

文章编号: 1007-4627(2016)03-0370-04

利用 GEANT4 和 FLUKA 研究质子诱发散裂反应 出射中子双微分截面

张苏雅拉吐¹, 罗飞^{2,3}, 陈志强³, 特木尔巴根¹

(1. 内蒙古民族大学物理与电子信息学院, 内蒙古 通辽 028000;

2. 中国科学技术大学, 合肥 230027;

3. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

摘要: 在中高能质子诱发散裂反应相关核工程设计中, 可靠的蒙特卡罗模拟程序结合核反应理论模型具有较好的理论指导意义。本工作中, 利用 GEANT4 耦合 INCL4 和 ABLA 理论模型以及 FLUKA 耦合 PEANUT 模型模拟计算了几百 MeV 至几个 GeV 质子轰击 Be, Al, Fe, W, U 等靶后 30°, 60°, 120°, 150° 出射角产生的散裂中子双微分截面, 并与现有实验数据进行了比较。结果发现, FLUKA 和 GEANT4 模拟计算较好地再现了 Al, Fe, W, U 等靶实验测量数据。然而, 模拟结果明显低估了 Be 靶出射中子能量小于 10 MeV 能区的实验数据。

关键词: GEANT4; FLUKA; 蒙特卡罗模拟程序; 散裂中子双微分截面

中图分类号: O571.55 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.33.03.370

1 引言

加速器驱动次临界反应堆系统 (Accelerator-Driven Subcritical reactor Systems, ADS) 在核废料嬗变、核燃料增值及洁净能源产生等方面的广泛应用掀起了国际性新的研究热点^[1-2]。ADS 系统的一个重要组成部分是散裂靶装置。它利用加速器产生的高通量、高能量质子束轰击重金属靶, 并通过散裂反应产生中子的可控外部中子源, 用于反应堆在次临界条件下运行。散裂靶系统设计中, 蒙特卡罗模拟程序结合可靠的散裂反应理论模型起着重要的作用。蒙特卡罗模拟计算可以为工程设计提供基础数据或指导性建议。GEANT4^[3-4]、FLUKA^[5-6]以及MCNP^[7]等蒙特卡罗模拟程序在ADS散裂靶系统设计方面受到了广泛的应用。其中, GEANT4和FLUKA对于非商业和军事用途不收取授权费用, 因此受到了国际科研工作者及学生的极大的关注和兴趣。

本文利用 GEANT4 和 FLUKA 蒙特卡罗模拟程序结合散裂反应理论模型, 理论计算了几百 MeV 至几个 GeV 质子与不同靶材料相互作用后出射的中子双微分截面。将理论计算结果与文献实验数据进行了对比。

2 散裂反应机制

散裂反应是指相对论运动的轻炮弹(如: 中子、质子及轻粒子)轰击重靶核, 并产生大量的强子、核子及碎片的相互作用过程。入射粒子的能量一般在每核子几百 MeV 到几个 GeV 之间。通常, 散裂反应被认为具有两个过程, 包括核内级联过程和余核退激过程^[8]。

核内级联过程被认为是核子核子直接相互作用碰撞过程, 没有复合核的形成。入射质子能够清晰地“看”到靶核核子, 通过弹性碰撞或介子产生过程损失能量。获得动能的反冲核子、介子继续与其他核子相互作用或逃出靶核。余核退激是一个平衡态过程, 渡越时间一般为 10^{-16} s。核内级联过程结束后, 具有小角动量、高激发态的剩余核将会经历蒸发和裂变两个过程。当残余核(裂变产物或蒸发余核)的激发能小于最后一个中子结合能(一般约 8 MeV)时, 发射伽玛射线进行退激。伽玛跃迁后的余核一般都是远离 β 稳定线的放射性核, 并经过衰变最后达到基态的稳定核。实际工作中, 就某一次散裂反应而言, 核内级联和余核退激过程之间存在着预平衡过程。处于该阶段的高激发态余核还没进入复合核的平衡态, 将会发射中子及轻带电粒子等。出射粒

收稿日期: 2015-12-21; 修改日期: 2016-01-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11605097); 内蒙古民族大学博士科研启动基金(BS365); 中国科学院ADS项目302课题资助项目(Y103010ADS)

作者简介: 张苏雅拉吐(1986-), 男(蒙古族), 内蒙古通辽人, 副教授, 理学博士, 从事核数据实验测量与模拟研究;
E-mail: zsytl0416@163.com。

子能量比蒸发过程中产生的高, 比核子核子直接相互作用过程的低。

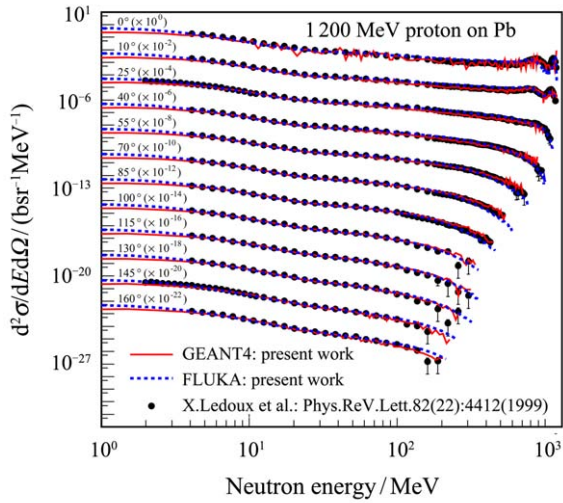


图1 (在线彩图) 1 200 MeV质子轰击铅靶产生中子双微分截面

黑色实心圈是X.Ledoux等人的实验数据, 红色和绿色实线分别代表GEANT4和FLUKA计算结果。

图1中显示了, Ledoux等^[9]实验测量的1 200 MeV质子轰击铅靶产生中子双微分截面与GEANT4和FLUKA蒙特卡罗模拟计算结果的比较。图中从上到下的曲线分别代表不同出射角的截面。由图可知, 余核退激过程产生的中子能量高达20 MeV, 角分布具有各向同性等特征。高能段(100 MeV以上)中子朝前趋势比较明显, 在小角度能谱上明显地观察到与弹核入射能量相当的中子。该能区的中子主要是核内级联过程的核子核子直接相互作用中产生。中间能量的中子是各向异性发射的, 可以用核内级联和余核退激的中间态预平衡过程进行解释。

3 蒙特卡罗模拟程序

3.1 GEANT4程序

GEANT4^[3-4]是由欧洲核子研究中心(CERN)开发的基于面向对象编程语言C++的蒙特卡罗模拟软件包, 主要用于模拟粒子输运和粒子与物质相互作用过程。因具有可视化、粒子追踪、可以处理复杂的几何体等优点, 在核物理和粒子物理、加速器物理、医学、天体物理、空间研究等方面获得了广泛的应用。利用GEANT4进行模拟计算时, 用户可以自由选择物理算法, 并按自己的需求来选择某种物理过程或结合几种物理过程一起使用。为研究质子诱发散裂反应出射中子双微分截面, 本工作中采用INCL4和ABLA理论模型分别描述核内级联过程和余核退激过程。

GEANT4模拟计算中所建立的靶物理模型与实验中所采用的靶相同。入射质子束流轰击靶材料时, 通过电离相互作用损失能量; 同时, 发生散裂反应产生中子。在数据分析中, 以特定的出射角和能量作为条件便可得到出射中子双微分截面。

3.2 FLUKA程序

FLUKA^[5-6]是由(CERN)和意大利核物理研究院(INFN)联合开发的基于编程语言Fortran的蒙特卡罗模拟程序, 可以运行在Linux和UNIX操作系统下。主要用于加速器屏蔽设计、活化、剂量学、探测器设计、宇宙射线、中微子物理以及ADS系统设计等。FLUKA使用改进的CG软件包能够处理复杂的几何结构, 还可以追踪带电粒子。FLUKA中的物理算法和理论模型是固定的, 用户只能选择采用或不采用某些物理过程。描述强子核子相互作用的物理算法是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, 并且不同的物理过程之间进行平滑的衔接。当核子能量小于约50 MeV, 并且没有粒子发射时核内级联过程将被停止, 紧接着预平衡过程及蒸发过程开始起作用。

利用FLUKA计算质子诱发散裂反应出射中子双微分截面的靶物理模型和数据分析方法与GEANT4模拟计算时一样。

4 计算结果与讨论

利用GEANT4和FLUKA蒙特卡罗模拟程序, 理论计算了不同入射能量的质子轰击ADS散裂靶系统设计相关靶材料产生的中子双微分截面。通过比较不同模拟程序的计算结果以及与现有实验数据, 验证了各个模拟程序的预言实验数据的本领。本文中所采用的实验数据取自于EXFOR数据库^[10]。

图2中给出了800 MeV质子轰击Be, Al, Fe, U靶后的30°, 60°, 120°, 150°出射角的中子双微分截面。图3中给出了800, 1000, 1200, 1600 MeV质子轰击W靶后的30°, 60°, 120°, 150°出射角的中子双微分截面。图中的黑色实心圆圈表示实验数据^[10], 蓝色点线和粉色方块分别表示GEANT4和FLUKA模拟计算结果。图中从上到下的不同角度的截面数据分别乘以1, 10⁻², 10⁻⁴, 10⁻⁶因子。由以上蒙特卡罗模拟计算与实验数据的比较, 可得到以下结论:

(1) 计算800 MeV质子入射Be靶后的出射中子双微分截面时, FLUKA和GEANT4的模拟结果较好地再现了中子能量大于10 MeV的实验数据。然而, 模拟

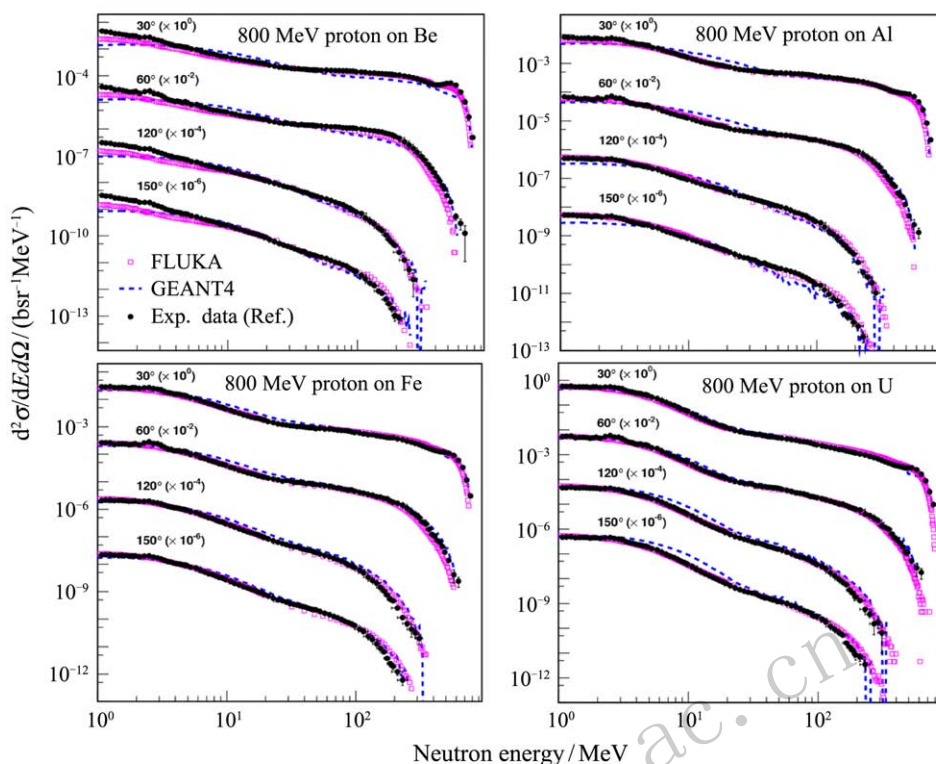


图 2 (在线彩图) 800 MeV 质子轰击 Be, Al, Fe, U 靶产生中子双微分截面
黑色实心圈是取自 EXFOR 数据库的实验数据, 粉色空心方框和蓝色点线分别代表 FLUKA 和 GEANT4 计算结果。

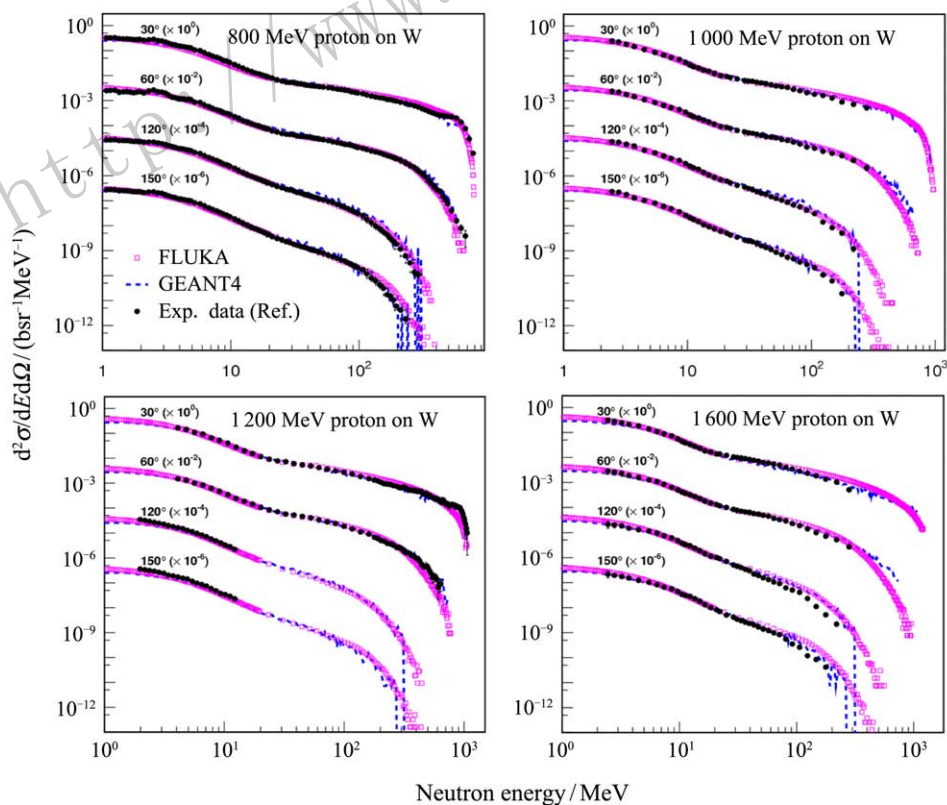


图 3 (在线彩图) 800, 1000, 1200, 1600 MeV 质子轰击 W 靶产生中子双微分截面
黑色实心圈是取自 EXFOR 数据库的实验数据, 粉色空心方框和蓝色点线分别代表 FLUKA 和 GEANT4 计算结果。

结果明显地低估了出射中子能量小于 10 MeV 能区的实验数据。

(2) 随着靶核质量数和入射质子能量的增加, FLUKA 模拟计算与实验数据在全能量范围内(除 Be 靶外)都能够符合得较好。GEANT4 模拟计算整体上很好地再现了实验数据。然而, 部分出射角的 GEANT4 模拟结果与实验数据稍有偏差。

5 结论

散裂反应工程应用 ADS 靶系统设计中, 蒙特卡罗模拟程序结合可靠的核反应理论模型起着重要的作用。GEANT4 和 FLUKA 程序对于非商业和军事用途不收取授权费用, 因此在 ADS 散裂靶系统设计方面受到了广泛的应用。本工作中, 利用 GEANT4 和 FLUKA 蒙特卡罗模拟程序结合散裂反应理论模型, 模拟计算了几百 MeV 至几个 GeV 质子轰击不同靶产生的散裂中子双微分截面。通过比较理论模型计算结果与现有实验数据, 检验了各个理论模型。研究结果表明, 利用 GEANT4 耦合 INCL4 和 ABLA 理论模型以及 FLUKA 耦合 PEANUT 模型进行 ADS 散裂靶相关

中子学的计算是合理和可行的。

参考文献:

- [1] SLOWINSKI B. Applied Energy, 2003, **75**: 129.
- [2] DING Dazhao, FU Shinian, Modern Physics, 2001, **13**: 20. (in Chinese)
(丁大钊, 傅世年. 现代物理知识, 2001, **13**: 20)
- [3] AGOSTINELLI S, ALLISON J, AMAKO K, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2003, **506**: 250.
- [4] ALLISON J, AMAKO K, APOSTOLAKIS J, *et al.* IEEE Transactions on Nuclear Science, 2006, **53**: 270.
- [5] FASSO A, FERRARI A, ROESLER S, *et al.* Computing in High Energy and Nuclear Physics 2003 Conference (CHEP2003), arXiv: hep-ph/0306267.
- [6] FASSO A, FERRARI A, RANFIT J, *et al.* CERN-2005-10, INFN/TC_05/11, SLAC-R-773, 2005.
- [7] BRIESMEISTER J F. (Eds.). LA-12625, 1993.
- [8] SERBER R. Physical Review, 1947, **72**: 1114.
- [9] LEDOUX X, BORNE F, BOUDARD A, *et al.* Physical Review Letters, 1999, **82**: 4412.
- [10] PRITYCHENKO B. EXFOR Experimental Nuclear Reaction Data Retrievals [EB/OL]. [2013-03-28]. <http://www.nndc.bnl.gov/exfor/exfor00.htm>

GEANT4 and FLUKA Simulations of Neutron Production Double Differential Cross Sections in Proton Induced Spallation Reaction

ZHANG Su-ya-la-tu^{1,1)}, LUO Fei^{2,3}, CHEN Zhiqiang³, Temuerbagen¹

(1. Inner Mongolia University for the Nationalities, College of Physics and Electronics Information, Tongliao 028000, Inner Mongolia, China;
2. University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;
3. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: For the design of nuclear engineering related with medium-high energy proton induced spallation reaction, the reliable Monte Carlo simulation codes coupled with nuclear reaction models have a good theoretical guidance. In this work, the production spallation neutron double differential cross sections at 30°, 60°, 120°, 150° emission angle for Be, Al, Fe, W, U target materials at incident proton energies between several hundred MeV and GeV are theoretically calculated by using the GEANT4 coupled INCL4 and ABLA, and the FLUKA coupled PEANUT. The calculated results were compared with the available experimental data. It is found that the GEANT4 and FLUKA calculations well reproduced the experimental measurement of Al, Fe, W, U target materials. However, calculations obviously underestimated the emission neutrons of Be target for lower than 10 MeV energy range.

Key words: GEANT4; FLUKA; Monte Carlo simulation code; spallation neutron double differential cross section

Received date: 21 Dec. 2015; Revised date: 8 Jan. 2016

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (11605097); Doctoral Scientific Research Foundation of Inner Mongolia University for Nationalities(BS365); ADS Project 302 of Chinese Academy of Sciences(Y103010ADS)

1) E-mail: zsytl0416@163.com.