

文章编号: 1007-4627(2014)02-0166-04

## Geant4 模拟在特洛伊木马方法中的应用

蒋宗均<sup>1</sup>, 文群刚<sup>2</sup>, 李成波<sup>3</sup>, 傅元勇<sup>4</sup>, 周书华<sup>4</sup>, 汪晓莲<sup>1</sup>

(1. 核探测与核电子学国家重点实验室, 中国科学技术大学, 合肥 230026;

2. 安徽大学, 合肥 230601;

3. 北京市辐射中心, 北京 100875;

4. 中国原子能科学研究院, 北京 102413)

**摘要:** 由于低能带电粒子核反应截面直接测量遇到的库仑位垒和电子屏蔽势的困难, 基于准自由反应机制的特洛伊木马方法得到特别关注。利用 Geant4 模拟的结果, 与在中国原子能研究院串列加速器上通过三体反应  ${}^9\text{Be}+{}^2\text{H}\rightarrow{}^8\text{Be}+{}^2\text{H}+n$  对两体反应  ${}^9\text{Be}+{}^1\text{H}\rightarrow{}^8\text{Be}+{}^2\text{H}$  的反应截面做的间接测量实验数据进行了比较, 这是 Geant4 模拟在特洛伊木马方法中的首次应用。通过对模拟数据研究, 提高了对实验数据的理解, 也检验了模拟系统的可靠性, 对今后的实验设计和改进提供了有益的意见。

**关键词:** 低能带电粒子; 准自由反应; 特洛伊木马方法; Geant4

**中图分类号:** O571.53      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.31.02.166

### 1 引言

特洛伊木马方法 (Trojan-Horse Method, THM) 是一种间接测量方法<sup>[1-3]</sup>, 它建立在准自由反应机制基础上。如图 1 所示, 对一个感兴趣的带电粒子两体反应  $A+x\rightarrow C+c$ , 选取一个与之密切相关的三体反应  $A+a\rightarrow C+c+b$ , 其中  $a$  可以看做两个结合的比较松散的集团  $x$  和  $b$  组成, 在准自由反应条件下, 核反应过程中  $b$  的动量转移非常小, 与  $x$  比较可以忽略不计。这样, 核反应就可以看成在核  $A$  和核  $x$  之间发生,  $b$  核只是作为  $A+x$  反应的旁观者。其中  $x$  称为准自由反应的参与者;  $b$  称为该反应的旁观者; 而“运载”核  $x$  的母核  $a$ , 称为“木马核”。在准自由反应条件下  $A+x\rightarrow C+c$  可以在三体核反应相互作用区域内发生, 从而克服了库仑位垒和电子屏蔽效应的影响, 可以看做“裸核”反应<sup>[4]</sup>。目前, THM 主要应用于核天体反应研究中, 已有的研究成果充分检验了 THM 的有效性及广阔的应用前景<sup>[5-9]</sup>。Geant4<sup>[10]</sup> 是由 CERN 开发的蒙特卡罗应用软件包, 主要用于粒子物理实验中高能粒子在探测器中输运

的物理过程的模拟计算。为了更好地理解分析实验数据, 我们首次把 Geant4 应用于 THM。按实验装置和条件建立物理模型, 建立了一套应用于 THM 的模拟系统, 并将模拟数据与实验测量数据进行比较分析, 得到初步的结果。

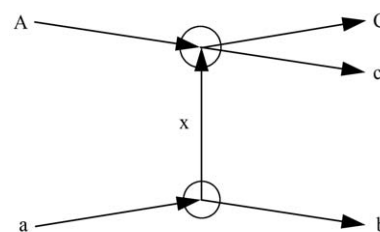


图 1 特洛伊木马方法示意图

### 2 实验装置

实验在中国原子能科学研究院串列加速器核物理国家实验室 R60° 束流管道终端的反应靶室完成。使用串列加速器提供的 22.44 MeV 的  ${}^9\text{Be}^{2+}$  束流轰击氘化聚乙烯靶 ( $\text{CD}_2$ )。流强控制为约 1.5 nA。为了减小束斑太大带来的角度误差, 使用 1 mm 宽的线靶,

收稿日期: 2013-06-25; 修改日期: 2013-07-08

基金项目: 国家自然科学基金(11075218, 10575132); 北京市自然科学基金(1122017)

作者简介: 蒋宗均(1987-), 男, 江苏南通人, 硕士研究生, 从事实验核物理研究; E-mail: tzjzj@mail.ustc.edu.cn

通信作者: 文群刚, E-mail: qungang@ahu.edu.cn.

CD<sub>2</sub> 靶与束流方向垂直放置。实验时, 使用了两种探测器, 其中位置灵敏探测器 (PSD<sub>1</sub>) 放置在距靶约 240 mm 处, 测量角度范围约为 15° ± 5°; 双位置灵敏探测器 (DPSD) 放置在束流线的另一侧位置, 距靶 250 mm, 测量角度范围约为 8.7° ± 5°。

### 3 模拟与实验数据比较

本次实验借助三体反应  ${}^9\text{Be}+{}^2\text{H}\rightarrow{}^8\text{Be}+{}^2\text{H}+n$  研究两体反应  ${}^9\text{Be}+{}^1\text{H}\rightarrow{}^8\text{Be}+{}^2\text{H}$  在天体能区的截面, 其中  $d=p+n$  作为“木马”核,  $n$  为准自由反应机制下的旁观者, 实验用 CD<sub>2</sub> 靶中除有 D 核外, 还有 H 和 C 核成分; 另一方面, 22.44 MeV 的  ${}^9\text{Be}$  束流与 D 靶反应除了我们关心的反应道外, 还有别的反应道数据产生。因此, 实验数据图谱的理解对于挑选我们关心的反应道, 排除其他反应道的数据干扰尤为重要。

图 2 为能量二维谱实验数据。其中,  $E_1$  表示带电粒子在 PSD<sub>1</sub> 中的沉积能量,  $E_u$  表示带电粒子在 DPSD 上端探测器中的沉积能量。图 3(a) 为模拟  ${}^9\text{Be}+{}^2\text{H}\rightarrow\alpha+{}^6\text{Li}+n$  核反应的结果; 图 3(b) 是模拟  ${}^9\text{Be}+{}^1\text{H}\rightarrow\alpha+{}^6\text{Li}$  的过程, 偏于右下方的点在实

验图中未找到, 可能淹没在实验的本底之中; 图 3(c) 为模拟  ${}^9\text{Be}+{}^2\text{H}\rightarrow{}^3\text{H}+{}^4\text{He}+{}^4\text{He}$  反应道得到的结果; 图 3(d) 为  ${}^9\text{Be}+{}^2\text{H}\rightarrow{}^9\text{Be}+{}^2\text{H}$  弹性散射的模拟结果。正常的弹散能量二维谱中的黑点应该在  $E_1+E_u=22.4$  MeV 的直线上, 通过模拟, 最终找到原因: 由于探测器未能完全沉积该反应道出射粒子所有能量所导致。对各反应道的模拟数据有助于我们更好地理解 and 处理实验数据。

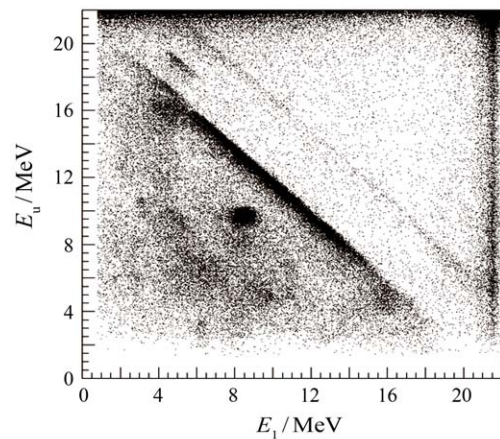


图 2 出射粒子能量二维谱实验数据

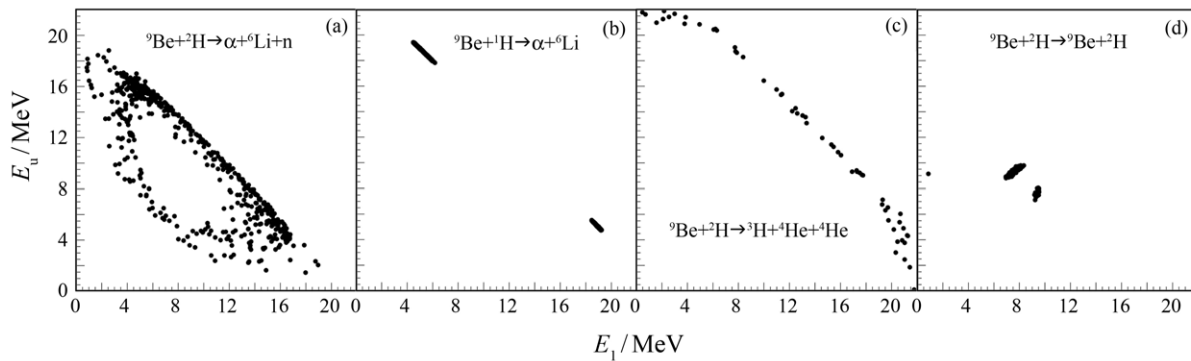


图 3 各反应道出射粒子能量二维谱模拟

图 4 为 DPSD 上端探测器能量和角度二维谱实验数据图。图 5(a) 为用 Geant4 模拟  ${}^9\text{Be}+{}^2\text{H}\rightarrow{}^9\text{Be}+{}^2\text{H}$  反应道得到的图谱, 模拟  ${}^9\text{Be}$  时其为入射粒子, 动能为 22.4 MeV。其中类似抛物线的曲线是弹散后粒子的特征曲线, 在图 4 中不难找到。图 4 中  $E_1(16\sim 20\text{ MeV})$  处有一个小弧, 我们也对这段曲线做了模拟, 见图 5(b), 模拟  ${}^9\text{Be}+{}^1\text{H}\rightarrow{}^9\text{Be}+{}^1\text{H}$  弹性散射过程, 也得到了预期的小弧。

本次实验采用 DPSD 探测器的目的是重构  ${}^8\text{Be}$  粒子。因为  ${}^8\text{Be}$  非常不稳定, 会迅速地衰变成两个  $\alpha$  粒

子, 所以需通过 DPSD 探测器上下两个探测器探测的  $\alpha$  粒子重构出  ${}^8\text{Be}$  的实验信息。图 6 为实验数据图谱,  $E_u$  为粒子在 DPSD 上端探测器沉积的能量,  $E_d$  为粒子在 DPSD 下端探测器沉积的能量。图 7(a) 为模拟  ${}^9\text{Be}+{}^2\text{H}\rightarrow{}^8\text{Be}+{}^2\text{H}+n$  反应道, 可以看到实验数据和模拟数据还是比较吻合; 图 7(b) 是对反应道  ${}^9\text{Be}+{}^2\text{H}\rightarrow{}^8\text{Be}+{}^3\text{H}$  的模拟, 它很好地模拟了实验图上位于右上方的数据点。至于实验图中另一个明显的点, 猜测可能是另一反应道产物的衰变图, 在之后的实验中将继续加以关注。

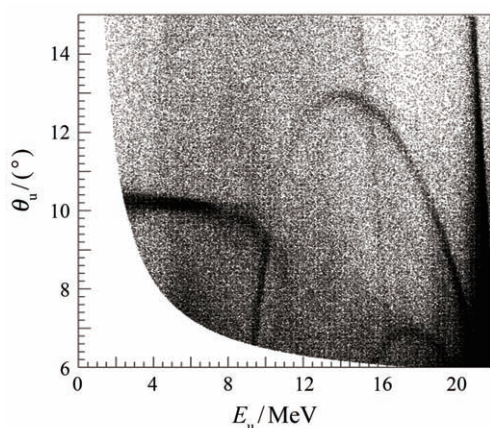


图 4 DPSD 上端探测器能量和角度二维谱实验数据

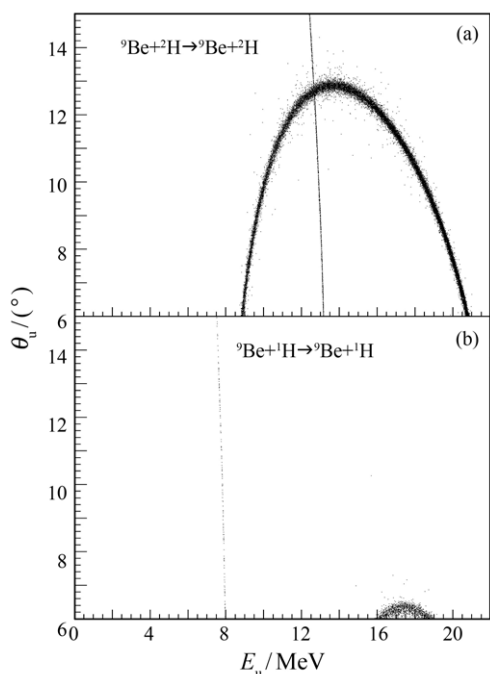


图 5 DPSD 上端探测器能量和角度二维谱模拟

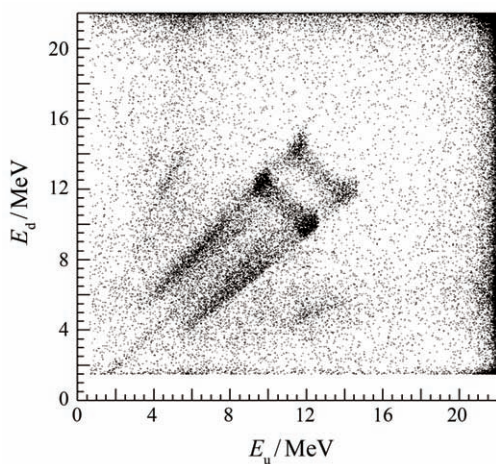


图 6  $^8\text{Be}$  粒子重构实验数据

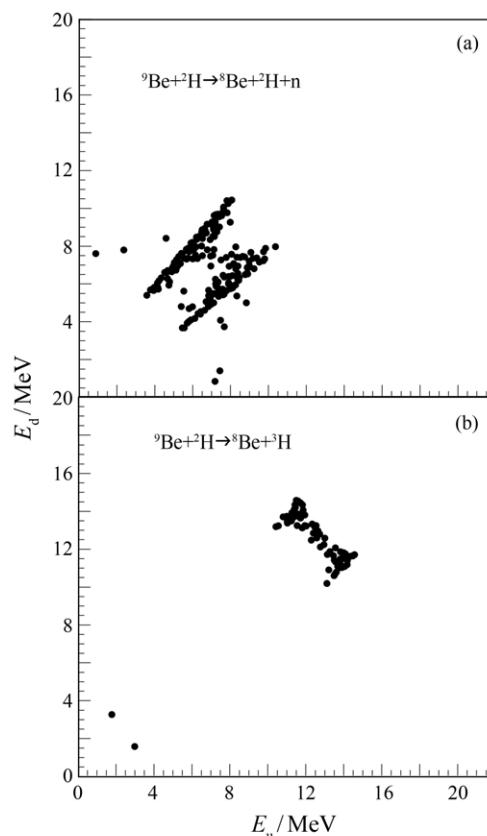


图 7  $^8\text{Be}$  粒子重构模拟

## 4 总结

本文以 Geant4 为基础，建立了一套用于 THM 的模拟系统，并应用于一组实验数据的分析研究中，目前的研究表明，该系统的模拟结果是可信与可靠的。通过实验数据与模拟数据的比较，可以帮助我们更好地理解实验数据的物理内涵，进而为数据分析提供有力的指导。另一方面，高质量的模拟数据也可为设计、改进实验方案提供重要的参考意见，从而为获得高质量的实验数据奠定扎实基础。

**致谢** 感谢中国原子能科学研究院林承健研究员课题组、周静高级工程师、孟秋英老师、叶力同学、胡守扬老师、李笑梅研究员、李霞副研究员等对我们实验测量提供的帮助。感谢意大利 INFN-LNS 实验室 Prof. C. Spitaleri 课题组的大力支持。

### 参考文献:

- [1] BAUR G, TYPEL S. ArXiv: nucl-th/v1, 2004, 0401054.
- [2] TYPEL S, BAUR G. Annals Phys, 2003, **305**: 228.

- [3] HAGINO K, HUSSEIN M S, BALANTEKIN A B. *Phys Rev C*, 2003, **68**: 048801.
- [4] SPITALERI C, CHERUBINI S, ZOPPO A D, *et al.* *Nucl Phys A*, 2003, **719**: 99c.
- [5] ROMANO S, LAMIA L, SPITALERI C, *et al.* *Eur Phys J A*, 2006, **27**: 221.
- [6] LI Chengbo, PIZZONE R G, SPITALERI C, *et al.* *Nuclear Physics Review*, 2005, **22**(3): 248. (in Chinese)  
(李成波, PIZZONE R G, SPITALERI C, 等. 原子核物理评论, 2005, **22**(3): 248).
- [7] WEN Qungang. Trojan Horse Method Applied to  ${}^9\text{Be}(p,\alpha){}^6\text{Li}$  at Astrophysical Energies and the Preliminary Study on the Intermediate Breakup Process[D]. Beijing: China Institute of Atomic Energy, 2009. (in Chinese)  
(文群刚. 用特洛伊木马方法研究  ${}^9\text{Be}(p,\alpha){}^6\text{Li}$  天体能区核反应及中间破裂过程的初步研究[D]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2009).
- [8] WEN Qungang, LI Chengbo, ZHOU Shuhua, *et al.* *Phys Rev C*, 2008, **78**: 035805.
- [9] WEN Qungang, LI Chengbo, ZHOU Shuhua, *et al.* *J Phys G: Nucl Part Phys*, 2011, **38**: 085103.
- [10] AGOSTINELLI S, ALLISON J, AMAKO K, *et al.* *Nuclear Instr and Meth A*, 2003, **506**: 250.

## Application of Geant4 Simulation in Trojan-Horse Method

JIANG Zongjun<sup>1</sup>, WEN Qungang<sup>2</sup>, LI Chengbo<sup>3</sup>, FU Yuanyong<sup>4</sup>, ZHOU Shuhua<sup>4</sup>, WANG Xiaolian<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, USTC, Hefei 230026, China;

2. Anhui University, Hefei 230601, China;

3. Beijing Radiation Center, Beijing 100875, China;

4. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

**Abstract:** Due to the difficulties of the Coulomb barrier and electron screening potential in directly measuring the cross sections of nuclear reaction for low-energy charged particle, Trojan-horse method based on quasi-free reaction was paid special attention. For the first time the Geant4 simulation is used for the indirect measurement of Trojan-horse method in the indirect measurement of two-body reaction  ${}^9\text{Be}+{}^1\text{H}\rightarrow{}^8\text{Be}+{}^2\text{H}$  by three-body reaction  ${}^9\text{Be}+{}^2\text{H}\rightarrow{}^8\text{Be}+{}^2\text{H}+n$  in Tandem accelerator of China Institute of Atomic Energy. The stability and reliability of the simulation system are examined by comparing the experimental data and simulated results, the simulation can provide useful comments for the design and improvements of future experiments.

**Key words:** low-energy charged particle; quasi-free reaction; trojan-horse method; Geant4

Received date: 25 Jun. 2013; Revised date: 8 Jul. 2013

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11075218,10575132); Natural Science Foundation of Beijing(1122017)

Corresponding author: WEN Qungang, E-mail: qungang@ahu.edu.cn.

<http://www.npr.ac.cn>