

文章编号: 1007-4627(2013)02-0156-05

锂玻璃探测器中子探测效率的刻度

张奇玮, 贺国珠, 阮锡超, 李霞, 任杰, 周祖英

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要: 为了精确测量keV能区的中子俘获截面, 中国原子能科学研究院正在建造一台 4π 全吸收型 γ 探测装置—GTAF, 锂玻璃探测器将会作为中子束流监视器测量中子能谱。利用5SDH-2加速器刻度了锂玻璃探测器在两个入射中子单能点(250和565 keV)的探测效率, 并使用GEANT4和MCNP程序模拟计算了锂玻璃探测器的相对探测效率。通过归一化实验数据和模拟结果, 得到了锂玻璃探测器在10 keV~1 MeV能区的中子探测效率曲线。对于把锂玻璃探测器测量得到的飞行时间谱转化为中子束流能谱, 是一项非常重要的工作, 同时为探测器效率刻度提供了新方法。

关键词: γ 全吸收型探测装置; 锂玻璃探测器; 探测效率; GEANT4; MCNP

中图分类号: O242.1; O571.54 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.30.02.156

1 引言

中国原子能科学研究院已经建成了一套 4π 全吸收型 γ 探测装置(Gamma-ray Total Absorption Facility, 简称GTAF)^[1], 主要用于精确测量核反应理论、天体演化和元素合成等所需的keV能区的中子俘获截面。GTAF装置是由12个五棱锥台和28个六棱锥台形状的BaF₂晶体组成的内半径为10 cm和厚度为15 cm的探测器球壳^[2], 它对 γ 射线有很高的探测效率, 同时也有很好的时间分辨率和能量分辨率。GTAF装置通过测量瞬发级联 γ 射线来确定中子俘获事件。整体实验设计如图1所示。由加速器产生的脉冲化的质子束与⁶Li-T的混合靶发生反应, 产生中子束。中子束经过屏蔽体准直后进入探测器球壳, 与放置在球壳中心的待测样品发生(n, γ)反应生成复合核。复合核通过出射级联 γ 射线的方式退激。锂玻璃探测器放置在0度角中子束流末端, 用于中子束流的监视。把测量到的中子飞行时间(TOF)谱在转换成中子能谱时, 需要准确知道探测器的探测效率。因此刻度锂玻璃探测器在keV能区的中子探测效率对于整套GTAF实验装置是非常重要的。

目前, GEANT4和MCNP是两种广泛应用于核物

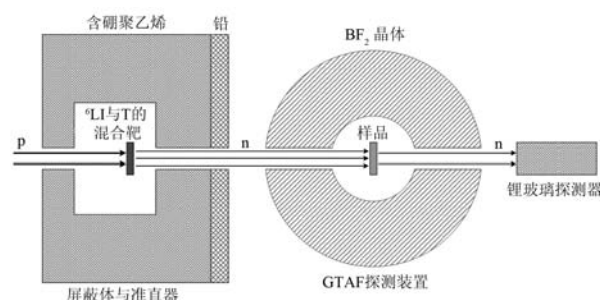


图1 中子俘获截面测量的实验示意图

理和高能物理研究领域的蒙特卡罗程序。GEANT4是CERN使用C++语言开发的一种利用蒙特卡罗方法模拟粒子与物质相互作用的开源程序包^[3-4], 它提供了不同的物理模型(包括电磁、强子和光学模型等), 这些模型在理论和实验数据的基础上, 描述了不同能量的粒子与物质的相互作用; MCNP是美国Los Alamos实验室研制的一种大型多功能的蒙特卡罗计算程序^[5], 可以处理复杂三维几何结构的粒子耦合运输问题, 它具有较强的通用性, 在放射源的确定和空间物质的几何分布上, 具有很大的灵活性。因此可以使用这两种程序模拟计算, 得到探测器的能谱响应、激发函数和探测效率等参数。

本工作利用加速器提供的两种能量的单能中

收稿日期: 2012-08-29; 修改日期: 2012-09-10

基金项目: 中国核工业集团公司预先研究基金(61601090405)

作者简介: 张奇玮(1982-), 男, 甘肃镇原人, 助理研究员, 硕士, 从事粒子物理与原子核物理研究; E-mail: zqwvictor@cica.ac.cn.

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

子(250 和 565 keV), 使用监视器归一法, 刻度锂玻璃探测器在这两个能量点上的中子探测效率。同时使用 GEANT4 和 MCNP 程序模拟 1 MeV 以下能区的中子探测效率曲线。通过实验与模拟结果的对比分析, 以实验数据为依据, 归一化模拟结果, 得到了锂玻璃探测器在 keV 能区的中子探测效率曲线。

2 锂玻璃探测器的效率刻度实验

2.1 锂玻璃探测器

锂玻璃的成分是 $\text{LiO}_2 \cdot 2\text{SiO}_2(\text{Ce})$, 是一种由 Ce 激活的闪烁体。它发射光谱的最强波长是 395.9 nm, 发光衰减时间短, 适合利用 TOF 方法的测量。同时相对 ^3He 和 ^{10}B 而言, ^6Li 与中子的核反应释放能量高, 在 keV 能区有合适的探测效率, 因此选择锂玻璃用于中子束流监视。

由于锂玻璃中重元素少, γ 射线与其作用的主要形式为康普顿散射, 其中与热中子峰等效的电子能量约为 1.6 MeV^[6], 相应的产生 1.6 MeV 康普顿电子的 γ 射线的能量约为 1.8 MeV, 因此通过脉冲幅度谱无法完全甄别 n 和 γ 。在 GTAF 装置的中子俘获截面测量实验中, 使用 TOF 方法就能从 TOF 谱中把 n 和 γ 区分开来。

锂玻璃探测器是将闪烁体 ($\phi 0.08 \text{ cm} \times 0.95 \text{ cm}$, 美国 Bicron 公司, 型号 GS20) 和光电倍增管(法国 PHOTONIS 公司, 型号 XP2020Q) 利用硅油耦合起来, 后端使用基座(美国 ORTEC 公司, 型号 269) 封装在铝壳内安装完成的。

2.2 实验测量方法

锂玻璃探测器效率刻度实验使用的锂靶是由 LiF 蒸镀在钽金属片上构成, 靶厚为 $50 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 。由中国原子能科学研究院计量站 5SDH-2 加速器提供脉冲化的质子束, 主频 4 MHz, 脉冲宽度 2 ns, 平均束流强度 $3 \mu\text{A}$ 。通过调节加速器的端电压, 改变入射质子束的能量, 利用 $^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}$ 的反应, 得到一系列单能的出射中子。本工作选取了两个单能中子点 ($E_n=250$ 和 565 keV) 进行测量。从 $^6\text{Li}(n, t)^4\text{He}$ 反应的激发曲线^[7]中可以看到, 在 $E_n=565 \text{ keV}$ 时, 锂玻璃的探测效率变化平缓, 对中子能散不敏感, 它的实验结果可以作为模拟曲线的归一化标准; 而 $E_n=250 \text{ keV}$ 是探测效率的峰值位置, 效率曲线随中子能量变化剧烈, 它的实验值可以作为探测效率曲线的验证。

在实验方案中把锂玻璃探测器放置在距离靶头 1 m 的位置进行测量, 使用挡影锥的方法扣除散射中子的本底, 再做一定的立体角修正和束流积分修正后, 利用已经过精确刻度的 BF_3 长中子管^[8] 的计数为归一标准, 得到锂玻璃探测器对该能量中子的探测效率。

2.3 电子学获取系统

图 2 给出了锂玻璃探测器探测效率刻度实验的电子学电路图。探测器的负高压是 2060 V。为了降低获取系统的死时间, 使用经过延迟的加速器脉冲信号提供中子 TOF 谱的 stop 信号。光电倍增管阳极引出的信号由 CFD 一分为二, 一部分提供 TOF 谱的 start 信号, 另一部分作为获取系统的门信号, 而从打拿极引出的信号经过放大器后进入获取系统得到脉冲高度 (PH) 谱, 整个获取系统是基于 CAMAC 总线的 PS7164。

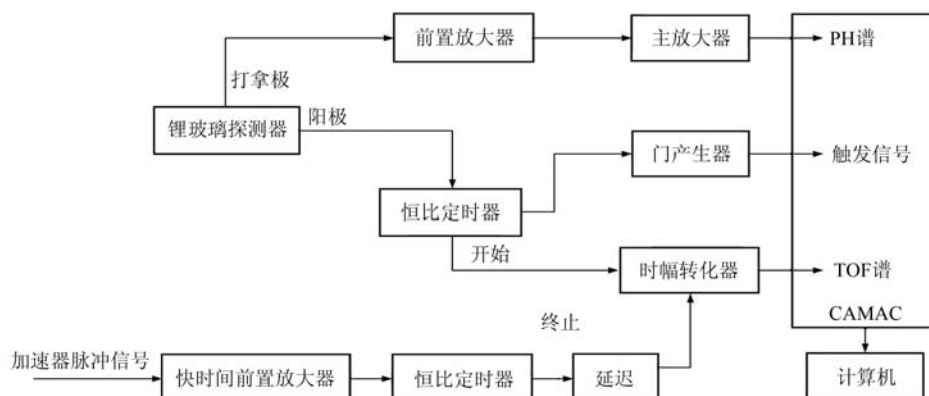


图 2 锂玻璃探测器的电子学系统框图

2.4 实验结果处理与分析

图 3(a) 中所示的是单能中子的 PH 谱，从左向右的第一个峰是电子学噪声和 γ 射线，它的主要来源是靶头产生的 γ 射线和中子打在周围材料上产生的 γ 射线，第二个峰是中子峰，除了单能中子的计数外，还有散射中子的贡献。这两个峰有一定的重叠，即使在通过挡影锥法扣除本底后，也很难从 PH 谱上把 n 和 γ 完全区分开来。

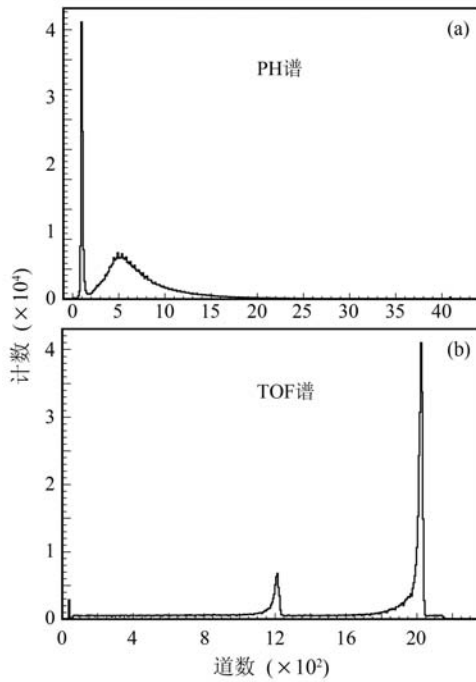


图 3 单能中子的PH谱和TOF谱

图 3(b) 所示是单能中子的 TOF 谱，由于使用探测器信号作为 TOF 谱的 start 信号，而延迟了的加速器脉冲信号提供 stop 信号，因此图中从左向右的第一个峰是中子峰，第二个峰是 γ 射线，可见 n 和 γ 能很容易地区别开来。同时每个峰的左右两半边都是不对称的，左边有拖尾的现象。从图 4 的二维谱中可以看到，拖尾集中在低能部分，这主要是由于散射的低能中子以及中子打在周围材料上产生的低能 γ 射线引起的。

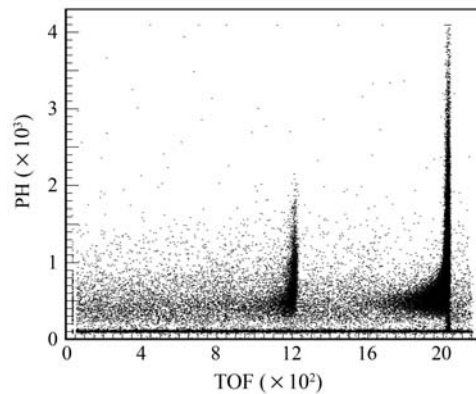


图 4 单能中子的二维谱

我们使用了两种方法来计算单能中子的计数：一是直接利用 TOF 谱(图3)，通过挡影锥法扣除本底，得到单能中子峰的计数；二是利用二维 (PH-TOF) 谱(见图 4)，设置开门阈值来扣除本底，从而得到单能中子的计数。从表 1 中可以看到，两种方法得到的探测效率的结果基本是一致的。

表 1 锂玻璃探测器的探测效率实验处理结果

E_n/keV	方法一		方法二	
	探测效率	不确定度 (%)	探测效率	不确定度 (%)
250	2.61×10^{-2}	1.43	2.60×10^{-2}	1.42
565	3.71×10^{-3}	1.21	3.89×10^{-3}	1.20

3 锂玻璃探测器效率的蒙特卡罗模拟

本工作使用的锂玻璃探测器尺寸是 $\phi 50.91 \text{ mm} \times 9.62 \text{ mm}$ 。在 10 keV~1 MeV 区间选取了 30 个入射中子能量点(包括两个实验能量点)，分别用 GEANT4 和 MCNP 程序进行模拟计算，得到锂玻璃探测器的探测效率曲线。GEANT4 程序版本是 4.9.1.P02，模拟的每个能量点的入射中子总数为 10^6 个；MCNP 程序采用的是 4C 版本，模拟的每个能量点的入射中子总数为 10^8 个。从图 5 中可以看到，两个程序的模拟结果

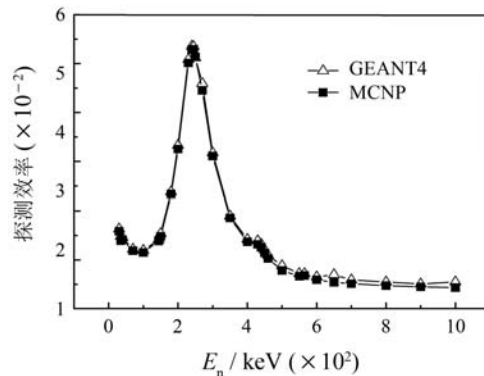


图 5 探测效率的模拟结果

是非常接近的, 差距在1%以内(可能是由于两个程序选取的物理模型不同), 变化趋势一致。

4 锂玻璃探测器的探测效率曲线

从图5的模拟结果中看到, 锂玻璃的探测效率在入射中子能量为250 keV附近时出现峰值, 而在高于500 keV的能区, 效率曲线的变化比较平缓, 这与 ${}^6\text{Li}(n, t){}^4\text{He}$ 反应的激发曲线形状类似。实验中, 加速器提供的单能中子存在一定程度的能散, 为避免这一因素的影响, 本文选取入射中子能量为565 keV的实验数据为标准, 对GEANT4的模拟结果进行归一化, 得到锂玻璃探测器的探测效率曲线。如图6所示, 在曲线峰值附近250 keV处, 探测效率随能量变化剧烈, 而此处的实验结果与模拟结果吻合得很好。

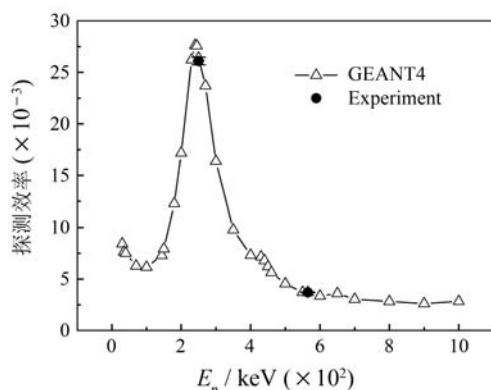


图6 锂玻璃探测器的探测效率曲线

5 结果与讨论

在GTAF装置的中子俘获截面测量实验中, 锂玻璃探测器将用于中子束流监视。其中, 中子源的能量范围是10 keV~1 MeV, 因此准确得到锂玻璃探测器在此能区内的中子探测效率曲线是开展实验的前提条件。实际上, 由于加速器束流时间以及实验条件的限制, 通过实验刻度锂玻璃探测器在每个能量点的探测效率是不可行的。因此, 本工作只选取了两个单能点刻度锂玻璃探测器的中子探测效率, 并通过TOF谱和二维谱的对比分析得出实验结果, 从很大程度上消除

了低能散射中子和 γ 射线的影响。同时使用两种常用的蒙特卡罗模拟程序GEANT4和MCNP程序, 分别模拟计算探测效率。最后把模拟结果归一化到中子能量为565 keV的实验数据上, 得到锂玻璃探测器的探测效率曲线, 另一能点(250 keV)的实验数据正好验证了探测效率曲线的可靠性。这种实验数据与模拟结果相结合的方法也可用于其他探测器探测效率的刻度。

实验刻度的两个能量点分别在高能区曲线变化较为平缓的位置以及峰值附近, 而在中子能量较低的区域并没有实验数据的验证。此处探测效率曲线的变化也较为剧烈, 因此我们希望未来在GTAF装置实验开始时, 重新在低能区域选取一个单能中子点刻度这个锂玻璃探测器, 以验证低能区的中子探测效率曲线。

参考文献(References):

- [1] ZHONG Qiping, ZHOU Zuying, TANG Hongqing, *et al.* Chinese Physics C, 2008, **32**(Suppl. 2): 102.
- [2] MA Xiaoyun, ZHONG Qiping, ZHOU Zuying, *et al.* Atomic Energy Science and Technology, 2009, **43**(2): 180.(in Chinese)
(马霄云, 仲启平, 周祖英, 等. 原子能科学技术, 2009, **43**(2): 180.)
- [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**(1): 270.
- [5] BRIESMEISTER J F. MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C, LA-13709-M, 2000.
- [6] JI Changsong, LI Xuezh. Nuclear Electronics & Detection Technology, 1983, **3**(3): 62.(in Chinese)
(汲长松, 李学智. 核电子学与探测技术, 1983, **3**(3): 62.)
- [7] SU Ming, ZHONG Qiping, ZHENG Yulai, *et al.* Atomic Energy Science and Technology, 2009, **43**(10): 946.(in Chinese)
(苏明, 仲启平, 郑玉来, 等. 原子能科学技术, 2009, **43**(10): 946.)
- [8] ZHANG Guohui, CHEN Jinxiang. Atomic Energy Science and Technology, 2007, **41**(1): 22.(in Chinese)
(张国辉, 陈金象. 原子能科学技术, 2007, **41**(1): 22.)

Calibration of Neutron Detection Efficiency of Li-glass Detector

ZHANG Qiwei¹⁾, HE Guozhu, RUAN Xichao, LI Xia, REN Jie, ZHOU Zuying

(*China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China*)

Abstract: In order to accurately measure the neutron capture cross section in the energy range of keV~MeV, 4π gamma-ray total absorption facility (GTAF) is being constructed at China Institute of Atomic Energy (CIAE). The lithium glass detector will be used as a neutron beam monitor for GTAF. The detection efficiency of the lithium glass detector at two incident neutron energy points (250, 565 keV) was calibrated in 5SDH-2 accelerator, and the relative detection efficiency was simulated by GEANT4 and MCNP code. By the normalization of the experimental data and simulation result, the neutron detection efficiency curve of the lithium glass detector between 10 keV and 1 MeV was obtained. This work will be important to convert the Time-of-flight spectrum that be measured by Li-glass detector to the energy spectrum of neutron beam, and provide the new method for calibration of detection efficiency.

Key words: gamma-ray total absorption facility; Li-glass detector; detection efficiency; GEANT4; MCNP

Received date: 29 Aug. 2012; **Revised date:** 10 Sep. 2012

Foundation item: Advance Research Fund of China National Nuclear Corporation (61601090405)

1) E-mail: zqwvictor@ciea.ac.cn

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