

文章编号: 1007-4627(2013)01-0052-06

NE 213 闪烁体探测器中子探测效率模拟

席印印¹, 宋玉收¹, 陈志强², 杨昆^{2,3}, 张苏雅拉吐^{2,3}, 刘星泉^{2,3}

(1. 哈尔滨工程大学核科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150000;

2. 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 应用 FLUKA 软件包对 NE213 液体闪烁体中子探测器的探测效率进行了蒙特卡罗模拟, 通过 Birks 公式将中子产生的次级粒子的能量沉积转化为相应的光输出。根据不同探测阈值对模拟得到的光输出进行积分处理, 计算出给定能量下探测器的中子探测效率。将模拟得到的闪烁体光输出、中心探测效率和平均探测效率随中子入射到探测器前表面位置的变化与实验数据进行比较, 结果显示, FLUKA 模拟结果与实验值符合得很好, 这为中子探测器的设计提供了可靠保证。

关键词: FLUKA; NE213 闪烁体探测器; 探测效率; 光输出

中图分类号: O571.53 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.30.01.052

1 引言

加速器驱动次临界系统(ADS)被核科学界认为是核裂变能可持续发展所值得探索的新技术之一, 已成为世界各国研究的热点。其基本原理是利用中高能质子束轰击重靶, 将产生的高能中子作为中子源来驱动次临界反应堆内裂变材料的持续链式反应, 获得核能, 并同时可将长寿命高放射性废料转变成非放射性或低放射性或短寿命物质^[1-2]。精确地掌握散裂反应产生的中子能量、中子空间分布和中子输运等是研究 ADS 所面临的至关重要的问题。

目前, 在快中子探测方面最广泛使用的一种探测器是 NE213 (BC501A) 有机液体闪烁体中子探测器^[3]。NE213 闪烁体拥有极好的 n- γ 甄别性能、快的时间响应和高的探测效率, 从而被广泛地应用于中子的测量。为了应用 NE213 闪烁体对 ADS 系统中产生的中子源进行精确测量, 有必要对 NE213 闪烁体探测器的性能进行详细模拟与测试。

本文主要利用 FLUKA^[4] 的逐个事件追踪特性

对 NE213 闪烁体进行模拟。FLUKA 是欧洲核子研究中心(CERN)和意大利国家核物理研究院(INFN)联合开发的, 用于计算粒子输运和粒子与物质相互作用的蒙特卡罗模拟工具。FLUKA 可以精确地模拟中子与 NE213 闪烁体的相互作用过程, 并可获得次级粒子的能量沉积等信息。本文通过对模拟获得的能量沉积信息进行统计计算处理, 提取并计算出 NE213 液体闪烁体的光输出和探测效率, 采用数据分析软件 ROOT^[5] 编写程序, 对比 FLUKA 模拟结果与实验数据, 为中子探测器的设计提供了可靠保证。

2 FLUKA 模拟

中子探测器的固有效率依赖于中子能量和光输出的探测阈值大小^[6]。应用 FLUKA 模拟时主要考虑电磁相互作用和闪烁光传输。为检验 FLUKA 模拟 NE213 闪烁体光输出的可靠性, 我们根据文献[7-8]中给出的实验参数进行模拟, 并将模拟结果与实验值进行对比, 本文第3部分将对其进行详细阐述。模

收稿日期: 2012-05-16 修改日期: 2012-05-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11075189); 中国科学院百人计划资助项目(O910020BRO, Y010110BRO); 中国科学院战略性先导科技专项“未来先进核裂变能—ADS嬗变系统”课题302(XDA03030200); 中央高校基本科研业务费专项资金(HEUCF101501); 哈尔滨工程大学基础研究基金资助项目(002150260713)

作者简介: 席印印(1987-), 女, 黑龙江绥化人, 硕士研究生, 从事辐射探测及应用研究; E-mail: xiyinyin@hrbeu.edu.cn

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

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

拟 NE213 液体闪烁体探测效率时, 为了验证模拟结果的准确性, 模拟参数根据实验情况而设定, 如图 1 所示。探测器为半径 8 cm 和长 20 cm 的圆柱体 NE213 闪烁体, 闪烁体的侧表面用 2 cm 厚的铝包裹进行屏蔽。单能点源和闪烁体前表面之间的距离为 84 cm, 源中心点位于探测器的中轴线上。在源和闪烁体外部用 20 cm 厚的混凝土墙壁将其与外部区域隔离, 尽可能地使模拟环境与实验环境相符。模拟参数根据表 1 列出

的 NE213 闪烁体物理特性而设定。

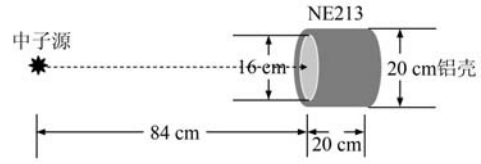
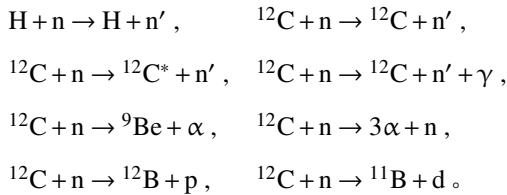


图 1 FLUKA 模拟示意图
源与探测器被放置在 20 cm 厚的混凝土墙围成的真空中。

表 1 NE213 液体闪烁体物理特性 (数据取自文献 [9])

密度	折射率	光输出 (相对苾,%)	衰减常数	最大发射波长	H/C 原子比
0.874/(g/cm ³)	1.508	78	3.7 ns	425 nm	1.213

从表 1 可以看出, NE213 液体闪烁体由 H 和 C 组成, 中子在探测器中与 NE213 闪烁体的相互作用即是中子与 C 和 H 的相互作用。FLUKA 模拟中, 应尽可能完整地描述出各反应道, 并准确地测得各反应道产生的光输出, 主要有如下反应道^[10]:



在 FLUKA 程序中可以应用 OPT-PROP 这个卡片来定义特殊材料的光学特性, 同时结合用户自定义程序对光学特性进行详细描述, 从而实现对可见光传输问题的处理。但是由于采用用户自定义程序时用户需编写相关的程序来实现, 例如 FRGHNS, ABSCFF 和 RFRNDX 等, 因此我们采用能量沉积转化公式获得光输出, 即利用公式将模拟得到的粒子能量沉积转化为相应的光响应, 应用这种方法可使模拟精准而简便。粒子能量沉积的获得由 FLUKA 的“EVENTBIN”卡记录一个单元结构内的能量来实现。此卡片在每一个初始事件运行之后均输出一个对应的模拟结果, 根据统计计算则可获得全部沉积能量的光输出, 从而利用光输出积分值和阈值得到相应的探测效率。

3 结果及分析

3.1 光输出

在有机闪烁体中, 闪烁体探测器对于入射电子的光响应与电子能量成线性关系 (在能量高于 100 keV

的情况下^[11]), 而对于中子产生的次级重带电粒子, 探测器的光响应与重带电粒子能量成非线性关系, 因此通常以等效电子能量 (MeVee) 作为光输出单位 (1 MeVee 表示 1 MeV 电子在闪烁体中沉积所有能量产生的光输出)。假设一个停止在闪烁体中能量为 E 的电子产生的光强度为 $L(E)$, 则 $L(E)$ 可表示为

$$L(E) = \alpha(E - E_0), \quad (1)$$

式中: α 是一个常数; E_0 是一个很小的能量补偿参数。

闪烁体中快中子产生的光密度依赖于中子能量转移的大小, 即依赖于中子与闪烁体原子核的碰撞^[12]。在有机闪烁体中, 带电粒子转移给分子的激发能仅仅有一小部分被转化为荧光能, 剩余激发能主要用于产生内部猝熄效应和自吸收效应或由受激发分子将激发能转移给邻近分子^[13]。为了公式化光输出与粒子能量沉积的关系, Birks 在 1951 年假设猝熄效应发生在高密度电离和比荧光时间短很多的分子初激发时刻, 从而提出如下关系式^[14]:

$$\frac{dL}{dx} = S \left(\frac{dE}{dx} \right) \left[1 + KB \left(\frac{dE}{dx} \right) \right]^{-1}, \quad (2)$$

式中: dL/dx 是单位路径长度出射的荧光能量; S 是闪烁效率; dE/dx 是给定带电粒子的比能损。随后 Chou 对 Birks 公式中荧光出射和带电粒子的能损进行了相应的修正, 其数学表达式为^[14]

$$\frac{dL}{dx} = S \left(\frac{dE}{dx} \right) \left[1 + KB \left(\frac{dE}{dx} \right) + C \left(\frac{dE}{dx} \right)^2 \right]^{-1}, \quad (3)$$

应用 Birks 和 Chou 公式拟合一些实验结果^[15-16], 得出的较好拟合参数列于表 2, ν 是自由度个数。

本文介绍的主要工作是研究 FLUKA 模拟 ADS 系统中用于中子探测的 NE213 闪烁体探测器性能的可靠性, 因此主要针对高能中子进行模拟研究。在模

拟中能量转化参数根据表 2 列出的拟合参数进行设置。图 2 给出了入射能量 E_n 分别为 25, 30, 65, 200, 400, 625 和 800 MeV 的中子在 BC501A (与 NE213 物理特性相同, 由 Bicron 公司生产) 中产生的光输出谱。其中 25, 30 和 65 MeV 的中子在闪烁体中产生的光输

表 2 用最小二乘法与实验数据符合得到的最佳参数 (数据取自文献 [14])

粒子	能量/MeV	KB_1 / [g/(cm ² ·MeV)]	KB_2 / [g/(cm ² ·MeV)]	C / [g ² /(cm ⁴ ·MeV ²)]	χ_1^2	χ_2^2	ν	文献
p	10~56	91×10^{-4}	87×10^{-4}	5×10^{-6}	3.03	3.01	13	
p	0.24~15	125×10^{-4}	73.5×10^{-4}	14.5×10^{-6}	67.8	28.9	19	[16]
p	0.24~1.5	100×10^{-4}						[15]
d	26~42	69×10^{-4}	69×10^{-4}	2×10^{-7}	38×10^{-3}	37×10^{-3}	2	
t	20~36	70×10^{-4}	40×10^{-4}	28×10^{-6}	28×10^{-2}	34×10^{-4}	2	
α	30~46	51×10^{-4}	46×10^{-4}	14×10^{-7}	39×10^{-2}	18×10^{-2}	3	

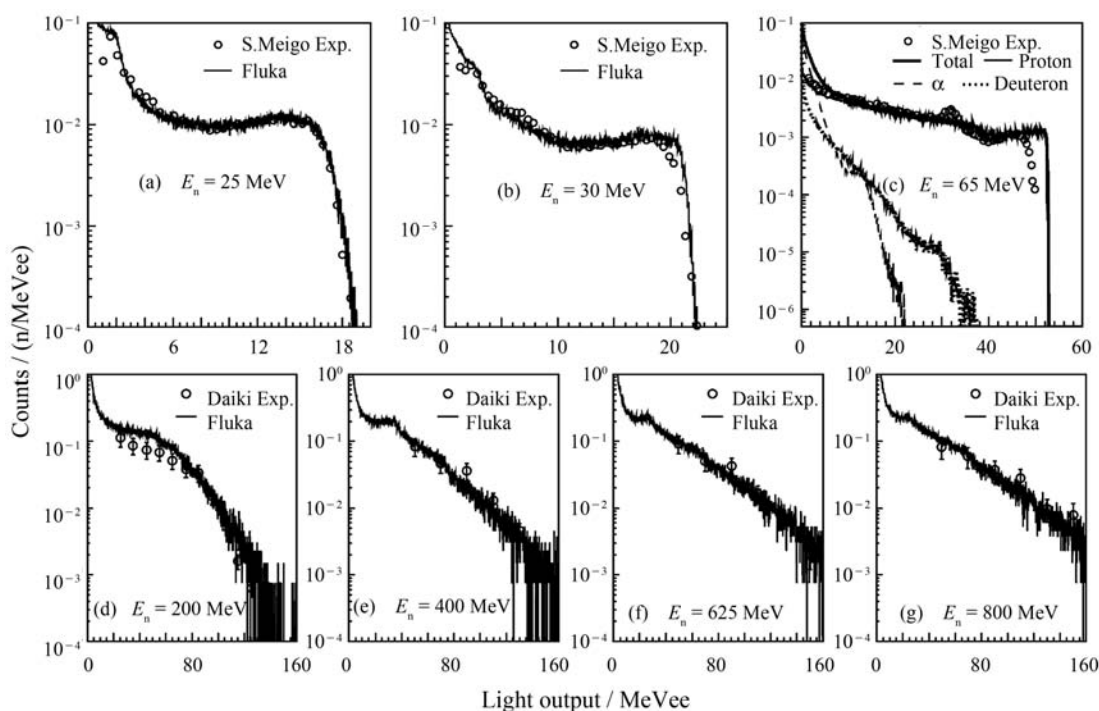


图 2 NE213 光输出

实线表示用 FLUKA 模拟结果, 空心圆表示实验数据, MeVee 是等效电子能量; 图 (c) 中粗实线表示次级粒子质子、 α 和氘产生的光输出之和, 细实线、短虚线和点线分别表示质子、 α 和氘产生的光输出曲线。

出实验数据截取自参考文献 [7], 200, 400, 625 和 800 MeV 的中子在闪烁体中产生的光输出实验数据截取自参考文献 [8]。通过 FLUKA 模拟结果与截取自文献 [7-8] 的实验数据比较可以看出, 在只考虑质子和 α 粒子光输出的情况下, 模拟结果仍与实验值符合得很好, 这说明其它次级粒子的光输出对总光输出的贡献

很小, 且一般低于阈值要求。因此, 在计算所感兴趣的能量范围内的中子探测效率时可以只考虑质子和 α 粒子的贡献。对于 65 MeV 的入射中子, 实验值在 32 MeVee 处有一个小峰, 根据参考文献 [7] 可知, 此峰来自于 $C(n, xd)$ 反应道的贡献, 模拟中我们将此反应道考虑进去得到图 2(c)。从图中可以发现, 当光输

出小于 12 MeVee 时, α 粒子对总光输出(质子、 α 和氦产生的光输出之和)的贡献很大, 氦产生的光输出曲线在 32 MeVee 处存在一个小峰, 但其计数相对于总光输出很小, 模拟结果不如实验值明显。另外, 对于 65 MeV 的入射中子, 光输出最大值略大于实验值, 这是由于模拟中没有考虑光衰减。总之, FLUKA 模拟结果与实验值符合较好, 可以应用 FLUKA 模拟计算闪烁体探测器探测效率。

3.2 探测效率

对于某一给定能量 E_n 的单色中子的探测效率可定义为^[17]

$$\varepsilon = \frac{\int_{E_{th}}^{E_{max}} R(E, E_n) dE}{\Phi}, \quad (4)$$

式中: Φ 为入射中子的计数; $R(E, E_n)$ 是探测器的相对光响应函数; E_{th} 是探测阈值; E_{max} 是探测器光输出的最大能量。由此可见, 闪烁体探测器对于给定能量的单色中子的探测效率依赖于探测阈值和光输出。现有研究数据显示, 光输出对于闪烁体直径、闪烁体寿命和闪烁体单元封装类型没有任何依赖性, 会轻微地依赖于闪烁体的厚度^[18]。因此本研究中, FLUKA 主要针对厚度为 20 cm 的 NE213 闪烁体进行模拟, 以便与来自其他文献的实验数据进行对比。

本文应用 FLUKA 分别模拟计算出了 NE213 探测器对能量从 1 MeV 到 100 MeV 的单能中子入射到探

测器前表面中心处的探测效率(本文中简称为中心探测效率)。模拟中, 通过编写用户自定义程序, 使得中子源均随机地投射到探测器前表面半径为 2 cm 的圆内, 根据测得的响应函数的积分值分别求得各能量点的中心探测效率。计算中分别采用 0.3, 0.49 和 1.0 MeVee 作为光输出阈值, 观察阈值对探测器探测效率的影响并将模拟结果与实验值^[6,19-20] 进行比较, 模拟与实验值的对比展示在图 3 中。从图 3 中可以看出,

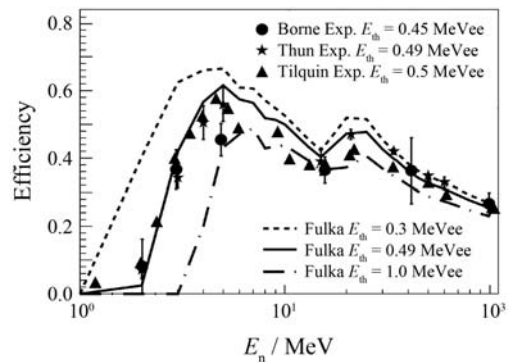


图 3 NE213 中心探测效率

来自于 3 个不同实验的数据用符号标记, 实线、短虚线和长虚线分别表示光输出阈值为 0.49, 0.3 和 1.0 MeVee 的 FLUKA 模拟结果。

FLUKA 模拟结果与实验值符合很好, 并且实验阈值是探测器探测效率的决定性因素之一。同型号同种类探测器对于某一特定能量中子的探测效率随着探测阈值的增大而减小。

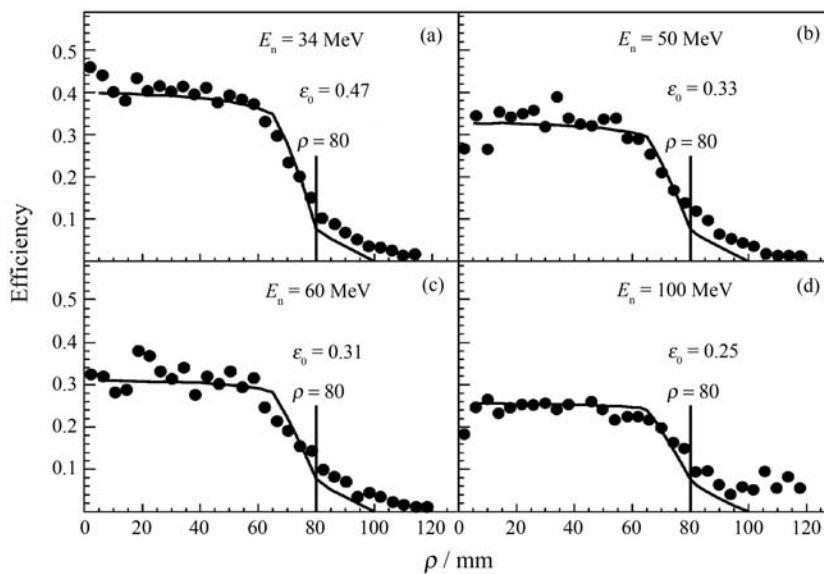


图 4 NE213 探测效率作为探测器前表面半径函数随半径变化图

实线表示 FLUKA 模拟结果值, 圆点表示实验数据。在 80 mm 处有一垂直于 x 坐标轴的线段, 表示此处为探测器半径边缘。

模拟中, 通过调整 FLUKA 中入射粒子源卡片参数值, 使得中子均匀入射到探测器前表面的某一半径为 ρ ($2 \leq \rho \leq 100$ mm) 的圆环上。对于每一能量中子, 每隔 5 mm 半径测得一个平均探测效率值。在模拟中, 为避免编写用户自定义程序产生多余复杂工作, 根据等效性, 以中子打在环上的某一点值来代替均匀打在整个环上的效率值。模拟的探测器前表面半径变化范围从 5 mm 到 100 mm。得到 4 个不同能量中子的平均探测效率随投射半径 ρ 的变化结果展示在图 4 中, 将 FLUKA 模拟结果与取自文献 [20] 的实验结果进行对比。由图可见, 当中子入射到探测器前表面某一点 ($0 \leq \rho \leq 80$ mm) 时, FLUKA 模拟结果与实验值符合得很好, 当中子入射到探测器外部 ($80 \text{ mm} \leq \rho$) 时, FLUKA 模拟结果略低于实验值, 这可能是由 FLUKA 模拟中探测器外部环境设置与实验环境的差异造成的。结合以上模拟结果可推知, FLUKA 能够精确地模拟闪烁体探测器的一些特性。

4 结论

本文应用 FLUKA 分别模拟了能量为 25, 30 和 65 MeV 的中子在闪烁体探测器中的光输出, 模拟结果与实验值均符合得很好, 除了 65 MeV 中子的光输出谱中 FLUKA 结果缺失一个 $C(n, xd)$ 反应道光输出峰。峰的缺失可能是由于 FLUKA 程序没有将此反应道考虑进去的缘故, 应对 FLUKA 模拟程序中理论模型进行升级, 以便于 FLUKA 能更好地精确仿真微观物理反应过程。本文还应用 FLUKA 模拟了 NE213 探测器对能量从 1 MeV 到 100 MeV 的中子的中心探测效率, 以及其中 4 种能量中子的平均探测效率随入射到探测器前表面半径的变化关系, 并与实验值进行比较, FLUKA 模拟结果与实验值都符合得很好。通过本论文的研究, 验证了 FLUKA 应用于闪烁体探测器研究中的可靠性, 为以后闪烁体探测器结构设计方面的应用提供了依据。

参考文献 (References):

- [1] SAITO S, TSUJIMOTO K, KIKUCHI K, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2006, **562**: 646.
- [2] BIARROTTE J L, BOUSSON S, JUNQUERA T, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2006, **562**: 656.
- [3] PATRONIS N, KOKKORIS M, GIANTSOU DI D, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2007, **578**: 351.
- [4] BALLARINI F, BATTISTONI G, BRUGGER M, *et al.* Adv Space Res, 2007, **40**: 1339.
- [5] ROOT User's Guide [EB/OL]. [2011-08-20]. <http://root.cern.ch/root/doc/RootDoc.html>.
- [6] TILQUIN I, EL MASRI Y, PARLOG M, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 1995, **365**: 446.
- [7] MEIGO S. Nucl Instr and Meth A, 1997, **401**: 365.
- [8] SATOH D, SATO T, ENDO A, *et al.* J Nucl Sci Technol, 2006, **43**: 714.
- [9] KARLSSON M. Absolute Efficiency Calibration of a NE-213 Liquid Scintillator Using a ^{252}Cf Source [D]. Lund: Lund University Sweden, 1997: 17.
- [10] KOVALTCHOUK V, MACHRAFI R, Ann Nucl Energy, 2011, **38**: 788.
- [11] FLYNN K F, GLENDENIN L E, STEINBERG E P, *et al.* Nucl Instr and Meth, 1964, **27**: 13.
- [12] ENQVIST A, PÁZSIT I. Nucl Instr and Meth A, 2010, **618**: 266.
- [13] BIRKS J B. The Theory and Practice of Scintillation Counting [M]. New York: Macmillan, 1964: 50–100.
- [14] MOUATASSIM S, COSTA G J, GUILLAUME G, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 1995, **359**: 530.
- [15] BATCHELOR R, GILBOY W B, PARKER J B, *et al.* Nucl Instr and Meth, 1961, **13**: 70.
- [16] CRAUN R L, SMITH D L. Nucl Instr and Meth, 1970, **80**: 239.
- [17] CHEN Zhiqiang, YE Yanlin, WANG Jinchuan, *et al.* High Energy Physics and Nuclear Physics, 2005, **29**(1): 72(in Chinese). (陈志强, 叶沿林, 王金川, 等. 高能物理与核物理, 2005, **29**(1): 72.)
- [18] HAWKES N P, ADAMS J M, BOND D S, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2002, **476**: 190.
- [19] BORNE F, CRESPIAN S, LERAY S, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 1997, **385**: 339.
- [20] THUN J, BLOMGREN J, ELMGREN K, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2002, **478**: 559.

Monte Carlo Simulation of Neutron Detection Efficiency for NE213 Scintillation Detector

XI Yin-yin¹, SONG Yu-shou¹, CHEN Zhi-qiang², YANG Kun^{2, 3}, ZHANGSU Ya-la-tu^{2, 3}, LIU Xing-quan^{2, 3}

(1. *College of Nuclear Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150000, China;*

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

3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: A NE213 liquid scintillation neutron detector was simulated by using the FLUKA code. The light output of the detector was obtained by transforming the secondary particles energy deposition using Birks formula. According to the measurement threshold, detection efficiencies can be calculated by integrating the light output. The light output, central efficiency and the average efficiency as a function of the front surface radius of the detector, were simulated and the results agreed well with experimental results.

Key words: FLUKA; NE213 scintillation detector; detection efficiency; light output

Received date: 16 May 2012; **Revised date:** 19 May 2012

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(11075189); Hundred Talent Program of Chinese Academy of Sciences(O910020BRO, Y010110BRO); Strategic Pilot Scientific Technological Project of Chinese Academy of Sciences “Future Advanced Nuclear Fission Energy–ADS Transmutation System Fundamental” 302(XDA03030200); Research Funds for the Central UniversitiesHEUCF101501); Fundamental Research Funds of Harbin Engineering University(002150260713)

Corresponding author: CHEN Zhi-qiang, E-mail: zqchen@impcas.ac.cn

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