

文章编号: 1007-4627(2018)01-0100-05

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

宋林^{1,2}, 陈志强^{1,†}, 韩瑞¹, 孙琪^{1,2}, 田国玉^{1,2}, 任培培^{1,2}

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 在 ADS 散裂靶系统的优化设计中, 蒙特卡罗方法结合可靠的散裂反应理论模型进行中子学计算具有重要的作用。本工作利用 Geant4 程序中的 INCLXX 模型、BIC 模型以及 BERT 模型和 FLUKA 程序分别模拟了 597 MeV 和 1500 MeV 质子轰击薄铅靶不同出射角度的中子双微分截面, 500, 1500 MeV 质子轰击厚铅靶不同出射角度的中子双微分产额, 以及 400, 600, 800, 1000 和 1200 MeV 质子轰击厚钨靶在反角方向 (175°) 的中子双微分产额, 并与实验数据进行比较。研究表明, 对于薄铅靶, Geant4 程序的 INCLXX 模型和 FLUKA 程序模拟结果与实验符合得更好。能量在 10~40 MeV 范围内, BIC 模型模拟结果明显高于实验数据, 而 BERT 模型模拟结果略微低于实验数据。对于厚铅靶, 在 40 MeV 左右所有的模拟结果都低于实验数据。对于厚钨靶, Geant4 程序的 BIC 模型和 FLUKA 程序与实验数据符合得较好, INCLXX 模型在能量高于 60 MeV 时模拟结果低于实验数据, BERT 模型与实验数据差异较大。总体来看, Geant4 程序的 INCLXX 模型和 FLUKA 程序进行 ADS 散裂靶相关的中子学的计算是合理和可靠的。

关键词: Geant4; FLUKA; 蒙特卡罗方法; 散裂反应; 中子能谱

中图分类号: O571.55

文献标志码: A

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.35.01.100

1 引言

中高能质子轰击重金属散裂靶诱发散裂反应产生宽能谱、高通量的次级中子, 作为外源驱动次临界堆芯运行, 可以进行核废料的嬗变、核燃料的增值等。散裂靶作为加速器和次临界堆的耦合环节, 是 ADS 系统的关键部件。在 ADS 靶堆耦合系统中, 质子束轰击散裂靶产生的散裂中子产额决定了次临界堆芯的核废料嬗变效率及能量放大系数, 同时靶外表面的中子能谱分布决定了次临界反应堆的运行特性^[1]。蒙特卡罗模拟对于散裂靶系统的优化设计具有重要的指导作用。目前应用比较广泛的蒙特卡罗程序有 PHITS^[2]、MCNPX^[3]、Geant4^[4] 和 FLUKA^[5] 等。FLUKA 和 Geant4 程序作为开源软件, 具有强大的功能, 受到了越来越多科研工作者的重视。

前期的研究工作已经验证了 FLUKA 和 Geant4 程序用于模拟散裂反应的可靠性^[6], 这些研究工作主要集中于薄靶, 对于厚靶的中子学模拟工作还非常少。中高能质子在薄靶内输运只发生核内的微观反应, 包括直接、级联和蒸发过程等; 但是在厚靶内, 较高能量的出

射粒子(中子、介子等)又和其他的核发生反应产生新的中子, 这些中子的能谱和空间分布是设计次临界装置的重要参数^[7], 所以厚靶中子学的研究非常重要。本文利用 FLUKA 和 Geant4 程序模拟了重金属厚靶出射中子的双微分产额并且与实验数据进行了对比, 实验数据均来自 EXFOR 数据库。重金属靶材选铅和钨, 铅和钨具有散裂中子产额大、散裂产物中长寿命放射性核素少等特点, 是 ADS 系统的理想靶材^[8, 9]。入射质子能量参考了未来 ADS 系统束流能量的范围 400~1500 MeV, 并考虑了已有厚靶散裂反应实验数据的能点。

2 蒙特卡罗模拟程序

2.1 FLUKA 程序

FLUKA 程序是由欧洲核子中心 (CERN) 和意大利国家核物理研究院 (INFN) 共同研发的用于计算粒子输运以及物理事件相互作用问题的蒙特卡罗程序, 包含了几乎所有已知粒子的物理作用过程, 如强子非弹性、弹性散射, 中子输运等, 在中子物理、高能物理等诸多领域获得了广泛的应用。描述强子核子相互作用的物理算

收稿日期: 2017-10-11; 修改日期: 2017-12-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (914263011, 11605257); 中国科学院战略性先导科技专项资助项目 (XDA030300200)

作者简介: 宋林 (1991-), 男, 辽宁大连人, 硕士研究生, 从事中子学模拟研究; E-mail: songlin@impcas.ac.cn

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

法是 PEANUT, 它包含了描述核内级联过程、预平衡过程及蒸发过程的物理模型。采用卡片式输入, 只需按格式输入各项参数即可得到用户输入文件, 进行相关的计算。

2.2 Geant4 程序

Geant4 程序是一款基于蒙特卡罗算法处理粒子与物质相互作用的软件, 由 CERN 主导开发, 具有可视化、粒子追踪、可以处理复杂几何体等优点, 广泛应用于核物理、加速器、航天、核医学物理等领域。

Geant4 程序提供了多种强子物理模型来描述粒子的相互作用, 本文采用了其中的核内级联 (Intra-Nuclear Cascade, INC) 模型, INC 模型是一种强子-核子相互作用模型, 能够精确地预测能量高于 200 MeV 质子诱发的散裂反应产生中子的能谱分布, 这与未来 ADS 系统使用的质子束能量吻合, 因此, INC 模型是被推荐用于模拟散裂反应的物理模型之一。INC 模型经过不断的发展, 衍生出了基于 Bertini 核内级联模型的 BERT 模型、基于 Binary 核内级联模型的 BIC 模型以及基于 Liege 核内级联模型的 INCLXX 模型等, 为方便科研工作者调用, 这些模型被分别编写成 QGSP_BERT_HP、QGSP_BIC_HP、QGSP_INCLXX_HP 等文件, 存储在 Geant4 程序的 PhysicsLists 文件中。其中 QGSP (Quark Gluon String model) 是 Geant4 程序的基础物理模型; HP (High Precision neutron model) 模型, 提供了低于 20 MeV 中子截面的核数据库, 可对低于 20 MeV 的中子输运过程进行精确模拟^[10]。

3 模拟结果

3.1 薄铅靶模拟结果与实验数据对比

本文首先验证了 FLUKA 和 Geant4 程序用于模拟薄靶散裂反应的可靠性。所谓薄靶是指入射束流在靶中能量损失较小 (小于入射能量的 5%) 的靶^[11]。利用 FLUKA 和 Geant4 程序分别模拟了 597 和 1500 MeV 的质子轰击薄铅靶在不同出射角度产生中子的双微分截面, 并与 Amian^[12]、Nakamoto^[13]、Ishibashi 等^[14] 的实验数据进行了对比, 如图 1, 2 所示。

图 1 给出了 597 MeV 质子轰击薄铅靶 (0.89 g/cm²), 在 30°, 60°, 120° 及 150° 出射角方向的中子双微分截面的模拟结果 (线段), 及 Amian 等的实验数据 (黑色实心点)。由图可见, 模拟结果基本能够重现实验数据, 整体上 FLUKA 程序的模拟结果和实验数据符合得更好。Geant4 程序的三种模型在小角度方向 (30°,

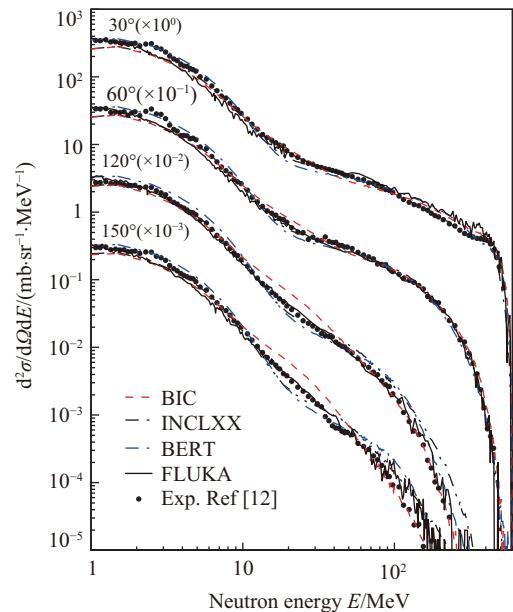


图 1 (在线彩图) 597 MeV 质子轰击薄铅靶产生中子双微分截面的实验数据与 FLUKA 和 Geant4 程序模拟结果对比

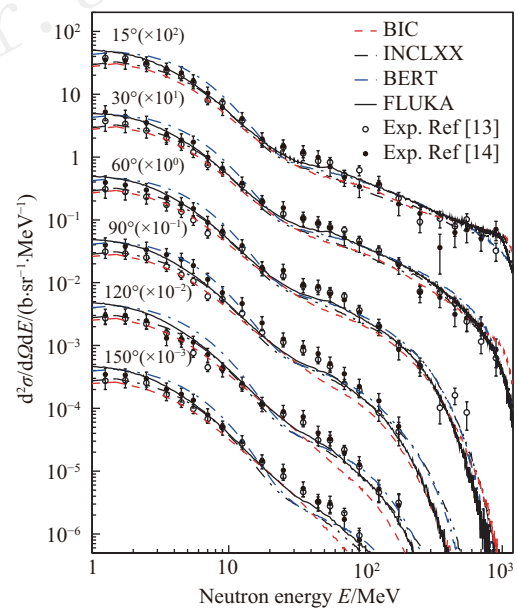


图 2 (在线彩图) 1500 GeV 质子轰击薄铅靶产生中子双微分截面的实验数据与 FLUKA 和 Geant4 程序模拟结果对比

60°) 的模拟结果与实验数据符合得很好, 在大角度方向 (120°, 150°) 三种模型在部分能量段的模拟结果与实验数据有分歧, 包括能量高于 50 MeV 时, BERT 和 INCLXX 模型的模拟结果高于实验数据; 能量在 10~40 MeV 范围内, BIC 模型模拟结果明显高于实验数据, 而 BERT 模型模拟结果略微低于实验数据。

图 2 给出了 1500 MeV 质子轰击薄铅靶, 在 15°,

30°, 60°, 90°, 120° 及 150° 出射角的中子双微分截面的模拟结果 (线段), 及 Nakamoto、Ishibashi 等的实验数据 (空心及实心点), 实验中铅靶厚度分别为 15 和 13.608 g/cm²。由图可见, 在能量低于 10 MeV 和高于 20 MeV 时, Geant4 程序的几种模型和 FLUKA 程序的模拟结果在实验误差范围内有明显的不同, 需要更加精确的实验来验证哪一种模型的结果更精确。整体看来 Geant4 程序的 INCLXX 模型和 FLUKA 程序模拟结果与实验数据符合得更好。

3.2 厚铅靶模拟结果与实验数据对比

相较于粒子在薄靶中运输的过程, 粒子在厚靶中的宏观运输过程, 还需要考虑较高能量出射粒子继续与厚靶中其他核发生的反应, 直至出射粒子逃逸出厚靶或者能量低于发生反应的阈能而停留在靶内。

图 3 和图 4 分别给出了 FLUKA 和 Geant4 程序模拟 500 和 1500 MeV 的质子轰击 20 cm 厚铅靶在不同角度产生的中子双微分产额, 模拟铅靶尺寸为 15 cm×15 cm×20 cm 平板型靶, 与实验中使用的靶参数一致。模拟结果与 Meigo^[15] 的实验数据进行了对比。

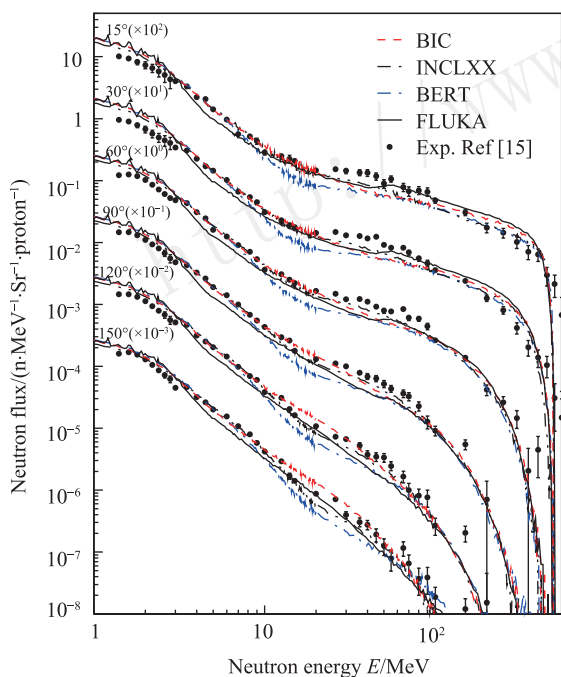


图 3 (在线彩图) 500 MeV 质子轰击平板型厚铅靶产生的中子双微分产额, 实验数据与 FLUKA 和 Geant4 程序模拟结果对比

图 3 是 500 MeV 质子轰击厚铅靶在 15°, 30°, 60°, 90°, 120° 及 150° 出射方向中子双微分产额模拟结果与实验数据的对比。从图 3 可以看出, 除 BERT 模型在 20~100 MeV 能量范围内, 模拟结果明显低于实验数

据, 其他模拟结果和实验数据能够较好地符合。

图 4 是 1500 MeV 质子轰击厚铅靶在 15°, 30°, 60°, 90°, 120° 及 150° 出射方向中子双微分产额模拟结果与实验数据的对比。从图 4 可以看出, 在 20~100 MeV 能量范围内, 所有的模拟结果都低于实验数据, Geant4 程序的几种模型和 FLUKA 程序的模拟结果基本一致, 其他能区基本可以重现实验结果。

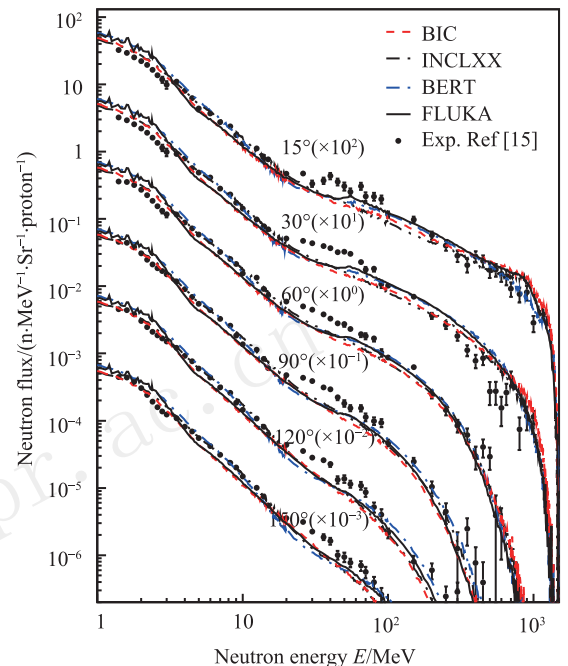


图 4 (在线彩图) 1500 MeV 质子轰击平板型厚铅靶产生的中子双微分产额, 实验数据与 FLUKA 和 Geant4 程序模拟结果对比

3.3 厚钨靶模拟结果与实验数据对比

高能质子轰击厚钨靶, 在反角方向 (175°) 产生的中子具有能谱宽、脉冲短的特点, 适合用于开展核数据测量工作^[16]。图 5 给出了 400, 600, 800, 1000 和 1200 MeV 质子轰击厚圆柱形钨靶, 在反角方向出射的次级中子双微分产额的模拟结果与 Belykov-Bodin^[17] 实验数据对比, 实验和模拟采用的钨靶尺寸为 ϕ 20 cm×40 cm。

从图 5 可以看出, Geant4 程序的 BIC 模型和 FLUKA 程序与实验数据符合得较好。INCLXX 模型在能量高于 60 MeV 时模拟结果低于实验数据; BERT 模型与实验数据差异较大, 在 10~60 MeV 能量范围内模拟结果高于实验数据, 在 60 MeV 以上能量范围内模拟结果低于实验数据。但是随着入射质子能量的增加, BERT 模型的模拟结果得到改善, 10~60 MeV 范围的模拟结果与实验数据的差异缩小。

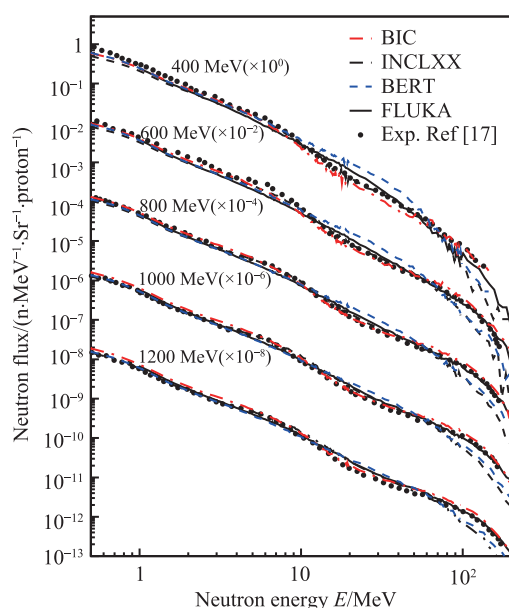


图 5 (在线彩图) 不同能量质子轰击厚圆柱形钨靶, 反角方向产生的中子双微分产额实验数据与 FLUKA 和 Geant4 程序模拟结果对比

4 结论

本文利用 FLUKA 和 Geant4 程序模拟了 597 和 1500 MeV 质子轰击薄铅靶不同出射角度中子双微分截面, 500, 1500 MeV 质子轰击厚铅靶不同出射角度中子双微分产额, 以及 400, 600, 800, 1000 和 1200 MeV 质子轰击厚钨靶在反角方向 (175°) 的中子双微分产额, 并且与实验数据进行了比较。研究表明, 对于薄铅靶, Geant4 程序的 INCLXX 模型和 FLUKA 程序模拟结果与实验符合得更好。能量在 10~40 MeV 范围内, BIC 模型模拟结果明显高于实验数据, 而 BERT 模型模拟结果略微低于实验数据。对于厚铅靶, 在 40 MeV 左右所有的模拟结果都低于实验数据。对于厚钨靶, Geant4 程序的 BIC 模型和 FLUKA 程序与实验数据符合的较好, INCLXX 模型在能量高于 60 MeV 时模拟结果低于实验数据, BERT 模型与实验数据差异较大。总体来看, Geant4 程序的 INCLXX 模型和 FLUKA 程序进行 ADS 散裂靶相关的中子学的计算是合理和可靠的。

参考文献:

- [1] WANG Junsheng, ZHANG Ying, ZHANG Lixing, *et al.* Chinese Journal of Computational Physics, 2003, **20**(5): 408. (in Chinese)
- [2] SATO T, NIITA K, MATSUDA N, *et al.* J Nucl Sci Technol, 2013, **50**(9): 913.
- [3] MCKINNEY G W. Physics and Algorithm Enhancements for a Validated MNCP/X Monte Carlo Simulation Tool, Phase VII[C]. DNDO/NSF ARI Grantees Conference, Leesburg, Virginia, United States, 2012: 1.
- [4] Geant4 Collaboration. Geant4 User's Guide for Application Developers, December, 2011.
- [5] BATTISTONI G, BOEHLEN T, CERUTTI F, *et al.* Ann Nucl Energy, 2015, **82**: 10.
- [6] ZHANG Suyalatu, LUO Fei, CHEN Zhiqiang, *et al.* Nuclear Physics Review, 2016, **33**(3): 370. (in Chinese)
(张苏雅拉吐, 罗飞, 陈志强, 等. 原子核物理评论, 2016, **33**(3): 370.)
- [7] FAN Sheng, YU Hongwei, SHEN Qingbiao, *et al.* Nuclear Physics Review, 2002, **19**(4): 390. (in Chinese)
(樊胜, 于洪伟, 申庆彪, 等. 原子核物理评论, 2002, **19**(4): 390.)
- [8] NIKHIL VITTAL SHETTY, Study of Particle Transport in a High Power Spallation Target for an Accelerator-Driven Transmutation System[O]. India: Aachen University, 2013: 51.
- [9] YIN Chenyan, LI Zhiyuan, ZHOU Chao, *et al.* Journal of University of South China: Science and Technology, 2010, **24**(2): 1. (in Chinese)
(尹陈艳, 李志远, 周超, 等. 南华大学学报: 自然科学版, 2010, **24**(2): 1.)
- [10] LEE S C, BUNGAU C, CYWINSKI R, *et al.* Geant4 Simulations of Proton-Induced Spallation for Applications in ADSR Systems[C]. Proceedings of IPAC2016, Busan, Korea, 2016: 1943.
- [11] HEILBRONN L, NAKAMURA T, IWATA, *et al.* Overview of Secondary Neutron Production Relevant to Shielding in Space, 2005, **116**(1-4): 140.
- [12] AMIAN W B, BYRD R C, CLARKET D A, *et al.* Nuclear Science and Engineering, 1993, **115**(1): 1.
- [13] TSTSUSHI NALAMOTO, KENJI ISHIBASHI, NARUHIRO MATSUFUHI, *et al.* Journal of Nuclear Science and Technology, 1995, **32**(9): 827.
- [14] KENJI ISHIBASHI, HIROSHI TAKADA, TATSUSHI NAKAMOTO, *et al.* Journal of Nuclear Science and Technology, 1997, **34**(6): 529.
- [15] MEIGO S, TAKADA H, CHIBA S, *et al.* Nucl Instr Meth A, 1999, **432**: 521.
- [16] TANG Jingyu, JING Hantao, XIA Haihong, *et al.* Atomic Energy Science and Technology, 2013, **47**(7): 1089. (in Chinese)
(唐靖宇, 敬罕涛, 夏海鸿, 等. 原子能科学技术, 2013, **47**(7): 1089.)
- [17] BELYKOV-BODIN V I, KATINOV Y V, NOZDTACHEV V N, *et al.* Nucl Instr Meth A, 2008, **596**: 434.

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

SONG Lin^{1,2}), CHEN Zhiqiang^{1,†}, HAN Rui¹, SUN Qi^{1,2}, TIAN Guoyu^{1,2}, REN Peipei^{1,2}

(1. *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: The reliable Monte Carlo simulation codes coupled with nuclear reaction models play an important role in the neutronic calculation for the design and optimization of the ADS spallation target. In this work, the double differential cross sections at different angles produced from a thin lead target bombarded with 597 and 1500 MeV protons, the neutron energy spectra at different angles produced from a thick lead target bombarded with 500 and 1500 MeV protons, and the neutron energy spectra in the backward direction (175°) produced from a thick tungsten target bombarded with 400, 600, 800, 1000 and 1200 MeV protons are calculated with the Geant4 code coupled INCLXX, BIC and BERT models and the FLUKA code. The calculations are compared with the available experimental data. The results show that, for the thin lead target, the calculations with the Geant4 coupled INCLXX model and FLUKA code well reproduce the experimental results. In a energy range from 10 to 40 MeV, BIC model obviously overestimates the experimental results, and BERT model slightly underestimates the experimental results. For the thick lead target, all of the calculations underestimate the experimental results around 40MeV. For the thick tungsten target, the Geant4 coupled BIC model and FLUKA code well reproduce the experimental results. INCLXX model underestimates the experimental results above 60 MeV. BERT model bad reproduces the experimental results. Overall, the neutronic calculations with the Geant4 code coupled INCLXX model and FLUKA code for the ADS spallation target is reasonable and reliable.

Key words: Geant4; FLUKA; Monte Carlo Method; spallation reaction; neutron spectra

Received date: 11 Oct. 2017; **Revised date:** 11 Dec. 2017

Foundation item: National Natural Science Foundation China(914263011, 11605257); Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences(XDA030300200)

† **Corresponding author:** CHEN Zhiqiang, E-mail: zqchen@impcas.ac.cn.