



## 利用GEANT4和TALYS研究中子与铁作用的次级中子双微分截面

刘丙岩 陈志强 韩瑞 张鑫 田国玉 石福栋 孙慧

### Calculation of Secondary Neutron Double Differential Cross Sections for Neutron Induced Reactions on Fe with GEANT4 and TALYS

LIU Bingyan, CHEN Zhiqiang, HAN Rui, ZHANG Xin, TIAN Guoyu, SHI Fudong, SUN Hui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019061>

引用格式:

刘丙岩, 陈志强, 韩瑞, 张鑫, 田国玉, 石福栋, 孙慧. 利用GEANT4和TALYS研究中子与铁作用的次级中子双微分截面[J]. *原子核物理评论*, 2020, 37(1):104–108. doi: 10.11804/NuclPhysRev.37.2019061

LIU Bingyan, CHEN Zhiqiang, HAN Rui, ZHANG Xin, TIAN Guoyu, SHI Fudong, SUN Hui. Calculation of Secondary Neutron Double Differential Cross Sections for Neutron Induced Reactions on Fe with GEANT4 and TALYS[J]. *Nuclear Physics Review*, 2020, 37(1):104–108. doi: 10.11804/NuclPhysRev.37.2019061

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### [GEANT4和FLUKA计算256 MeV质子诱发散裂中子能谱](#)

Calculation of Spallation Neutron Spectra Induced by 256 MeV Protons with GEANT4 and FLUKA

原子核物理评论. 2019, 36(1): 118–123 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.01.118>

#### [400~1500 MeV质子轰击铅靶和钨靶的出射中子能谱的FLUKA和Geant4模拟研究](#)

FLUKA and Geant4 Simulation of Spallation Neutrons from Lead and Tungsten Targets Bombarded with 400~1500 MeV Protons

原子核物理评论. 2018, 35(1): 100–104 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.35.01.100>

#### [20MeV以下快中子与<sup>56</sup>Fe非弹性散射截面的分歧研究](#)

Research on Discrepancy of Inelastic Cross Section for <sup>56</sup>Fe in Fast Neutron Range

原子核物理评论. 2017, 34(3): 514–519 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.03.514>

#### [卵石材料在中子场下的次级放射性分析](#)

Analysis of Induced Radioactivity in Pebbles Caused by High Energy Neutrons

原子核物理评论. 2018, 35(1): 53–60 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.35.01.053>

#### [ENDF/B-VIII.β与ENDF/B-VII.1中水的热中子散射截面数据对比分析](#)

Comparison of the Thermal Neutron Scattering Cross Section of Water Based on ENDF/B-VIII.β and ENDF/B-VII.1

原子核物理评论. 2018, 35(3): 335–338 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.35.03.335>

#### [基于<sup>10</sup>B<sub>4</sub>C转换体的多层多丝正比室中子探测器模拟](#)

Simulation of a Novel Neutron Detector Based on Multi-layer MWPC with <sup>10</sup>B<sub>4</sub>C Convertor

原子核物理评论. 2019, 36(1): 71–77 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.01.071>

文章编号: 1007-4627(2020)01-0104-05

# 利用 GEANT4 和 TALYS 研究中子与铁作用的次级中子双微分截面

刘丙岩<sup>1,2</sup>, 陈志强<sup>1,2,†</sup>, 韩瑞<sup>1</sup>, 张鑫<sup>1,2</sup>, 田国玉<sup>1</sup>, 石福栋<sup>1</sup>, 孙慧<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;  
2. 中国科学院大学核科学与技术学院, 北京 100049)

**摘要:** 铁的次级中子双微分截面对核装置的设计、运行与维护具有重要作用。相关实验数据缺乏, 且评价数据不完善, 需要使用可靠的核理论模型进行计算。本工作利用 GEANT4 程序结合不同的中子评价数据计算了 8.17, 11.5, 14.1 和 18 MeV 等入射能量下中子轰击薄铁靶不同出射角度的次级中子双微分截面; 同时利用 TALYS 程序和 GEANT4 程序结合 BIC、BERT 和 INCLXX 模型计算了 25.7, 65, 100 和 150 MeV 等入射能量下中子轰击薄铁靶不同出射角度的次级中子双微分截面, 并与实验数据进行对比。研究表明, 在 20 MeV 以下能区, ENDF/B-VIII.0 库的计算结果与实验数据符合较好, BROND-3.1、CENDL-3.1、JENDL-4.0u 和 JEFF-3.3 库的计算结果与实验数据存在差异。在 20~150 MeV 能区, GEANT4 程序的 BERT 模型和 TALYS 程序的计算结果与实验数据符合较好, INCLXX 模型和 BIC 模型的计算结果与实验数据存在分歧。整体来看, 需要对铁的中子评价数据和核反应理论模型做进一步研究。

**关键词:** GEANT4; TALYS; 次级中子双微分截面; 中子评价数据; 理论模型

**中图分类号:** O571.55

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.37.2019061

## 1 引言

高能强流加速器、快中子反应堆及加速器驱动次临界系统等新一代核装置在核物理、核医学、天体物理及清洁能源等方面的应用, 引起了人们的广泛关注<sup>[1-2]</sup>。这对关键核素的截面数据和理论模型提出了更高的要求与挑战。铁作为重要的结构材料和屏蔽材料, 在加速器和反应堆中被广泛使用。次级中子双微分截面是核反应理论模型开发、核数据评价、核设施设计及辐射防护中的关键基础数据。因此, 研究铁的次级中子双微分截面具有重要意义。目前, 在 20 MeV 以下能区, 国际上已开展了较多的实验测量和数据评价工作, 并建立了中子评价数据库, 如俄罗斯的 BROND-3.1<sup>[3]</sup>、中国的 CENDL-3.1<sup>[4]</sup>、美国的 ENDF/B-VIII.0<sup>[5]</sup>、欧洲的 JEFF-3.3<sup>[6]</sup> 和日本的 JENDL-4.0u<sup>[7]</sup> 等。在 20 MeV 以上能区, 实验数据相对缺乏, 需要结合理论模型开展相关研究。但是, 在使用这些中子评价数据库和理论模型前需要对其可靠性进行检验。在核装置设计及理论模型开发中, GEANT4<sup>[8]</sup>、PHITS<sup>[9]</sup>、MCNP<sup>[10]</sup> 及 TALYS<sup>[11]</sup> 等程序的计算结果具有重要的指导意义。GEANT4 和 TALYS 程序因其开放性、可靠性和灵活性受到了越来越

多科研工作者的青睐。

本文利用 GEANT4 和 TALYS 程序结合不同的中子评价数据与理论模型, 分别计算了 150 MeV 及以下中子与薄铁靶作用的次级中子双微分截面, 并将计算结果与实验数据进行了对比。

## 2 计算程序及中子数据库

### 2.1 GEANT4 程序

GEANT4 是由欧洲核子中心主导开发的一款基于 C++ 语言的蒙特卡罗模拟软件, 主要用于模拟粒子与物质的相互作用和输运过程, 在核物理、核医学、加速器等领域具有广泛的应用。GEANT4 程序中包含多种描述粒子与物质相互作用的强子物理模型, 可根据需要选择不同的数据库和物理模型或将不同物理过程结合使用。本文在计算中采用了 GEANT4 10.04 提供的基于 Bertini 核内级联模型的 BERT 模型、基于 Binary Cascade 核内级联模型的 BIC 模型以及基于 Liège 核内级联模型的 INCL++ 模型, 这些模型可用于计算几十 MeV 至几百 MeV 中子参与的核反应。在 GEANT4 程序计算中所建立的几何构型与实验一致。

收稿日期: 2019-11-29; 修改日期: 2019-12-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11875298); 国家自然科学基金委员会-中国科学院大科学装置科学研究联合基金资助项目 (U1832205)

作者简介: 刘丙岩 (1993-), 男, 河北邢台人, 博士研究生, 从事中子物理研究; E-mail: liubingyan@impcas.ac.cn

† 通信作者: 陈志强, E-mail: zqchen@impcas.ac.cn.

## 2.2 TALYS 程序

TALYS 是由 Koning 等<sup>[11]</sup>开发的一款用于计算核反应的免费软件, 适用于计算 1keV~200MeV 范围  $\gamma$ , n, p,  $\alpha$  等粒子诱发的核反应。该程序包含了多种核反应理论模型, 可计算的物理量包括全截面、各个反应道截面、出射粒子双微分截面、剩余核产生截面等。计算中可根据需要对理论模型的参数进行调整。TALYS 程序在核物理、核医学及天体物理等领域具有广泛的应用。

## 2.3 中子数据库

核数据根据其来源可分为实验数据和评价数据。本文采用的实验数据来自 EXFOR 数据库<sup>[12]</sup>。EXFOR 数据库中包含大量的中子、带电粒子和光子诱发的核反应数据。评价数据是通过实验数据进行分析与评价, 并结合理论计算得到的。国际上主要的中子评价库有美国的 ENDF/B、日本的 JENDL、欧洲的 JEFF、俄罗斯的 BROND 及中国的 CENDL 等。此外还有一些用于聚变堆设计、加速器驱动次临界系统设计等的专用数据库。

## 3 结果与讨论

### 3.1 中子评价数据的检验

本文首先检验了中子评价数据的可靠性。利用 GEANT4 程序结合不同的中子评价数据分别计算了 8.17, 11.5, 14.1 和 18MeV 中子轰击薄铁靶不同出射角度的次级中子双微分截面, 并与 Ruan 等<sup>[13]</sup>、Soda 等<sup>[14]</sup> 和 Vilaithong 等<sup>[15]</sup> 等的实验数据进行了比较。

图 1 给出了 8.17MeV 中子轰击天然铁靶不同出射角度次级中子双微分截面的计算结果与 Ruan 等<sup>[13]</sup> 的实验数据的比较。由图可见, 计算结果基本能够再现实验数据。在能量低于 3.4MeV 时五家评价数据库给出的计算结果略低于实验数据。在 30°, 95°, 115° 和 150° 方向能量大于 6.5MeV 时, 计算结果略低于实验数据。在 65° 方向弹性散射峰的计算结果高于实验数据。

图 2 给出了 11.5MeV 中子轰击天然铁靶不同出射角度次级中子双微分截面的计算结果与 Soda 等<sup>[14]</sup> 的实验数据的比较。由图可见, 计算结果基本能够再现实验数据。在 7MeV 附近, JENDL-4.0u 库的计算结果高于实验数据; 在 30° 方向的 8MeV 附近, JENDL-4.0u 库的计算结果低于实验数据。

图 3 给出了 14.1MeV 中子轰击天然铁靶不同出射角度次级中子双微分截面的计算结果与 Vilaithong 等<sup>[15]</sup> 的实验数据的比较。由图可见, 计算结果基本能够再现实验数据。在 4~7MeV 范围内, BROND-3.1 库的计算结果低

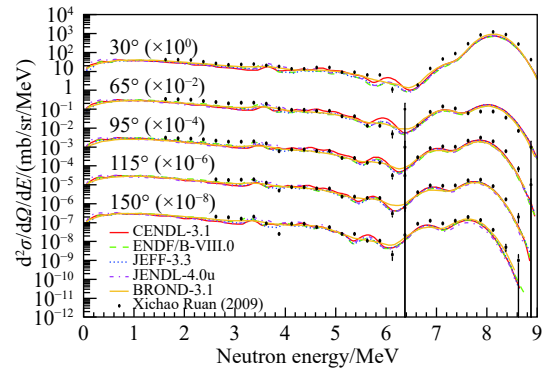


图 1 (在线彩图)

Geant4 程序结合不同数据库对 8.17MeV 中子轰击天然铁靶的次级中子双微分截面计算结果与实验数据的对比

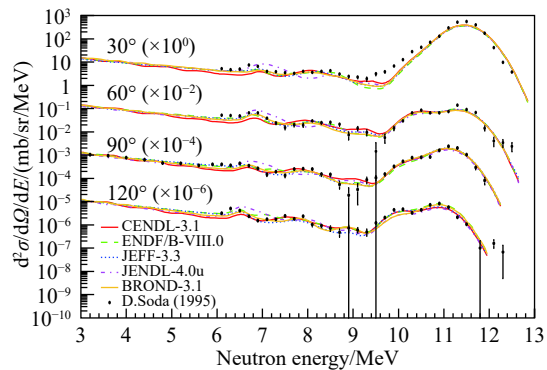


图 2 (在线彩图) 同图 1, 但中子的入射能量为 11.5MeV

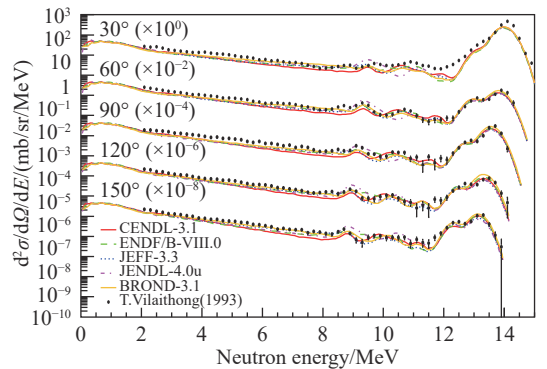


图 3 (在线彩图) 同图 1, 但中子的入射能量为 14.1MeV

实验数据。在小于 7MeV 时, 五家评价数据库的计算结果均低于实验数据; 在 30°, 60° 和 90° 方向的 10.5MeV 附近, JENDL-4.0u 库的计算结果略低于实验数据。在 120° 和 150° 方向的 9MeV 附近, JENDL-4.0u 库的计算结果略高于实验数据。

图 4 给出了 18MeV 中子轰击天然铁靶不同出射角度次级中子双微分截面的计算结果与 Soda 等<sup>[14]</sup> 的实验数据的比较。由图可见, 计算结果基本能够再现实验数据。在 4~7MeV 范围内, BROND-3.1 库的计算结果低

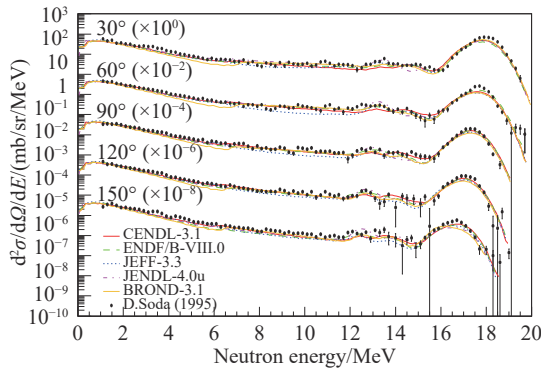


图 4 (在线彩图) 同图 1, 但中子的入射能量为 18 MeV

于实验数据; 在 7~12 MeV 范围内, JEFF-3.3 库的计算结果低于实验数据; 在 14~15 MeV 范围内, JENDL-4.0u 库在 30°, 60° 和 90° 方向的计算结果低于实验数据。

整体上, 在 20 MeV 以下能区, ENDF/B-VIII.0 库的计算结果与实验数据符合较好。BROND-3.1、CENDL-3.1、JEFF-3.3 和 JEDNL-4.0u 库的计算结果与实验数据存在差异。<sup>56</sup>Fe 在天然铁中的占比为 91.75%, <sup>56</sup>Fe 的第一激发态和第二激发态对应能量分别为 847 和 2085 keV, 且在 3~6 MeV 之间存在较密集的激发态。计算结果与实验数据存在差异的能区与弹性散射峰对应能量减去 <sup>56</sup>Fe 激发能得到的能区相符合。因此, 铁的非弹性散射截面数据还需要进一步研究。

### 3.2 理论模型的验证

目前, 各中子评价数据库的能量范围集中在 20 MeV 以下, 对于更高能量中子诱发的核反应, 实验数据缺乏, 需要采用理论模型进行相互校验。本文利用 TALYS 程序和 GEANT4 程序结合 BIC、BERT 和 INCLXX 等理论模型分别计算了 25.7, 65, 100 和 150 MeV 中子轰击薄铁靶不同出射角度的次级中子双微分截面, TALYS 程序在计算中使用默认的参数值, 未考虑实验中实际的能量分辨, 并将计算结果与 Marcinkowski 等<sup>[16]</sup>、Hjort 等<sup>[17]</sup>、Kunieda 等<sup>[18]</sup> 及 Hiroyuki<sup>[19]</sup> 等的实验数据进行了比较。

图 5 给出了 25.7 MeV 中子轰击 <sup>56</sup>Fe 靶不同出射角度次级中子双微分截面的计算结果与 Marcinkowski 等<sup>[16]</sup> 的实验数据的比较。由图可见, 在小于 22 MeV 时, BIC 模型的计算结果低于实验数据, BERT 模型在 24.7°, 44.7°, 64.5°, 125° 和 140° 方向的计算结果略低于实验数据。INCLXX 模型在 24.7° 和 44.7° 方向的计算结果与实验数据符合较好, 但随着中子出射角度的增大, INCLXX 模型的计算结果明显低于实验数据。

图 6 给出了 65 MeV 中子轰击天然铁靶不同出射角

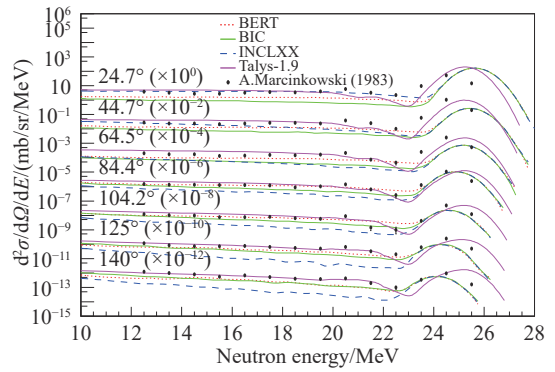


图 5 (在线彩图) TALYS 程序和 GEANT4 程序结合不同理论模型对 25.7 MeV 中子轰击 <sup>56</sup>Fe 靶的次级中子双微分截面计算结果与实验数据的对比

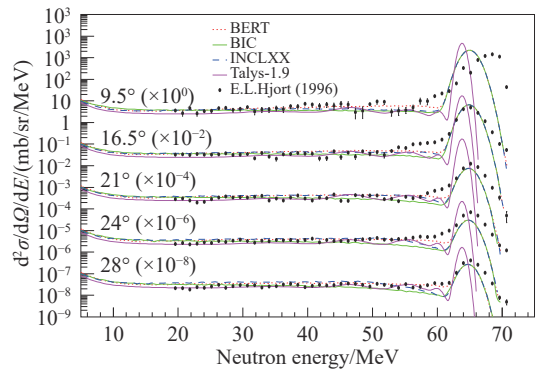


图 6 (在线彩图) 同图 5, 但为 65 MeV 中子轰击天然铁靶

度次级中子双微分截面的计算结果与 Hjort 等<sup>[17]</sup> 的实验数据的比较。由图可见, 在 55~60 MeV 能量范围内, GEANT4 3 种模型的计算结果均低于实验数据, 在 21°, 24° 及 28° 方向弹性散射峰附近, GEANT4 3 种模型的计算结果低于实验数据。

图 7 给出了 100 MeV 中子轰击天然铁靶不同出射角度次级中子双微分截面的计算结果与 Kunieda 等<sup>[18]</sup> 的实验数据的比较。由图可见, 在 15°, 120° 和 150° 方向, BERT 模型、INCLXX 模型和 TALYS 程序的计算

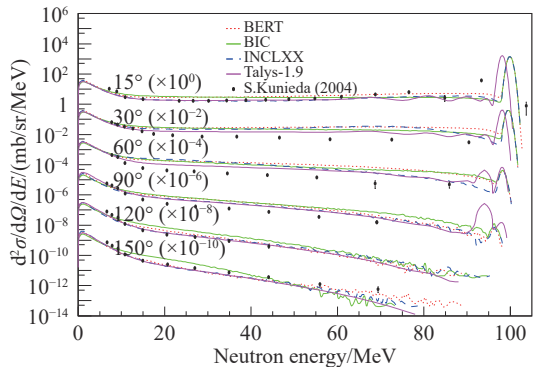


图 7 (在线彩图) 同图 5, 但为 100 MeV 中子轰击天然铁靶



结果与实验数据符合得较好。在 15~45 MeV 范围内, BIC 模型在 120° 和 150° 方向的计算结果高于实验数据。

图 8 给出了 150 MeV 中子轰击天然铁靶不同出射角度次级中子双微分截面的计算结果与 Hiroyuki 等<sup>[19]</sup> 的实验数据的比较。由图可见, 计算结果基本能够再现实验数据。在 15~40 MeV 范围内, BIC 模型在 120° 和 150° 方向的计算结果高于实验数据。

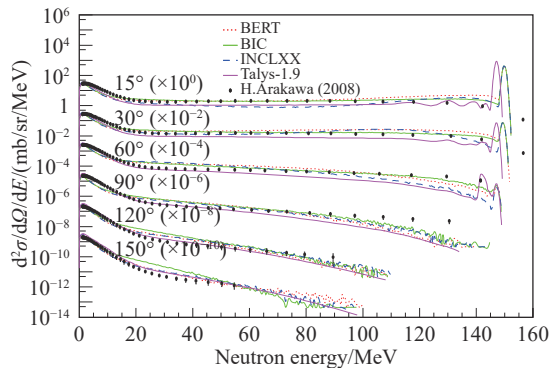


图 8 (在线彩图)同图 5, 但为 150 MeV 中子轰击天然铁靶

整体上, GEANT4 程序的 BERT 模型和 TALYS 程序的计算结果与实验数据符合较好, INCLXX 模型在 25.7 MeV 时大角度方向的计算结果显著低于实验数据, BIC 模型在 100 和 150 MeV 时大角度方向低能部分的计算结果显著高于实验数据。这主要是由于高能中子的探测效率降低、能量分辨率变差及核反应理论模型不完善造成的。

## 4 结论

本文利用 GEANT4 程序计算了 8.17, 11.5, 14.1, 18, 25.7, 65, 100 及 150 MeV 中子轰击铁靶不同出射角度的次级中子双微分截面, 同时利用 TALYS 程序计算了 25.7, 65, 100 及 150 MeV 中子轰击铁靶不同出射角度的次级中子双微分截面, 并与实验数据进行了比较。检验了各家评价数据库和理论模型的可靠性。研究表明, 在 20 MeV 以下能区, ENDF/B-VIII.0 库的计算结果与实验数据符合较好, BROND-3.1、CENDL-3.1、JENDL-4.0u 和 JEFF-3.3 库的计算结果与实验数据存在差异。在 20~150 MeV 能区, GEANT4 程序的 BERT 模型和 TALYS 程序的计算结果与实验数据符合较好, INCLXX 模型和 BIC 模型的计算结果与实验数据存在分歧。整体来看, 需要对铁的中子评价数据和核反应理

论模型做进一步研究。

## 参考文献:

- [1] XIAO Guoqing, XU Hushan, WANG Sicheng. *Nuclear Physics Review*, 2016, 34(3): 275. (in Chinese) (肖国青, 徐珊珊, 王思成. *原子核物理评论*, 2016, 34(3): 275.)
- [2] OECD/NEA, Accelerator-driven Systems (ADS) and Fast Reactors (FR) in Advanced Nuclear Fuel Cycles, 2002.
- [3] IGNATYUK A V, FURSOV B I. The Latest BROND-3Developments[C]. *Conf on Nucl Data for Sci and Tech, France, 2007: 759.*
- [4] WU H C, ZHANG H, ZHANG H Y. *Journal of the Korean Physical Society*, 2011, 59(2): 1146.
- [5] BROWN D A, CHADWICK M B, CAPOTE R, et al. *Nuclear Data Sheets*, 2018, 148: 1.
- [6] CABELLOS O, ALVAREZ V F, ANGELONE M, et al. *EPJ Web of Conferences*, 2017, 146: 06004.
- [7] KEIICHI S, OSAMU I, TSUNEO N, et al. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2011, 48(1): 1.
- [8] ALLISON J, AMAKO K, APOSTOLALIS J, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2016, 835: 186.
- [9] SATO T, IWAMOTO Y, HASHIMOTO S, et al. *Nucl Sci Technol*, 2018, 55(6): 684.
- [10] X-5Monte Carlo Team. MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, April, 2003.
- [11] KONING A, HILAIRE S, GORIELY S. TALYS-1.9 User Manual, December, 2011.
- [12] VALENTINA S, NAOHIKO O, MARINA M, et al. *EPJ Web of Conferences*, 2017, 146: 07003.
- [13] RUAN Xichao, HUANG Hanxiong, JIANG Jing, et al. *Atomic Energy Science and Technology*, 2009, 43(9): 793. (in Chinese) (阮锡超, 黄翰雄, 蒋婧, 等. *原子能科学技术*, 2009, 43(9): 793.)
- [14] SODA D, MATSUYAMA S, MASANOBU I, et al. Measurements of Double-differential Neutron Emission Cross Sections for 18 and 11.5 MeV Neutrons[C]. *JAERI Conference Proceedings, Japan, 1995: 146.*
- [15] VILAITHONG T, BOONYAWAN D, KONKLONG S, et al. *Nucl Instr Meth A*, 1993, 332: 561.
- [16] MARCINKOWSKI A, FINLAY R W, RANDERS P G, et al. *Nuclear Physics A*, 1983, 402: 220.
- [17] HJORT E L, BRADY F P, DRUMMOND J R, et al. *Phys Rev C*, 1996, 53(1): 237.
- [18] KUNIEDA S, WATANABE T, SHIGYO N, et al. Measurement of Neutron-Production Double-Differential Cross Sections for Continuous-Energy-Neutron-Incidence on Fe and Pb by Liquid Organic Scintillator[C]. *Conf on Nucl Data for Sci and Tech, USA, 2004: 1058.*
- [19] HIROYUKI A, TSUYOSHI K, SHUSAKU N, et al. Neutron-Production Double-Differential Cross Sections for 150 MeV Neutron-Incidence on Fe[C]. *JAEA Conference Proceedings, Japan 2008: 58.*

## Calculation of Secondary Neutron Double Differential Cross Sections for Neutron Induced Reactions on Fe with GEANT4 and TALYS

LIU Bingyan<sup>1,2</sup>, CHEN Zhiqiang<sup>1,2,†</sup>, HAN Rui<sup>1</sup>, ZHANG Xin<sup>1,2</sup>, TIAN Guoyu<sup>1</sup>, SHI Fudong<sup>1</sup>, SUN Hui<sup>1,2</sup>

(1. *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

2. *School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** The secondary neutron double differential cross sections of iron play an important role in the design, operation and maintenance of nuclear facilities. Reliable nuclear theoretical model and evaluation data are needed in calculation. The secondary neutron double differential cross sections of 8.17, 11.5, 14.1 and 18 MeV neutron induced on iron were calculated with GEANT4 code. The secondary neutron double differential cross sections of 25.7, 65, 100 and 150 MeV neutron induced on iron were calculated with TALYS and GEANT4 codes. Additionally, these calculation results were compared with experimental data. Research shows that, for the energy below 20 MeV, the ENDF/B-VIII.0 library is in good agreement with experimental data, and the BROND-3.1, CENDL-3.1, JENDL-4.0u and JEFF-3.3 libraries show some discrepancies with experimental data. For the energy between 20 and 150 MeV, the calculation results of the BERT model and the TALYS code are in good agreement with experimental data. The calculation results of BIC and INCLXX models are different from experimental data. On the whole, further research is needed for the neutron evaluated nuclear data and nuclear reaction model.

**Key words:** GEANT4; TALYS; secondary neutron double differential cross section; neutron evaluated nuclear data; theoretical model

---

**Received date:** 29 Nov. 2019; **Revised date:** 30 Dec. 2019

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (11875298); Joint Large-Scale Scientific Facility Funds of NSFC and CAS (U1832205)

† **Corresponding author:** CHEN Zhiqiang, E-mail: [zqchen@impcas.ac.cn](mailto:zqchen@impcas.ac.cn).