

文章编号: 1007-4627(2012)02-0173-05

低能中子探测的 GEANT4 模拟研究

吴冲¹, 张强¹, 孙志嘉², 唐彬², 周健荣², 许虹²,
杨桂安², 王艳凤², 王拓¹, 杨振²

(1. 中国石油大学理学院, 北京 102249;

2. 中国科学院高能物理研究所实验物理中心, 北京 100049)

摘要: 研究了 GEANT4 蒙特卡罗模拟程序在低能中子核反应中应用的可行性, 新版的 GEANT (4.9.4 版本) 升级了老版本在模拟 ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$ 核反应道的不足, 并且加入了最新截面数据库。对多个核反应道进行了研究, 模拟结果显示核反应截面、次级粒子能量和反应的分支比等是正确的; 比较了掺 ${}^6\text{Li}$ 材料热中子探测效率的实验结果与 MCNP 和 GEANT4 模拟结果, 它们基本一致。研究表明, 利用 GEANT4 研究 ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$ 是可行的, 这为进一步研究闪烁体中子探测器的位置分辨率模拟提供了有力支持。

关键词: 核反应; 探测器; 中子探测; 闪烁体

中图分类号: TL99 **文献标志码:** A

1 引言

对于高能物理和核物理的研究, 如大型加速器建造、核反应堆设计等, 前期都要进行大量可行性模拟研究, 以降低成本, 增加研究系统的可靠性和安全性。目前, 国际上主要的核物理模拟软件有 GEANT4^[1], MCNP^[2], FLUKA^[3] 和 EGS^[4] 等。

MCNP 是由美国 Los Alamos 国家实验室应用理论物理部的 Monte Carlo 小组经过数十年研究开发的一种基于蒙特卡罗方法的大型粒子输运程序。其输运粒子种类仅局限于中子、光子和电子, 在光子输运上, 它不能模拟可见光子的输运。MCNP 在低能粒子输运模拟上具有很高的精度, 目前主要应用在核反应堆设计、辐射屏蔽防护及核医学等领域。但由于 MCNP 属于商业软件, 且价格较昂贵, 从而限制了它的应用。

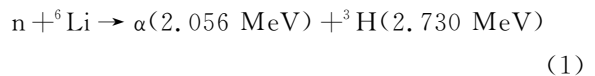
GEANT4 是基于 C++ 语言编写的面向对象技术构建的蒙特卡罗通用程序包。可以模拟所有已知的粒子与探测器介质之间的所有可能的相互作用, 方便跟踪感兴趣粒子的各种可能的物理过程并获得粒子位置、能量、能损和动量等众多有用信息。与 MCNP 软件相比, 用户可以在 GEANT4 官方网站

上免费下载程序, 另外根据用户需求可随时更改或添加相关物理作用过程等, 程序拓展性较强。GEANT4 在研究高能粒子输运有很高的精度, 其在粒子物理、粒子加速器和核医学等方面应用广泛。为了满足探测器设计的需求, GEANT4 也可用于模拟可见光子的输运。

由于闪烁体中子探测器建造的需要, GEANT4 能否应用于低能粒子的模拟是人们所感兴趣的。以 GEANT4 和 MCNP 的计算结果与实验结果的对比验证, 给出 GEANT4 在低能应用的可行性研究。

2 基于闪烁体的中子探测器

我国正在兴建散裂中子源^[5], 其主要研究目标之一就是利用中子散射技术获得物质微观结构的信息。探测散射中子需要位置灵敏中子探测器, 由于目前 ${}^3\text{He}$ 价格昂贵, 寻求替代的新型中子探测器迫在眉睫。闪烁体中子探测器^[6-7] 就是近期发展的新型中子探测器, 其基本原理如下:



核反应的次级粒子 α 和氚核在闪烁体中损失能

量产生荧光光子，荧光光子被闪烁屏表面的二维波移光纤阵列俘获吸收，并被转换为较长波长的光子，经波移光纤传输到光电倍增管，根据光电倍增管的信号幅度大小，可以重建出散射中子的二维位置信息。

中子的位置分辨率与光纤的直径、光纤排布的间距、光纤和闪烁体屏的耦合方式以及光纤的弯转半径等有关，使得位置分辨的研究变得复杂，为此要建立合理的蒙特卡罗模拟程序进行研究。

由于 MCNP 不能跟踪可见光子，而 GEANT4 可跟踪可见光子，但 ${}^6\text{Li}$ 与中子的核反应在 GEANT4 中是否准确需要检验。本文将 GEANT4 和 MCNP 两种程序计算的结果与实验结果进行对比，以验证 GEANT4 模拟结果的可靠性。

3 GEANT4 和 MCNP 两种程序的计算结果与实验结果的对比

模拟中所用闪烁体为 SAINT-GOBAIN 公司生产的 BC-704^[8]，由 LiF 和 ZnS:Ag 两种物质组成，Ag 为荧光激活剂，BC-704 具有较高的光产额 (160 000 photons/neutrons) 和较快的光衰减时间 (110 ns)，发射光的峰值波长为 450 nm。模拟所采用的几何模型为：中子沿法向入射在半径为 10 mm 和高为 1 mm 的圆柱形闪烁体靶中。MCNP 程序中，中子的输运方式采用中子、光子和电子联合输运模型，敏感区域使用高权重降低统计误差。GEANT4 采用 LHEP-PRECO-HP 模型，并添加有可能产生的粒子种类，及发生的物理相互作用过程^[9]。

3.1 核反应次级粒子能量

由前面的反应(1)可知，中子与 ${}^6\text{Li}$ 核反应产生次级粒子氚核和 α ，其能量分别为 2.730 和 2.056 MeV。考虑到 MCNP 只能进行中子、光子和电子 3 种粒子输运计算的局限性，本文用 GEANT4 程序模拟 ${}^6\text{Li}$ 与热中子(能量为 0.025 3 eV)的核反应，并跟踪次级粒子的能量，如图 1 和图 2 所示。图 1(a)和图 2(a)表明，模拟得到的氚核、 α 粒子能量分别为 1.56 和 1.17 MeV，同时还通过非物理作用过程产生两个能量为 1.03 MeV 的 γ 光子和一个能量为 0.002 12 MeV 的 γ 光子，这与实际反应不相符。研究发现，这是 GEANT4 程序的问题^[10]，其

中 γ 光子的出现是为了保持核反应的能量守恒。

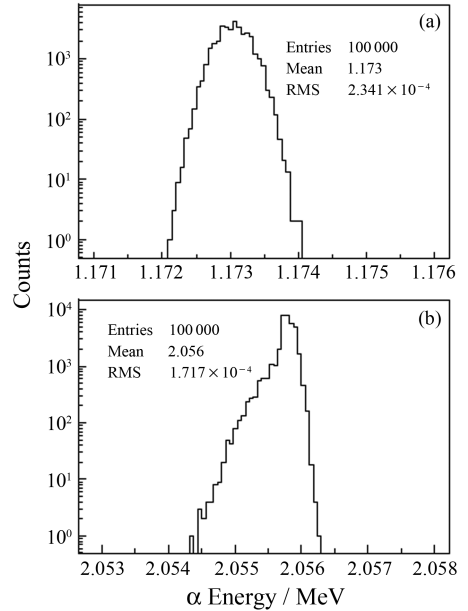


图 1 α 粒子能谱图

(a)老版本, (b)新版本。

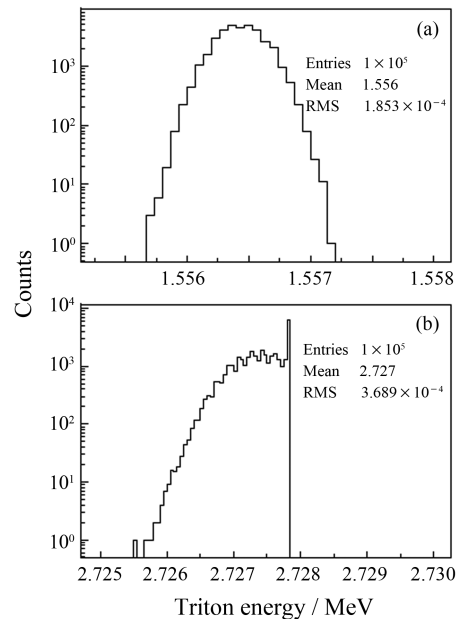


图 2 氚核粒子能谱图

(a)老版本, (b)新版本。

目前 GEANT4 最新版本 4.9.4 对上述错误进行了修正，将核反应方程修改为了前述的反应(1)，避免了 3 个 γ 光子的出现。同时 GEANT4 开发者根据实验结果重新修正了中子与 ${}^6\text{Li}$ 的各种相互作用截面，推出了包含较完善热中子截面数据库 G4NDL.3.14 和高能中子截面库 G4NDL.0.2，供

用户下载使用。本文将老版本GEANT4更新为新

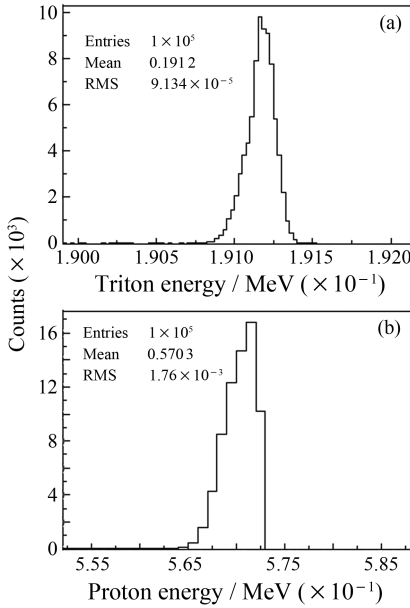


图 3 氚核(a)和质子(b)的粒子能谱

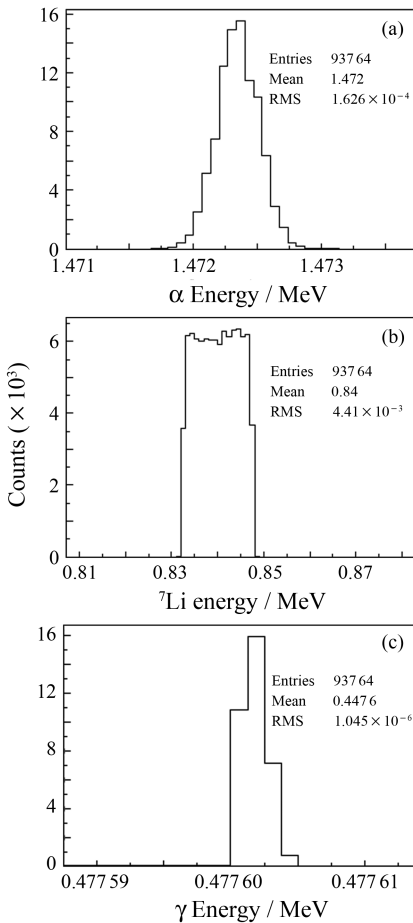


图 4 核反应(3)次级粒子能谱
(a) α, (b) ⁷Li, (c) γ。

的 4.9.4 版本，同时加入经过修正的热中子截面库，并重新对(1)的核反应进行模拟计算。图 1(b)和图 2(b)为新版本模拟的次级粒子能谱图，其 α 粒子和氚核的能量分别为 2.056 和 2.730 MeV，与反应方程(1)相符合。能谱展宽是由于在闪烁体表面附近发生核反应产生的次级粒子丢失部分能量后，从闪烁屏中逃逸所致。为验证模拟程序是否适用更多的核反应道，用 GEANT4 程序分别模拟中子与 ³He 和 ¹⁰B 的核反应。³He(n, p)³H 和 ¹⁰B(n, α)⁷Li 核反应如下^[10]：

$$n + {}^3\text{He} \rightarrow \text{T}(0.19 \text{ MeV}) + \text{p}(0.57 \text{ MeV}), (2)$$

$$n + {}^{10}\text{B} \rightarrow \alpha(1.47 \text{ MeV}) + {}^7\text{Li}(0.84 \text{ MeV}) + \gamma(0.478 \text{ MeV}), 93.8\% (3)$$

$$n + {}^{10}\text{B} \rightarrow \alpha(1.78 \text{ MeV}) + {}^7\text{Li}(1.01 \text{ MeV}), 6.20\% (4)$$

图 3 表明，在核反应³He(n, p)³H 中，次级粒子质子和氚核的能量分别为 0.57 和 0.19 MeV。图 4(a)、图 4(b)和图 4 (c)是核反应(3)的次级粒子能谱。可以看出，α 能量为 1.47 MeV，⁷Li 为 0.84 MeV，γ 射线为 0.48 MeV。图 5(a)和图 5(b)为核

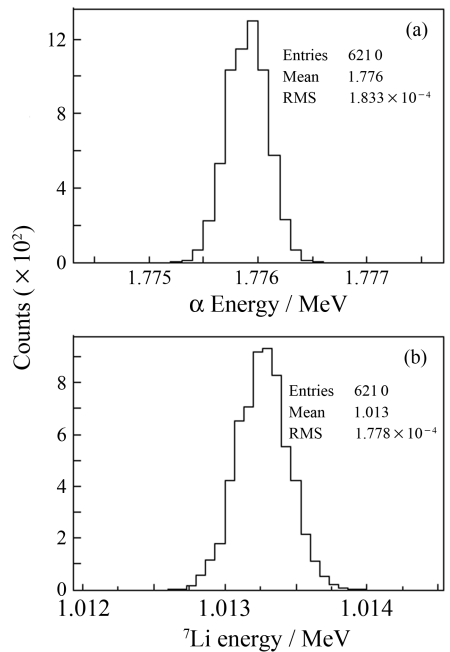


图 5 核反应(4)次级粒子能谱
(a) α 粒子, (b) ⁷Li。

反应(4)的次级粒子能谱，其中 α 能量为 1.78 MeV，⁷Li 为 1.01 MeV。由图 4 和图 5 可以看到，两个反应的分支比分别为 93.8% 和 6.2%。以上计

算结果均与相应的核反应道相一致。

3.2 中子的探测效率

定义中子探测效率 $\epsilon = N/N_0$ ，其中 N 为探测到的中子计数， N_0 为模拟的粒子总数。利用 GEANT4 和 MCNP 蒙特卡罗程序对低能中子的输运过程进行模拟，跟踪核反应次级粒子或被俘获中子的计数，可以推算出中子探测效率。

根据文献[12]提供的掺⁶Li 闪烁体，其成分为 Li₂O, SiO₂ 和 ZnS 3 种物质，厚度为 3 mm，利用 MCNP 和 GEANT4 两种程序计算低能中子的探测效率，如图 6 所示。可以看出，GEANT4 与 MCNP 的中子探测效率吻合得非常好。

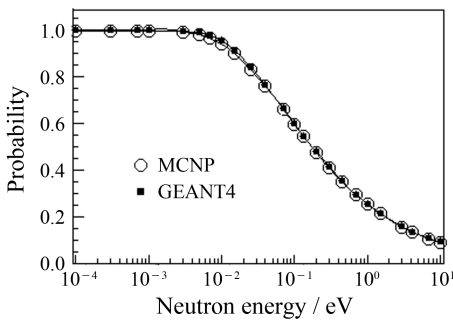


图 6 中子探测效率

利用国产 ST602 锂玻璃^[10]，在²⁵²Cf 热中子源（其热中子能量为 0.025 3 eV）上测试其热中子探测效率，如表 1 所示。表中也列出了采用 MCNP 和 GEANT4 两种程序模拟热中子的探测效率。表 1 第 3 列中的后 3 行为文献[13]所报道的掺⁶Li 不同闪烁体的热中子探测效率。从表中可以看到，实验值、GEANT4 模拟值和 MCNP 模拟值在 10% 的误差范围内是一致的。这也说明采用 GEANT4 模拟是合理的，可以进行低能中子输运的相关计算。

表 1 掺⁶Li 闪烁体的热中子探测效率

闪烁体	实验测量 (%)	文献[13] (%)	GEANT4 (%)	MCNP (%)
ST602(1 mm)	65.0	—	67.15	66.83
ST602(3 mm)	95.7	—	96.56	96.35
ZnS/ ⁶ LiF(2 : 1)	—	43.5	46.67	46.45
Y ₂ SiO ₅ : Ce ³⁺ / ⁶ LiF	—	37.1	41.23	40.97
Bicron(BC-704)	—	26.4	30.7	30.42

4 结论

通过 GEANT4 和 MCNP 两种程序在低能中子范围内的计算结果与实验结果的对比较验证，得出以下结论：（1）新版 GEANT4 程序克服了老版本 GEANT4 程序在⁶Li 与中子的核反应模拟时的错误；（2）在新版 GEANT4 中加入了最新公布的核反应截面，几个核反应道模拟显示，核反应的截面、次级粒子能量和反应的分支比等都是正确的；（3）多种不同的掺⁶Li 材料的热中子探测效率的 MCNP 模拟、GEANT4 模拟与实验结果的比较表明，GEANT4 和 MCNP 的模拟是正确的；（4）从上面的研究可以说明，利用 GEANT4 研究⁶Li(n, α)³H 是可行的，这为我们以后从模拟上研究闪烁体中子探测器的位置分辨率提供了有力支持。

参考文献 (References):

- [1] MAIRE M, WRIGHT D H, URBAN L, *et al.* GEANT4 Physics Reference Manual; Version GEANT4 8. 3. USA; SLAC, 2004.
- [2] BRIEMEISTER J F. A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C. LA-12625-M. Los Alamos; Los Alamos National Laboratory, NM, 2001.
- [3] FERRARI A, SALA P R, FASSO A, *et al.* FLUKA Manual; Program Version 2002. Milan: INFN, 2002.
- [4] NELSON W R, HIRAYAMA H, ROGERS D W O. The EGS4 Code System. Stanford: Stanford Linear Accelerator Center, Stanford University, 1985.
- [5] CHEN Hesheng, WEI Jie, XI Jiwei, *et al.* The Feasibility of CSNS Construction. Beijing: Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, 2009, 436—439 (in Chinese).
(陈和生, 韦杰, 奚基伟, 等. 散裂中子源可行性研究报告. 北京: 中国科学院高能物理研究所, 2009, 436—439.)
- [6] NAKAMURA T, KATAGIRI M, TOH K, *et al.* Nucl Instr & Meth A, 2009, **604**: 159.
- [7] CROW M L, HODGES J P, COOPER R G. Nucl Instr & Meth A, 2004, **529**: 288.
- [8] MASAKI K. Nucl Instr & Meth A, 2004, **529**: 254.
- [9] AGOSTINELLI S, ALLISON J, AMAKO K, *et al.* Nucl Instr & Meth A, 2003, **506**: 250.
- [10] MCGREGOR D S, HAMMIG M D, YANG Y H, *et al.* Nucl Instr & Meth A, 2003, **500**: 273.
- [11] JI Changsong. Handbook of Nuclear Radiation Detectors & Their Experiment Techniques. Beijing: Atomic Energy

Press, 1990, 327–330(in Chinese).

(汲长松. 核辐射探测器及其实验技术手册. 北京: 原子能出版社, 1990, 293–330.)

[12] ANDREW C S, SHENG Dai, STEVEN A W. Applied Radi-

ation and Isotopes, 2004, **61**: 375.

[13] KOJIMA T, KATAGIRI M, TSUTSUI N, *et al.* Nucl Instr & Meth A, 2004, **529**: 325.

Simulation of Low-energy Neutron Detection based on GEANT4

WU Chong^{1, 1)}, ZHANG Qiang¹, SUN Zhi-jia², TANG Bin², ZHOU Jian-rong², XU Hong²,
YANG Gui-an², WANG Yan-feng², WANG Tuo¹, YANG Zhen²

(1. College of Science, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Center of Experimental Physics, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The feasible study of Monte Carlo simulation of low-energy nuclear reaction was performed based on GEANT4. The reaction channel ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$, simulated insufficiently in the old version Geant4, can be given correct results in the new version (version 4.9.4). New cross section library was added into the program. The study of several nuclear reaction channels shows that the cross sections, the secondary particle energies and the branching ratios are consistent with the experimental values. For doped ${}^6\text{Li}$ materials, the comparison of thermal neutrons detection efficiencies of experimental results, MCNP and GEANT4 simulations, shows that the simulations are reasonable. From the studies above, it is feasible to simulate the ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$ reaction with GEANT4. It will provide helpful information for the further study of the position resolution of scintillation neutron detector.

Key words: nuclear reaction; detector; neutron detection; scintillator