

文章编号: 1007-4627(2017)03-0586-05

BC501A 中子探测器的能量刻度及其在聚乙烯 中子学积分实验中的应用

罗飞^{1,2}, 韩瑞², 陈志强^{2,†}, 聂阳波³, 石福栋², 张苏雅拉吐⁴

(1. 中国科学技术大学核科学技术学院, 合肥 230026;

2. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

3. 中国原子能科学研究院, 北京 102413;

4. 内蒙古民族大学, 内蒙古 通辽 028000)

摘要: 利用标准放射伽玛源 (^{22}Na , ^{137}Cs) 测量了尺寸为 $\Phi 5.08\text{ cm} \times 2.54\text{ cm}$ 的 BC501A 中子探测器的脉冲幅度谱, 并利用 MCNP 软件进行了模拟, 详细考虑了探测器的几何尺寸、材料、以及能量分辨函数, 计算结果很好地再现了实验数据, 精确地确定了康普顿边缘的位置, 完成了 BC501A 中子探测器的能量刻度。并采用 14.8 MeV 的 $\text{T}(\text{d}, \text{n})^4\text{He}$ 中子源对聚乙烯样品开展了中子学积分实验, 结果表明, BC501A 中子探测器的能量刻度过程以及聚乙烯中子学积分实验数据的处理过程是完全合理并且可靠的。

关键词: MCNP 模拟; BC501A; 能量刻度; 中子探测器

中图分类号: O571.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.34.03.586

1 引言

随着核能科学技术的发展, 核数据的重要性不言而喻。加速器驱动次临界系统 (Accelerator Driven Subcritical System, ADS) 作为中国科学院“未来先进核裂变能”战略先导科技专项之一, 它的基本原理是以加速器产生的高能强流质子束轰击靶核 (如钨球颗粒靶) 产生散裂中子作为外源中子驱动和维持次临界反应堆运行^[1]。ADS 系统中的中子主要来源于两个方面, 一是散裂反应产生的散裂中子, 二是裂变反应产生的裂变中子, 靶区的散裂中子呈现出非常严重的空间各向异性, 同时 ADS 系统的次临界堆芯也不同于已有的反应堆, 其中子输运过程也必然存在差异, 所以 ADS 系统关键材料的中子核数据十分重要, 有必要对 ADS 关键材料进行中子学积分实验研究。

中子学积分实验就是测量中子在较大物质材料中输运过程的实验, 是以检验中子核数据与中子群常数为目标。用实验物质材料做成的实验样品的几何形状易于进行计算, 同时测量结果精确度、准确度都要达到一定的要求。ADS 系统关键材料的中子学积分实验是一系列实验^[2-5], 目前为止, 利用飞行时间法已经完成了对铀

靶、钨靶、镓靶和铍靶的泄露中子谱测量。聚乙烯样品作为中子学积分实验的标准样品, 在每次积分实验开始之前, 都要对其进行实验测量, 通过对比聚乙烯的实验结果与 MCNP 计算结果, 确保数据处理过程以及实验装置的可靠性。对于泄露中子谱的测量, 在有效中子探测阈值下的中子探测效率是实验中重要的物理量。中子探测器能量刻度的效果将直接影响到中子能谱测量的准确性, 因而中子探测器的能量刻度十分重要, 必须对中子探测器进行精确地能量刻度。

BC501A 型有机液体闪烁体探测器因具有好的时间响应、中子伽玛鉴别能力强而被广泛用于中子实验测量中。该探测器对探测粒子的能量响应严重依赖粒子的电离本领^[6-7]。实际工作中, 常用标准伽玛射线源进行电子能量刻度^[8-13]。利用标准伽马源进行能量刻度有多种方法^[8-13], 通常最普遍的做法是根据康普顿峰位或者峰位的50%来确定康普顿边缘的位置, 并以此进行刻度。但是, 在探测器实验测量时, 会受到多种因素的影响, 例如探测器的性能、实验条件、实验环境等等。所以用这种方法刻度很不准确, 必须寻找更方便、更准确的刻度方法, 而蒙特卡罗方法正好符合这样的要求。这种方法的核心是: 第一步, 根据探测器测量得到

收稿日期: 2016-12-08; 修改日期: 2017-03-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(91426301, 11605257); 中国科学院“西部之光”人才培养引进计划资助项目(Y725030XB0); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA03030200)

作者简介: 罗飞(1990-), 男, 重庆人, 博士研究生, 从事核科学与技术研究; E-mail: feiluo@mail.ustc.edu.cn.

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

的标准伽玛源的反冲电子谱的康普顿边缘, 初步确定一个能量刻度函数; 第二步, 利用蒙特卡罗程序 MCNP-4C^[14], 根据探测器的几何尺寸、材料配比、标准伽玛源的能量以及其它实验参数, 模拟得到探测器的反冲电子谱; 第三步, 比较实验谱和模拟谱康普顿边缘的位置, 并根据探测器的分辨率进行展宽, 拟合得到能量和道数的刻度系数, 从而实现能量刻度。本文主要分为五部分, 第一部分描述 BC501A 中子探测器能量刻度实验测量; 第二部分主要讲述利用蒙特卡罗软件 MCNP-4C 进行模拟; 第三部分是对中子探测器能量刻度的结果分析; 第四部分是利用 14.8 MeV 的 T(d, n)⁴He 中子源对聚乙烯样品开展中子学积分实验; 最后则是对本文的总结归纳。

2 BC501A 中子探测器能量刻度实验测量

BC501A 中子探测器用于在中子学积分实验中测量样品的泄露中子谱, 中子探测器的能量刻度效果直接影响到积分实验结果的准确性, 所以对中子探测器进行精确的能量刻度十分重要。在中国原子能科学研究院核数据国家重点实验室的积分实验装置大厅, 利用标准放射伽玛源测量 BC501A 中子探测器的脉冲幅度谱, 其电子学布局示意图如图 1 所示, 中子探测器前表面放置着标准放射源 ²²Na 或 ¹³⁷Cs。BC501A 中子探测器的尺寸是 Φ5.08 cm×2.54 cm, 密度是 0.874 g/cm²。探测器加上高压后, 光电倍增管的阳极信号, 经过前置放大器放大之后, 进入主放大器, 成型和放大之后再进入幅度数字转换器 (ADC) 中获取。光电倍增管的打拿极信号进入恒比定时甄别器和门展宽器, 并被送入幅度数字转换器作为门信号。在测量中同样考虑了本地的测量, 离线数据处理时, 实验谱扣除本底光输出谱后, 便得到干净的标准伽玛源的康普顿反冲电子光输出谱, 图 2 中显示的是 ²²Na 的实验谱、本底谱以及扣除本底之后得到的纯光输出谱。

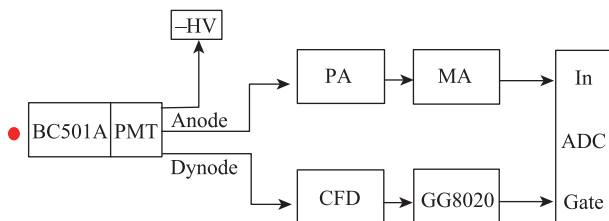


图 1 BC501A 中子探测器能量刻度实验电子学布局示意图

PA: (142B) 前置放大器, MA: (572) 主放大器, CFD: (935) 恒比定时甄别器, GG8020: 门展宽器, HV: 高压, ADC: 幅度数字转换器, ●: 标准放射源。

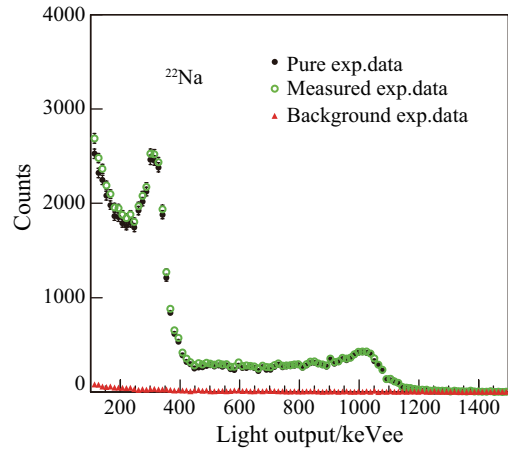


图 2 (在线彩图) ²²Na 的实验谱、本底谱与扣除本底之后的纯光输出谱

3 利用 MCNP 进行模拟计算

在能量刻度实验中, 利用蒙特卡罗程序 MCNP-4C 模拟计算了 BC501A 中子探测器对标准伽玛源的光输出响应。模拟中采用了与能量刻度实验相同的条件, 用 0.1 cm 厚的铝箔将闪烁体圆柱表面和前端表面屏蔽; 并用 0.1 cm 厚的玻璃紧贴着闪烁体的后段。BC501A 的材料是 H 和 C (比率是 1.212, 密度是 0.874 g/cm²), 直径是 5.08 cm, 厚度是 2.54 cm。模拟程序中, 详细地考虑了探测器的各种情况, 包括探测器的几何尺寸、材料配比、分辨率以及探测器内的过程。伽玛射线与探测器的材料相互作用后损失能量, 并利用公式 (1) 可以计算出相应的光输出^[6-7]。L 是光输出, E_e 是电子的能量, E₀ 是低能下非线性相关的一个参数, α 是光输出的放大参数, 本文中 α = 1, E₀ = 0。

$$L = \alpha(E_e - E_0) \tag{1}$$

为比较模拟与实验光输出谱, 需要对模拟谱进行高斯展宽, 其原理和方法如下: 光输出谱受到放射源及探测器几何尺寸、位置、壁效应、光电倍增管等多种因素的影响, 标准谱会有一些的展宽, 并用探测器的分辨函数来进行描述^[8-11]。探测器的分辨率可以通过公式 (2) 表述, 等式左边的是探测器的分辨率, L 是光输出, α 项表示闪烁光从闪烁体运输到 PMT 光阴极过程中的影响, 脉冲幅度谱的高能段主要受到它的影响; β 项表示闪烁光的产生和衰减, 以及光电转换和电子倍增等相关的统计行为引起的展宽; γ 项表示 PMT 暗电流以及放大器等电子学噪声相关的影响, 因为很小, 通常可以忽略。选择合适的 α、β、γ 参数可以计算出展宽后的脉冲幅度谱。

$$\frac{\Delta L}{L} = \sqrt{\alpha^2 + \frac{\beta^2}{L} + \frac{\gamma^2}{L^2}} \quad (2)$$

由光输出 L 和等效电子能量 E 之间的线性关系, 可以将光输出分辨函数表示为公式 (3), 在 MCNP 程序中, 由高斯函数推导, 能量分辨率可以用公式 (4) 表示^[14], 由此可知, a 、 b 、 c 三个参数和 α 、 β 、 γ 三个参数是相关的, 对于同样的实验数据, 同样的结果, 由公式 (3) 和公式 (4) 可以得到两套不同的参数。将模拟选取的参数 α 、 β 、 γ (如果是 a 、 b 、 c , 同样可以对应地转换成 α 、 β 、 γ) 代入公式 (2) 中, 便可以得到其展宽的能量分辨率。

$$\Delta E^2 = \alpha^2 E^2 + (\beta/\lambda)^2 E + (\gamma/\lambda)^2, \quad (3)$$

$$FWHM = \Delta E = a + b\sqrt{E + cE^2}. \quad (4)$$

4 能量刻度结果与讨论

标准放射源 ^{137}Cs 和 ^{22}Na 的模拟谱与实验谱如图 3 所示。通过比较实验测量的光输出谱和模拟结果, 对应康普顿边缘的位置, 得到实验道数与能量的刻度系数, 从而实现液体闪烁体探测器的能量刻度。 ^{137}Cs 标准放射伽玛源的能量为 662 keV, ^{22}Na 的能量为 511 和 1270 keV。由此可以分别计算出其康普顿边缘位置的能量, 如表 1 所列。表 1 中列出了几种标准伽马源的康普顿边缘 (E_c)、康普顿峰位 (E_{\max}) 及康普顿峰位一半 ($E_{1/2}$) 所对应的能量。由表 1 可知, 康普顿边缘位置的能量和其峰位一半所对应的能量并不相同, 因此传统地认为康普顿峰位半高处的位置即为康普顿边缘的位置是不准确的。为了验证模拟与实验的结果相符合, 模拟时考虑了探测器能量分辨率的影响。在本次模拟中 $a = -0.011$, $b = 0.10$, $c = 0.033$, 而与之关联的参数 $\alpha = 0.045$, $\beta = 0.09$, $\gamma = 0.001$, 将其代入公式 (2) 中, 由康普顿边缘位置的能量便可计算出其分辨率。从图上可以看出, 展宽的模拟结果在康普顿峰位附近很好地再现了实验结果。通过模拟与实验的对比, 得到了标准放射源的三个能量点刻度曲线, 如图 4 所示。它可以用公式 (5) 表示, 其中 $b_0 = 58.56 \pm 1.595$, $b_1 = 0.3 \pm 0.003$ 。

$$L(E_e) = b_0 + b_1 E_e. \quad (5)$$

表 1 标准伽玛源入射能量、康普顿边缘、康普顿峰位、康普顿峰位一半所对应的能量及其能量分辨率

Source	E_γ/MeV	E_c/MeV	E_{\max}/MeV	$E_{1/2}/\text{MeV}$	$\Delta L/L$
^{22}Na	0.511	0.341	0.315	0.365	16.1%
^{137}Cs	0.662	0.477	0.450	0.488	13.8%
^{22}Na	1.27	1.06	1.01	1.085	9.8%

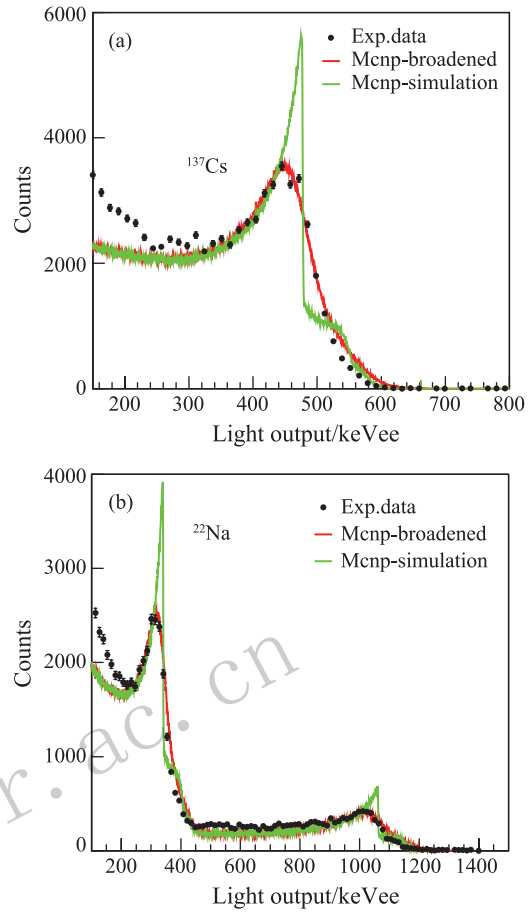


图 3 (在线彩图) 标准放射源 ^{137}Cs 和 ^{22}Na 的模拟结果与实验数据的比较
其中红色线表示展宽的模拟结果, 绿色线表示未展宽的模拟结果, 黑色圆点表示实验数据。

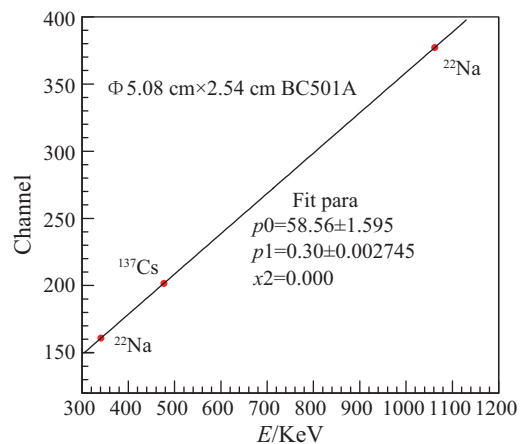


图 4 (在线彩图) BC501A 中子探测器能量刻度

5 聚乙烯样品的中子学积分实验

中国原子能科学研究院核数据国家重点实验室的积分实验装置布局及其基本参数详见文献[8-11]。在聚乙烯中子学积分实验中, 利用加速器产生的 14.8 MeV

的 $T(d, n)^4\text{He}$ 脉冲中子源轰击 $\Phi 13\text{ cm} \times 6\text{ cm}$ 的圆柱形聚乙烯样品, 测量其 60° 方向的中子飞行时间谱。BC501A 型探测器用于测量中子计数, 得到了很好的实验结果。在实验数据处理过程中, 首先进行中子和伽玛鉴别, 根据刻度函数, 选取合适的阈值, 将中子和伽玛进行区分, 得到实验测量的中子飞行时间谱。图 5 给出了 BC501A 中子探测器的脉冲形状甄别谱 (PSD) 与脉冲高度谱 (PH) 的二维关联图。探测器阈值选取为 ^{137}Cs 康普顿边缘位置的 0.4 倍 (0.4 Cs), 从图中可以看出, 中子事件和伽玛事件能够很好地鉴别, 由此可以将有效中子事件选出, 得到精确的中子飞行时间谱。对于给定的阈值, 可以用 NEFF 程序^[15] 计算出该阈值下的探测效率, 结果如图 6 所示。得到该阈值下探测器的探测效率后, 利用 MCNP-4C 蒙特卡罗模拟程序输入 ENDF/B-VII.1^[16]、CENDL-3.1^[17] 和 JENDL-4.0^[18] 数据库进行理论计算, 得到的结果与实验谱进行比较。图 7 中给出了 0.4 Cs 阈值下的实验中子飞行时间

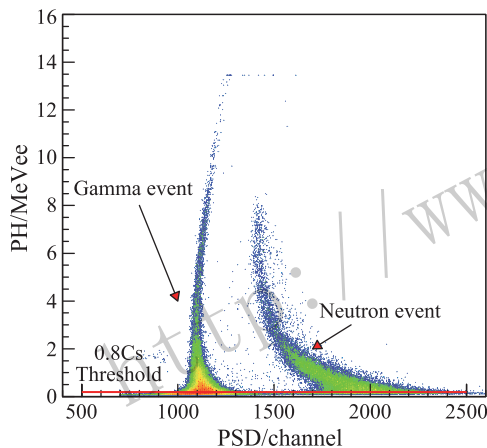


图 5 (在线彩图) BC501A 中子探测器的 PSD 与 PH 的二维关联图

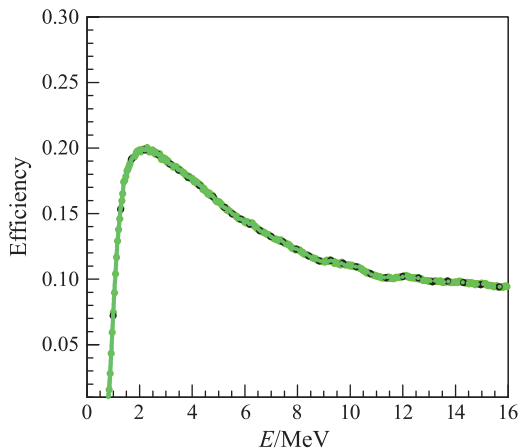


图 6 (在线彩图) 由 NEFF 计算出的 0.19 MeVee (0.4Cs) 阈值下的探测效率

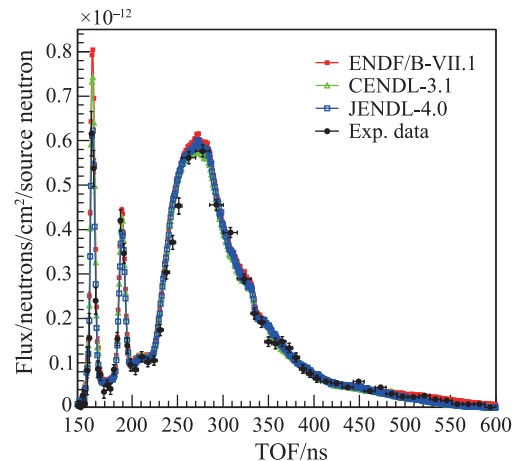


图 7 (在线彩图) 14.8 MeV 中子与聚乙烯样品 ($\Phi 13\text{ cm} \times 6\text{ cm}$) 相互作用以后在 60° 方向泄漏的中子飞行时间谱

谱与模拟谱的比较。由图可知, 模拟飞行时间谱很好地再现了实验结果, 各个数据库和实验数据都符合得很好, 这表明 BC501A 型探测器的能量刻度方法是准确可靠的, 同时也证明了积分实验装置及其数据处理过程是合理可靠的。

6 总结

本文采用标准放射伽玛源 (^{22}Na , ^{137}Cs) 测量了 BC501A 中子探测器的脉冲幅度谱, 利用蒙特卡罗模拟程序 MANP-4C 计算了不同标准伽玛放射源对探测器的响应函数, 考虑了探测器的几何尺寸、材料以及能量分辨函数, 计算结果与实验数据符合得很好, 精确地确定了康普顿边缘的位置, 拟合得到能量与道数的刻度系数, 完成了对 BC501A 中子探测器的能量刻度。利用中国原子能科学研究所的积分实验装置开展了对聚乙烯样品的中子学积分实验, BC501A 中子探测器用于测量 14.8 MeV $T(d, n)^4\text{He}$ 中子作用于聚乙烯样品上的中子飞行时间谱。在积分实验中详细介绍了实验数据的处理过程, 这主要包括探测器探测效率模拟、中子伽玛鉴别以及选取合适的阈值等等。积分实验数据与通过蒙特卡罗模拟程序 MCNP-4C 得到的模拟中子飞行时间谱进行了比较, 比较发现, 不同数据库的模拟中子飞行时间谱都很好地再现了实验数据, 这有力地证明了探测器能量刻度函数的准确性, 同时, 也表明积分实验装置及其数据处理的方法是准确可靠的。

参考文献:

- [1] ZHAN Wenlong, XU Hushan. Journal of Chinese Academy of Sciences, 2012, **27**(3): 375. (in Chinese)

- (詹文龙, 徐珊珊. 中国科学院院刊, 2012, **27**(3): 375.)
- [2] NIE Yangbo, BAO Jie, RUAN Xichao, *et al.* Annals of Nuclear Energy, 2010, **37**: 1456.
- [3] ZHANG S, CHEN Z, NIE Y, *et al.* Fusion Engineering and Design, 2015, **92**: 41.
- [4] HAN R, WAD A, CHEN Z, *et al.* Nuclear Physics A, 2015, **936**: 17.
- [5] NIE Y, REN J, RUAN X, *et al.* Fusion Engineering and Design, 2016, **105** (2016): 8.
- [6] BIRKS J B. The Theory and Particle of Scintillation Counting [M]. London: Pergamon Press, 1964.
- [7] SMITH D L, POLK R G, MILLER T G. Nucl Instr Meth, 1968, **64**: 157.
- [8] CHEN J X, SHI Z M, TANG G Y. Nuclear Electronics and Detection Technology, 1994, **14**: 140.
- [9] YAN J, LIU R, LI C, *et al.* Chinese Physics C, 2010, **34**(7): 993.
- [10] DIETZE G. IEEE Trans Nucl Sci, 1979, NS-26: 398.
- [11] DIETZE G. Nucl Instr Meth, 1982, **193**: 549.
- [12] YAN Jie, LIU Rong, LI Cheng, *et al.* Chin Phys C(HEP & NP), 2010, **34**(7): 993.
- [13] WU Jian, XU Tong, LI Chen, *et al.* High Energy Physics and Nuclear Physics, 1998, **22**(6): 481. (in Chinese) (伍健, 许彤, 李澄, 等. 高能物理与核物理, 1998, **22**(6): 481.)
- [14] BRIESMEISTER J(Ed). MCNP – a General Monte Carlo N-Particle Transport Code System, Version 4C, Report LA-13709-M, 2000.
- [15] DIETZE G, KLEIN H. NRESP4 and NEFF4 Monte Carlo Code for the Calculation of Neutron Response Functions and Detection Efficiencies for NE213 Scintillation Detectors. PTB-ND-22, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, Germany, 1982.
- [16] CHADWICK B, HERMAN M, OBLOZINSKY P, *et al.* Nucl Data Sheets, 2011, **112**: 2887.
- [17] GE Z G, ZHAO Z X, XIA H H, *et al.* J Korean Phys Soc, 2011, **59**: 1052.
- [18] SHIBATA K, IWAMOTO O, NAKAGAWA T, *et al.* J Nucl Sci Technol, 2011, **48**: 1.

Electron Energy Calibration of BC501A Neutron Detector and Its Application in the polythene Neutronics Integral Experiment

LUO Fei^{1,2}, HAN Rui², CHEN Zhiqiang^{2,†}, NIE Yangbo³, SHI Fudong², ZHANG Suyalatu⁴

(1. School of Nuclear Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

3. Science and Technology on Nuclear Data Laboratory, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;

4. Inner Mongolia University for the Nationalities, Tongliao 028000, Inner Mongolia, China)

Abstract: The pulse-height spectra of the BC501A scintillator ($\Phi 5.08 \text{ cm} \times 2.54 \text{ cm}$) were measured using ^{22}Na , ^{137}Cs γ -ray source, in which MCNP simulation was applied. The simulated pulse-height spectra show a good agreement with the measured data considering the geometry, material and energy resolution function of the scintillator. The position of the Compton edge has been precisely determined and an accurate energy calibration of BC501A scintillator was also achieved. An neutronics integral experiment of polythene with 14.8 MeV T(d, n)⁴He neutron source was carried out. The results indicate that the procedures of the energy calibration experiment of BC501A scintillator and the data analyzing in the polythene integral experiment are reasonable and reliable.

Key words: MCNP simulation; BC501A; energy calibration; liquid scintillator

Received date: 8 Dec. 2016; **Revised date:** 31 Mar. 2017

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (91426301, 11605257); CAS “Light of West China” Program (Y725030XB0); Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (XDA03030200)

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