncertainty}} + \underbrace{\text{Var}_{\omega \sim p(\omega|D)} [\mathbb{E}_{y_i \sim p(y_i | x_i, \omega)}(y_i)]}_{\text{epistemic uncertainty}}.$$


$$\sigma_{\text{total}}(x_i) = \sqrt{\underbrace{\mathbb{E}_{\omega} [\sigma_{\text{model}}^2(x_i; \omega) + \sigma_{y,i}^2]}_{\text{aleatoric uncertainty}} + \underbrace{\text{Var}_{\omega} [\mu_{\omega}(x_i)]}_{\text{epistemic uncertainty}}}$$

误差解释（不唯一）

- 随机误差(aleatoric):
在相同或相近的能量和角度下实验数据之间的偏差 以及 **实验误差**
- 认知误差(epistemic):
数据覆盖不足而导致的误差
- 总的评价误差:
上述两部分之和

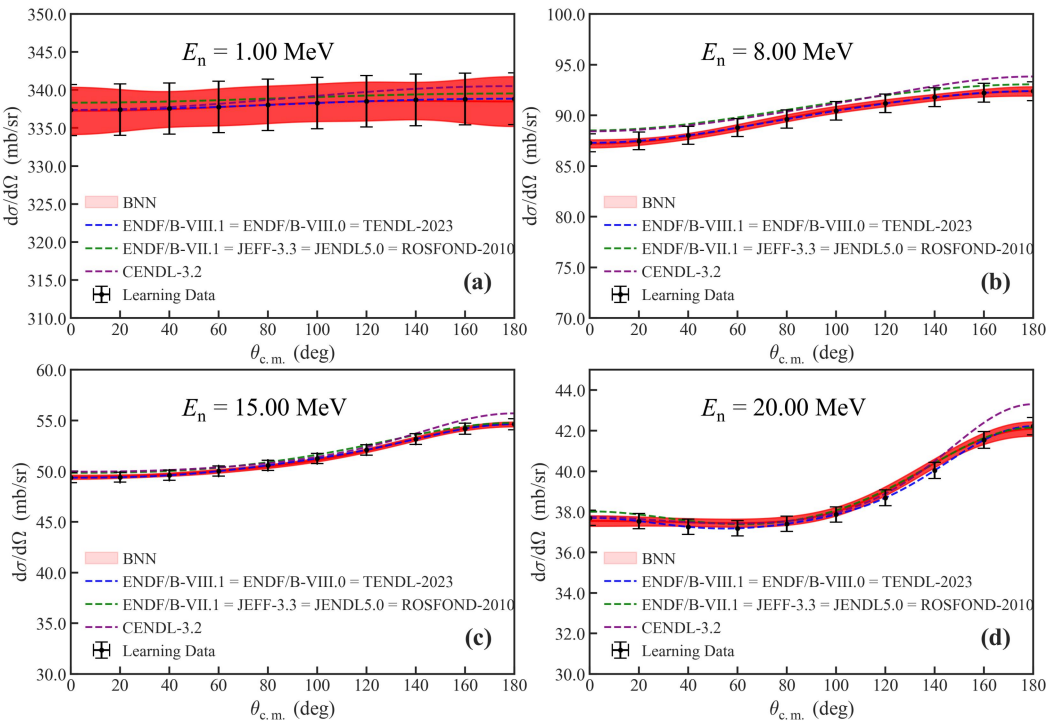
2. 原理和方法

• 方法验证

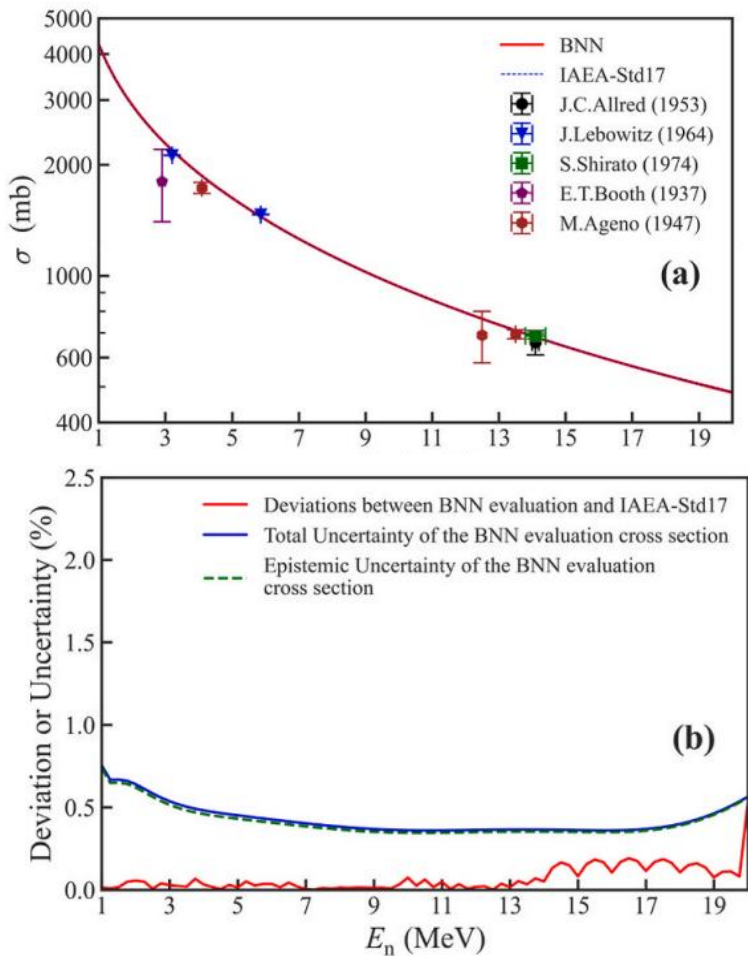
基于 ENDF/B-VIII.1 1~20 MeV微分截面数据进行方法验证

数据集： ENDF/B-VIII.1 1~20 MeV微分截面数据

模型结构： (32, 16)



1~20 MeV 微分截面结果



角度积分截面和误差

目录

1. 研究背景、意义与现状

2. 原理和方法

3. 研究结果

4. 总结

3. 研究结果

- 输入特征量优化

输入特征量 $I2-(\log(E_n), \cos\theta)$ 和 $I3-(\log(E_n), \cos\theta, P_2(\cos\theta))$ 和模型参数选择

数据集： 实验数据集 和 ENDF/B-VIII.1 1~20 MeV微分截面数据

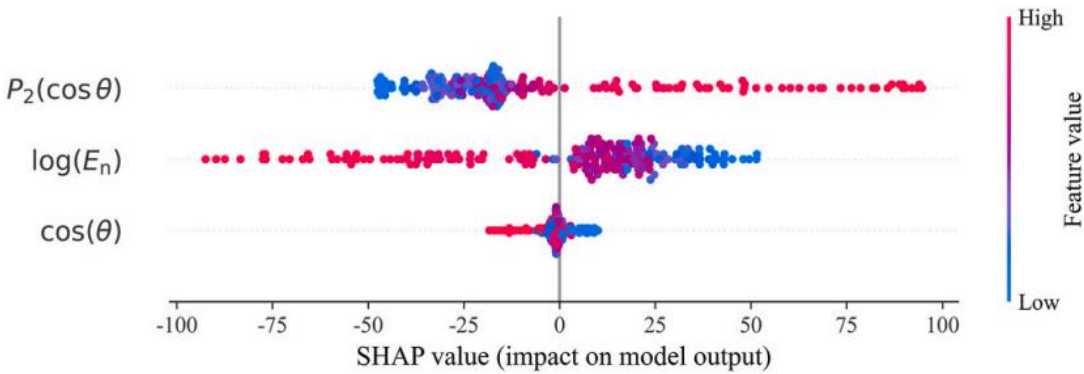
RMSE结果分析

The RMSE of validation set for different BNN architectures.

BNN-I2		BNN-I3	
neurons	RMSE	neurons	RMSE
(16) ^a	0.0544	(16) ^a	0.0477
(32) ^a	0.0631	(32) ^a	0.0485
(16,16) ^a	0.0509	(16,16) ^a	0.0455
(32,16) ^a	0.0492	(32,16) ^a	0.0457

^a The numbers in parentheses denote the architecture of the hidden layers, where each entry represents the number of neurons in a layer. For example, (32) denotes a single hidden layer with 32 neurons, while (32,16) denotes two hidden layers with 32 and 16 neurons, respectively.

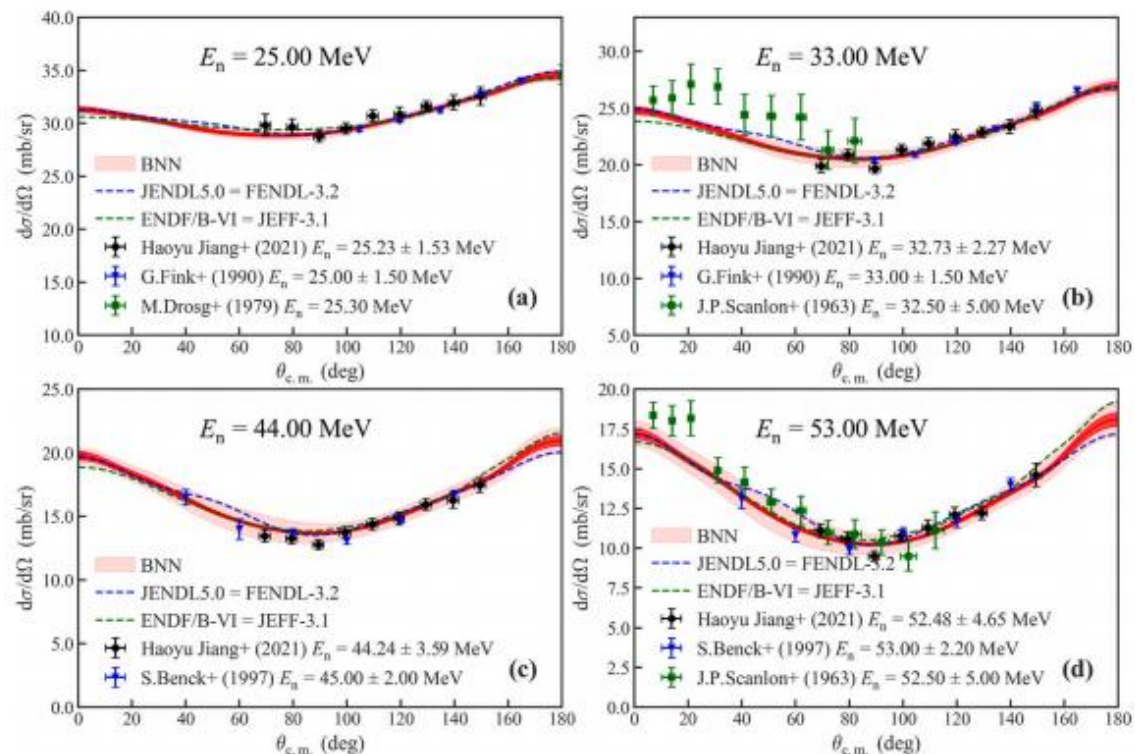
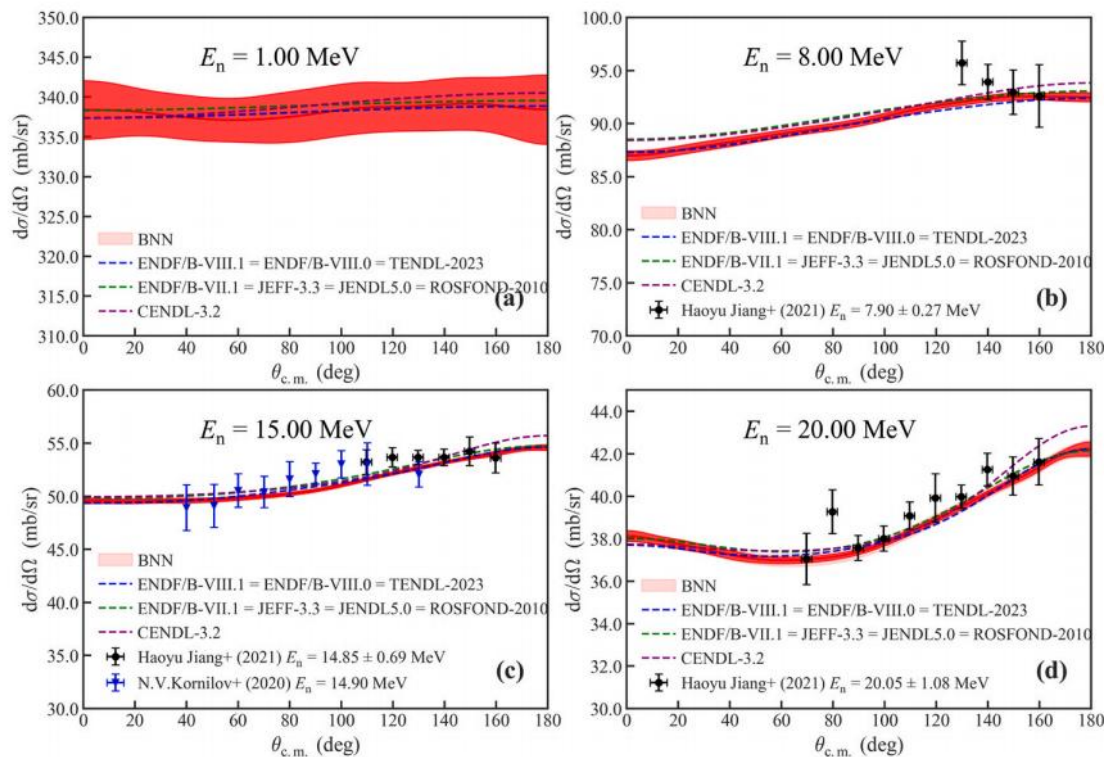
SHAP分析结果



3. 研究结果

• 1~800 MeV 数据评价

数据集： 实验数据集 和 ENDF/B-VIII.1 1~20 MeV微分截面数据

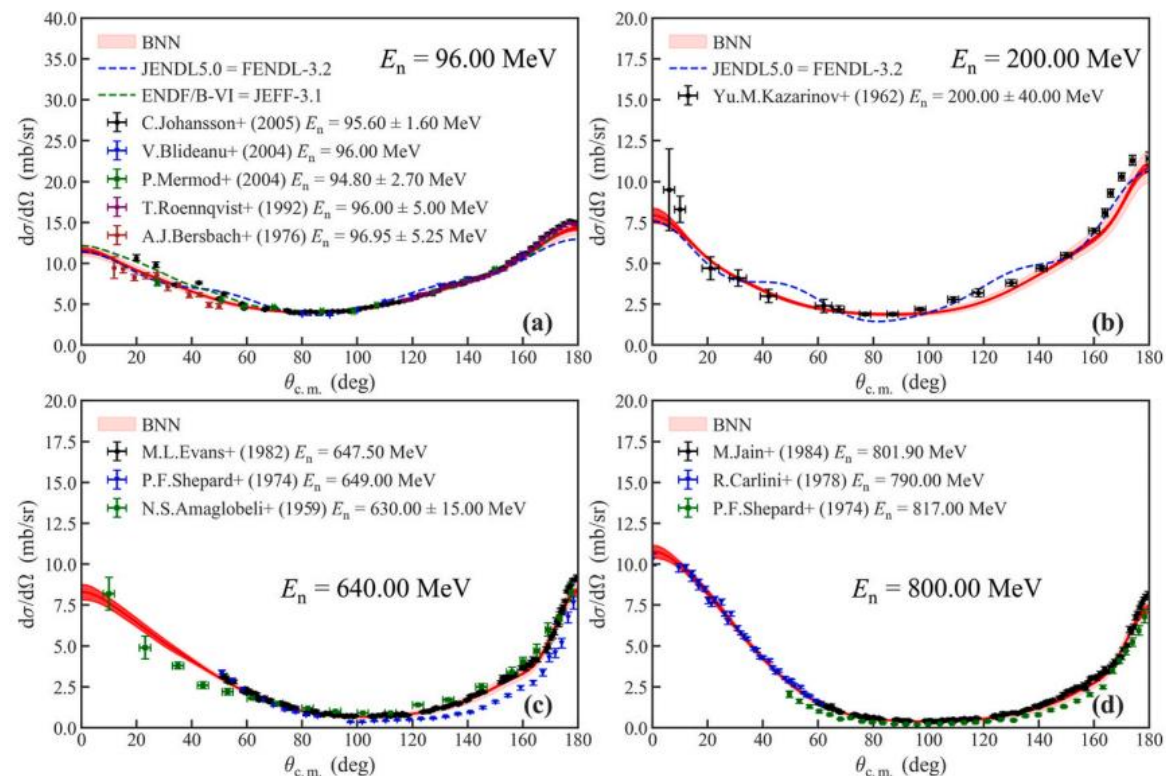
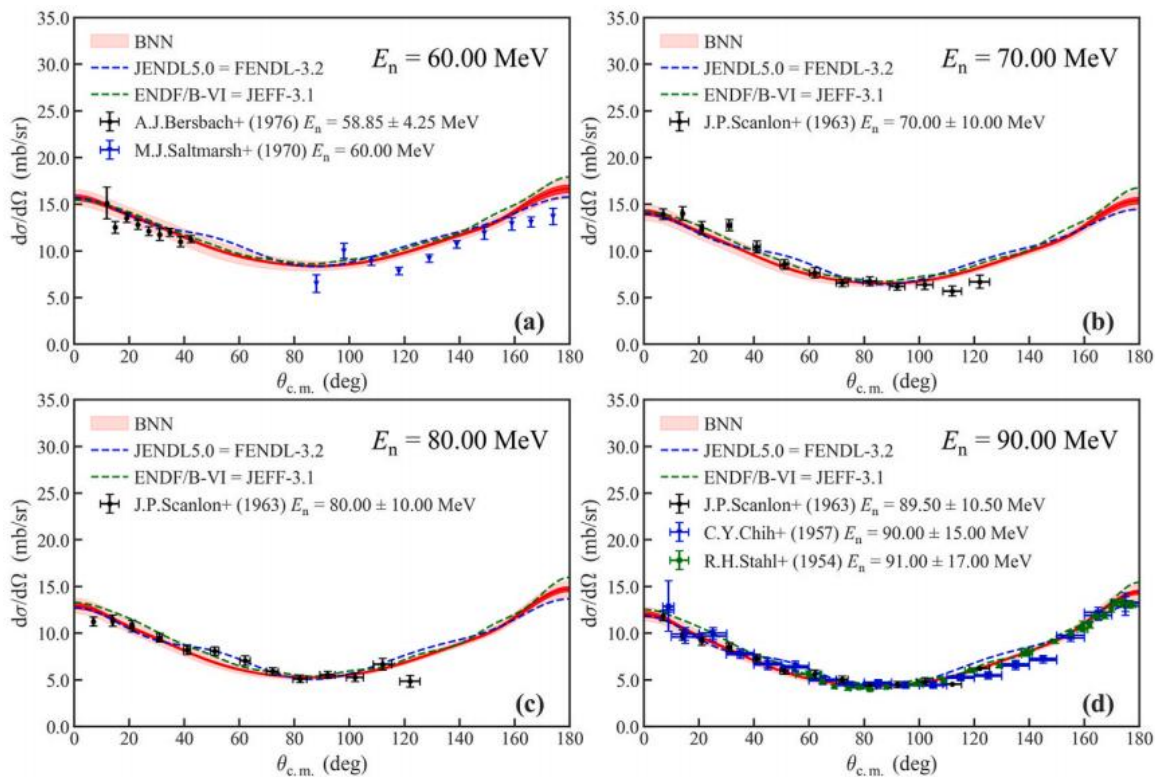


□ 1 ~ 10 MeV n-p散射微分截面的测量结果极少

3. 研究结果

• 1~800 MeV 数据评价

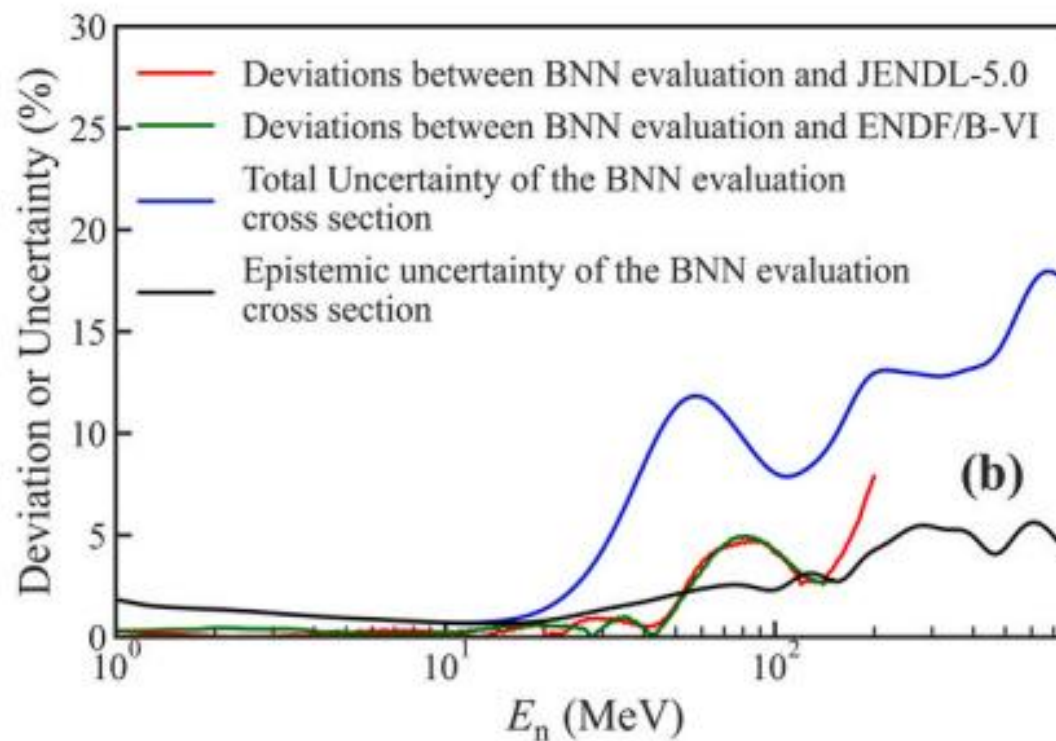
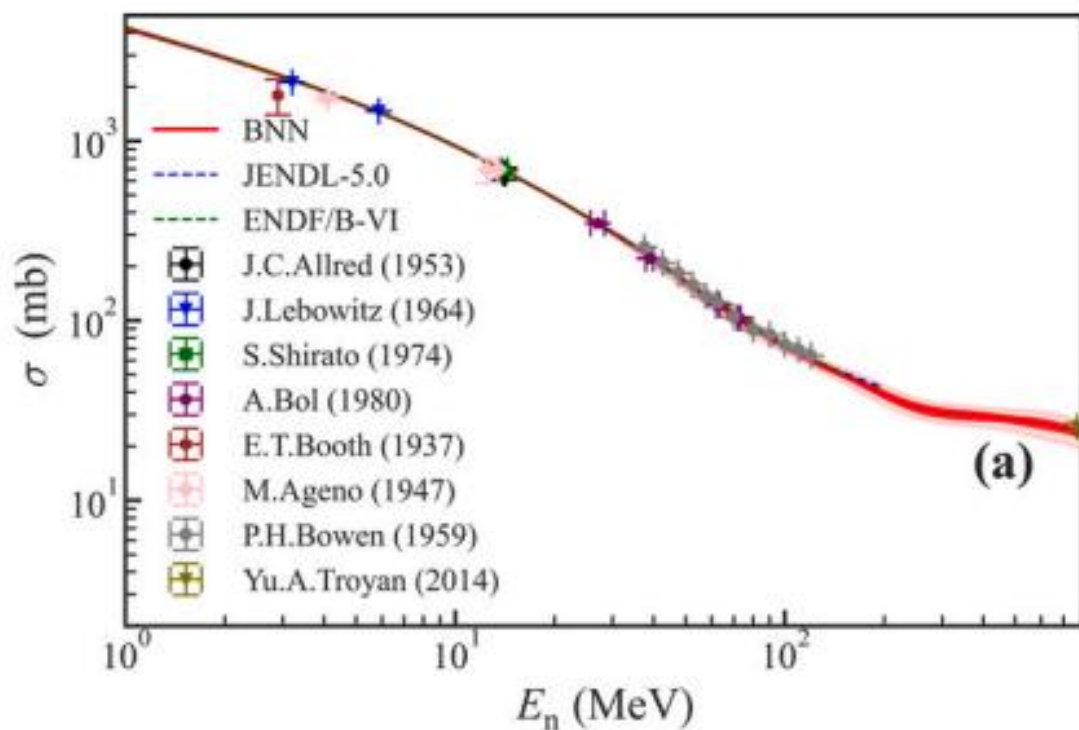
数据集： 实验数据集 和 ENDF/B-VIII.1 1~20 MeV微分截面数据



3. 研究结果

• 1~800 MeV 数据评价 角度积分截面

数据集： 实验数据集 和 ENDF/B-VIII.1 1~20 MeV微分截面数据

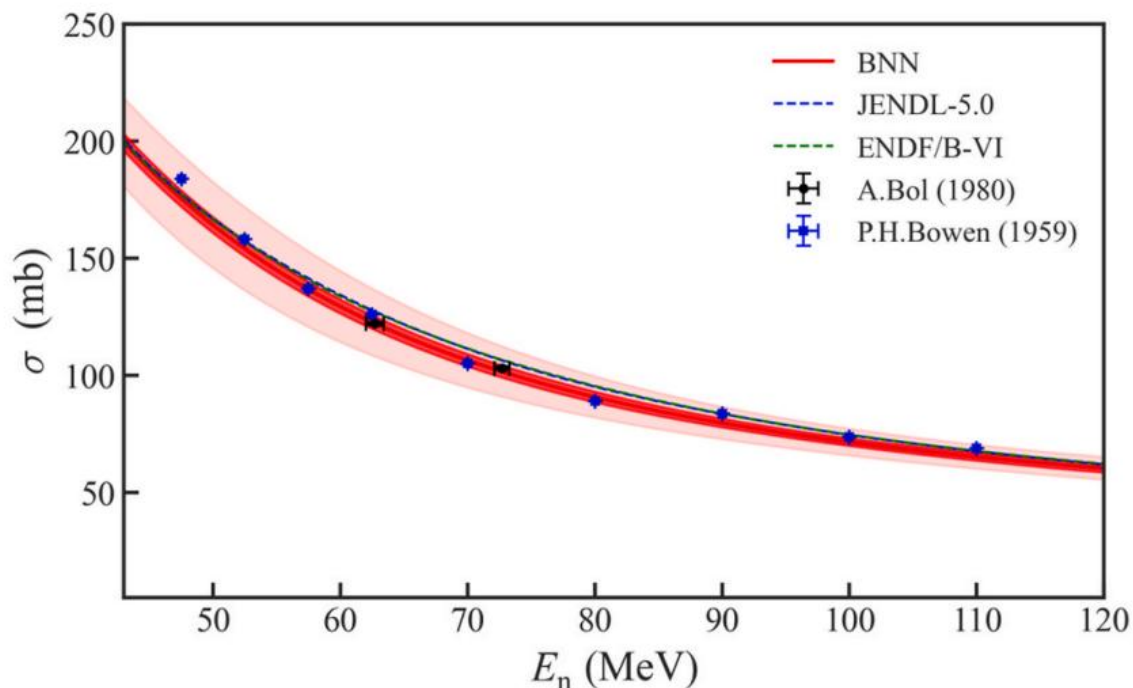


□ 高能角度积分截面的测量值较为缺乏

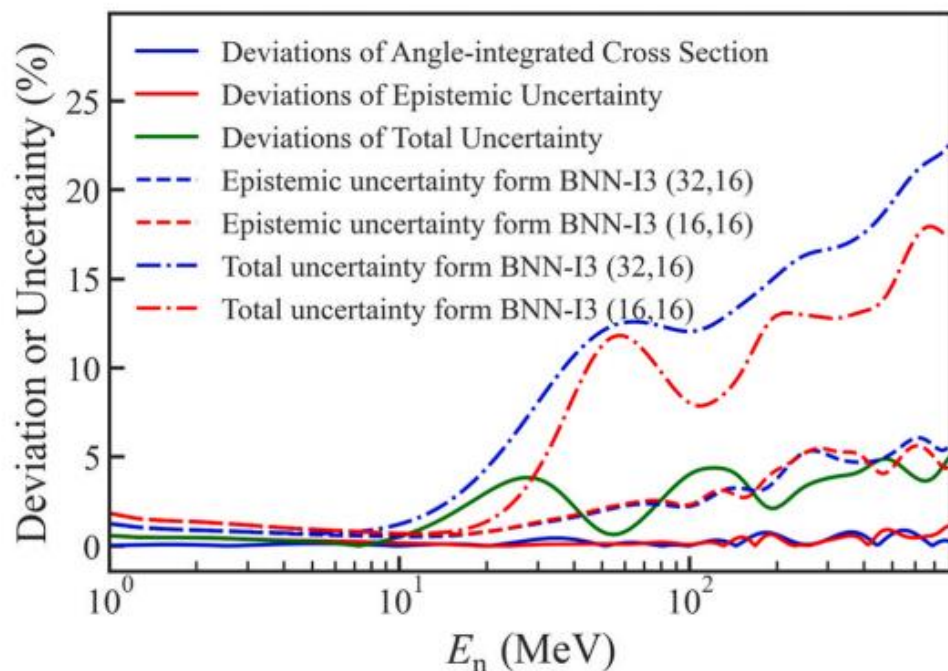
3. 研究结果

- 1~800 MeV 数据评价 角度积分截面

- 50 ~ 100 MeV 本工作结果好于已有的评价数据
- 模型稳定性分析



43~120 MeV 结果



不同模型参数的影响

□ 50 ~ 100 MeV 角度积分截面有待进一步实验验证

4. 总结

□ 总结:

- 1) 筛选了n-p散射微分截面实验数据 (53组 2301个数据)
- 2) 建立基于异方差贝叶斯神经网络的方法
- 3) 分析了不同输入特征量($\log(E_n)$, $\cos\theta$) 和($\log(E_n)$, $\cos\theta$, $P_2(\cos\theta)$) 的影响
- 4) 得到了1~800 MeV n-p散射 微分截面 和 角度积分截面 及其不确定的评价结果
- 5) 本方法存在的局限性:
 - a) 认知误差可能依赖于模型架构、先验分布和训练策略的选择, 因此并非严格意义上的模型无关
 - b) 当前框架并未明确纳入实验数据集之间的协方差信息或相关性
 - c) 误差分解并非唯一, 因为所学习的异方差噪声项可能部分吸收了由模型不足或数据集间不一致所导致的影响

本工作所得的误差估计应被视为基于模型可靠性的数据驱动结果, 可作为参考数据

Wenkai Ren, et al. Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 1092 (2026) 171838

本工作得到了计量与校准技术国家级重点实验室开放研究基金的支持

致 谢

请大家批评指正！