

文章编号: 1007-4627(2013)04-0430-05

# 基于 Geant4 的 $4\pi$ 多单元载 Gd 液闪探测系统的初步设计

于国梁

(华北电力大学数理学院, 河北保定 071003)

**摘要:** 采用基于蒙特卡罗方法的 Geant4 软件设计了由 40 个载 Gd 液闪探测器组成的多单元  $4\pi$  立体角探测系统。该探测系统与置于其几何中心的裂变室构成了一个研究平台, 该平台主要用于可裂变核  $(n, 2n)$  反应截面的测量工作。首先对该系统的物理模型进行了初步检验, 然后计算并分析了该探测系统的一些基本性能。通过计算发现, 系统空腔半径的变化对 neutron 探测效率的影响十分有限; 而探测效率随探测器的厚度增加先是迅速增大, 然后逐渐趋于平缓; 计算还表明, Gd 同位素俘获中子后发射的级联  $\gamma$  射线的能量主要沉积在局部几个相邻的探测器中。基于以上计算, 初步确定了系统的厚度以及空腔半径的大小, 并对下一步将要开展的工作做了初步规划。

**关键词:** Geant4;  $(n, 2n)$  反应; 载 Gd 液体闪烁探测器

**中图分类号:** TL814; TL76; TL362+.1      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.30.04.430

## 1 引言

$(n, 2n)$  核反应在反应堆内起中子增值的作用, 所以可裂变核的  $(n, 2n)$  反应截面的准确测量在核能以及核技术利用方面具有非常重要的意义<sup>[1]</sup>。人们采用多种方法开展这一工作, 活化法是其中常用的一种手段, 但是它要求剩余核有合适的半衰期, 此外, 该方法对样品的纯度以及中子源的强度有较高的要求<sup>[2]</sup>。瞬发  $\gamma$  射线法是一种与核反应理论模型相结合的测量方法, 但它较强地依赖于核反应理论模型, 给测量结果带来较大的不确定度<sup>[2]</sup>。

作为直接测量法的一种, Frehaut 等<sup>[3-4]</sup>在 1976 年提出的大闪烁液体球方法具有较高的探测效率。在该闪烁液体的两半球形的容器内装有载 Gd 的液体闪烁体, 容器周围嵌以十几根光电倍增管, 用以收集光脉冲信号。单能脉冲中子源经准直后照射位于系统几何中心的样品, 中子与样品发生  $(n, 2n)$  核反应后产生的中子很快被液闪慢化, 并产生中子脉冲(通常称为快信号)。由于 Gd 同位素具有较高的热中子俘获截面, 所以中子最后被 Gd 俘获。处于激发态的 Gd 同位素会发射总能量为 8 MeV 左右的级联  $\gamma$  射线, 将这些  $\gamma$  射线

引起的脉冲信号称为慢信号, 通过对这种级联  $\gamma$  射线的测量可以确定  $(n, 2n)$  反应截面的大小。这种方法具有较高的中子探测效率(80% 左右), 不依赖于核反应理论模型, 对剩余核的半衰期也没有要求<sup>[5]</sup>。但这种方法在测量可裂变核的  $(n, 2n)$  截面时, 不能区分两中子事件是来源于  $(n, 2n)$  反应还是裂变反应。此外, 系统具有较大的灵敏体积, 环境、样品中的  $\gamma$  射线的符合相加效应明显, 这导致了较高的  $\gamma$  本底。由于探测系统内产生的  $\gamma$  射线会使所有光电倍增管响应, 使得系统具有较高的计数率。

针对上述方法的缺点, 我们在保证中子探测效率的前提下对其进行了改进, 设计了由 40 个探测单元组成的  $4\pi$  立体角载 Gd 液闪探测系统。在实验过程中, 这种多单元的构造可降低单个探测器的计数率, 从而减小死时间; 其次, 由本文 3.2 节中可见, 它还具有一定的  $(n, \gamma)$  分辨本领, 能有效减小环境  $\gamma$  本底对测量结果的影响。在对可裂变核的  $(n, 2n)$  截面进行测量时, 将样品置于裂变室内, 用裂变室信号做反符合则可以减小裂变中子对测量结果的影响。用于该探测系统的裂变电离室是多靶片快裂变室, 具有约 90% 的探

收稿日期: 2012-12-25    修改日期: 2013-05-23

基金项目: 教育部中央高校青年基金资助项目(13QN59)

作者简介: 于国梁 (1978-), 男, 山东滨州人, 博士研究生, 从事实验核物理研究; E-mail: yuguoliang2011@163.com.

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

测效率<sup>[6]</sup>。裂变室和该液闪探测系统构成的这一研究平台, 还可用于非裂变核的(n, 2n)截面的测量, 以及中子的角分布及角关联等的测量。

## 2 探测系统的设计及模型的检验

### 2.1 系统的设计

为了能够覆盖接近4 $\pi$ 的立体角, 探测系统每个相邻的探测单元应实现无缝连接, 同时为了有相等的效率, 各单元对系统几何中心应该具有近似相同的立体角。满足以上条件的各探测单元的横截面构成了一球内接多面体<sup>[7]</sup>, 而立体几何知识要求构成这种多面体的面数等于一系列的幻数(42, 92和122等)<sup>[8]</sup>。探测单元个数太多会增加系统电子学的复杂程度, 因此, 设计了如图1所示的40单元的探测器系统。该系统由横截面分别为五边形和六边形的两种探测单元构成, 抽掉z轴方向两个正对的五边形单元作为中子束流通道。为了放置裂变室, 探测系统中心留有一空腔。EJ-331型的液闪装在壁厚3 mm的铝容器中, 液闪中掺以质量百分比浓度为0.5%的Gd同位素。

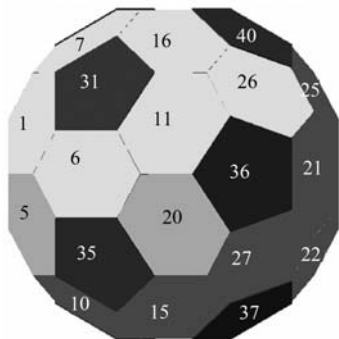


图1 探测系统示意图

### 2.2 物理模型的检验

根据以上的设计, 我们采用基于蒙特卡罗方法的Geant4软件建立了探测系统的几何和物理模型。为了验证该物理模型的正确性, 对中国原子能科学研究院设计制造的用于暗物质测量实验中的 $\phi 30\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ 的载Gd液闪进行了模拟计算。图2显示了模拟谱与实测谱的对比, 由于液闪的能量分辨率较差, 所以在图中看不到 $^{60}\text{Co}$ 的两个特征峰, 而只能看到一个较宽的峰。此外, 由于受环境中X射线的影响, 测量谱在低能区的计数要略高于模拟值。对比显示, 在峰位附近模拟谱和测量谱具有很好的一致性, 这可以说明所建立的Geant4物理模型的正确性和可靠性, 可以进

行进一步的模拟计算。

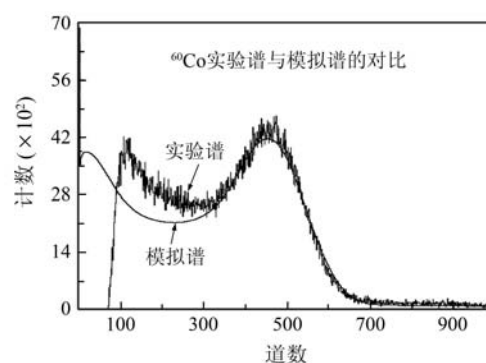


图2  $^{60}\text{Co}$ 测量谱与模拟谱的对比

## 3 探测系统的基本性能

### 3.1 探测系统对 $^{252}\text{Cf}$ 自发裂变中子源的响应

$^{252}\text{Cf}$ 属于易裂变核素, 由于它的裂变率高, 半衰期长短合适, 所以在实验测量中它常被用作效率刻度的标准源。此外,  $^{252}\text{Cf}$ 自发裂变中子源的能谱与可裂变核的(n, 2n)中子谱的形状比较接近, 只是后者比前者稍软。因此, 将 $^{252}\text{Cf}$ 中子源置于探测系统几何中心, 计算了系统对它的响应规律。图3显示了Gd俘获中子后发射的级联 $\gamma$ 射线在探测单元及探测系统中的能量沉积谱(图中探测器指单个探测单元)。由于 $\gamma$ 射线主要以康普顿散射的形式在液闪中损失能量<sup>[9]</sup>, 所以, 探测单元的 $\gamma$ 能谱是边缘位于8 eV附近的康普顿坪。而探测系统具有较大的灵敏体积,  $\gamma$ 射线经过多次康普顿散射后能量得到了充分沉积, 因而在8 eV能区附近形成了全能峰。

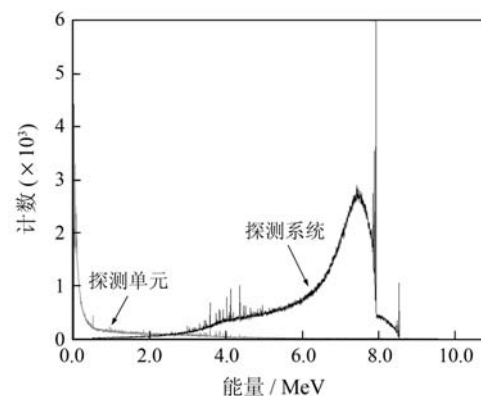


图3 探测单元及系统的 $\gamma$ 能谱

图4显示了各种效率随厚度(单个探测长度)的变化曲线, 几种效率的定义如下:

$$\text{探测效率} = \frac{\text{中子谱总计数}}{\text{源发射中子数}}, \quad (1)$$

$$\text{俘获效率} = \frac{\text{被 Gd 俘获中子数}}{\text{源发射中子数}}, \quad (2)$$

$$\text{绝对效率} = \frac{\text{探测系统 } \gamma \text{ 能谱总计数}}{\text{源发射中子数}}. \quad (3)$$

$$^{155}\text{Gd}: \frac{\sum_{0 \text{ MeV}}^{2.5 \text{ MeV}} \text{相对强度}}{\sum_{2.5 \text{ MeV}}^{9 \text{ MeV}} \text{相对强度}} = 8.73, \quad (4)$$

$$^{157}\text{Gd}: \frac{\sum_{0 \text{ MeV}}^{2.5 \text{ MeV}} \text{相对强度}}{\sum_{2.5 \text{ MeV}}^{9 \text{ MeV}} \text{相对强度}} = 7.62. \quad (5)$$

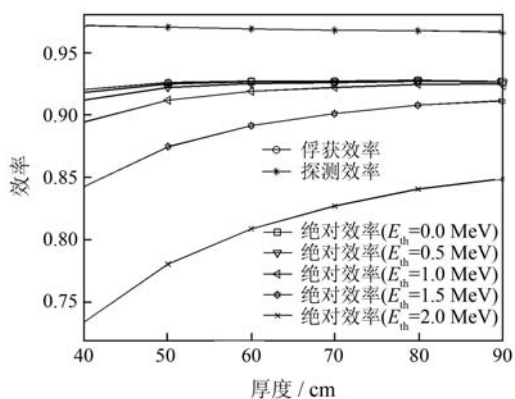


图 4 效率曲线

式(1)中的中子谱指“快信号”的能谱(如图5所示), 因为是想通过级联 $\gamma$ 射线的符合测量来计算(n, 2n)截面, 所以, 这其中最重要的是绝对效率。结果显示, 绝对效率基本在80%以上, 并随厚度的增加而增大, 厚度超过60 m后变化逐渐趋于平缓。

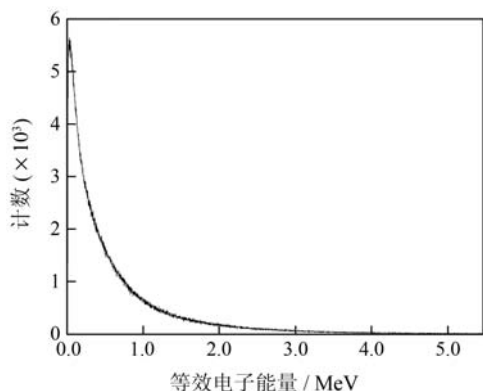


图 5 探测系统的中子谱

### 3.2 Gd 发射 $\gamma$ 射线在各探测单元中能量的沉积分布特点

#### (1) Gd 发射的级联 $\gamma$ 射线的特点

液闪中含量较高且热中子俘获截面较大的两种 Gd 同位素是 $^{155}\text{Gd}$ 和 $^{157}\text{Gd}$ , 它们俘获热中子后具有非常复杂的激发态。我们对能量低于 2.5 MeV 的  $\gamma$  射线做了统计, 结果如下:

由此统计结果可见, Gd 同位素发射的  $\gamma$  射线主要由多条中低能射线组成。而这些射线的穿透本领非常有限, 它们应该只能引起部分相邻的探测单元有计数响应, 为了验证这一结论, 对此进行了模拟计算。

#### (2) $\gamma$ 射线在探测系统中的能量沉积分布

$^{252}\text{Cf}$  中子源置于系统几何中心, 向 36 号探测单元发射中子(如图 1 所示)。如果中子慢化后被 36 号探测单元中的 Gd 俘获, 则对其发射的  $\gamma$  射线在各探测单元中沉积的能量进行记录, 共模拟了  $10^8$  次事件。最后, 对各探测单元中沉积的能量进行了统计分析, 分析结果如图 6 所示。结果显示, 射线在 36 号探测单

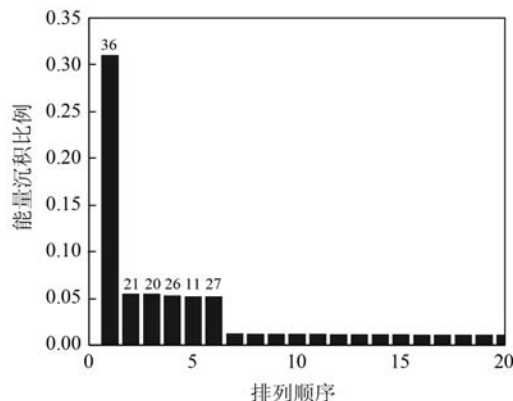


图 6 Gd 发射的级联  $\gamma$  射线在各探测单元中沉积能量的统计分析结果

元中沉积了最多的能量, 其次是在与其相邻的单元中沉积的能量较多。由这几个相邻的探测单元构成了一个局部探测单元, 射线在其中沉积了大约 60% 的能量。这说明由中子引起的一次“点火”事件, 只有局部的探测单元(由 6~7 个探测单元组成)有计数响应, 且射线在其中沉积的总能量在 4~5 MeV 以上。探测系统对环境中的中低能  $\gamma$  射线不具有这样的响应特点, 一般只有 2~3 个探测单元有响应, 所以在以后的实验测量过程中, 这种规律可以作为中子事件的判断依据之一, 从而减小环境  $\gamma$  本底对测量结果的影响。

### 3.3 空腔半径对两中子符合效率的影响

图7显示了系统空腔半径的改变对两中子符合效率的影响, 图中最下边的曲线是探测器阈值为2.0 MeV条件下的效率曲线。在实验测量过程中, 探测器阈值通常取1.0 MeV以下, 所以, 由图可见空腔半径对两中子符合效率的影响有限。可以根据实际需要选择系统空腔半径的大小。考虑到探测系统中心要放置裂变室, 所以空腔半径初步选择为30 cm。

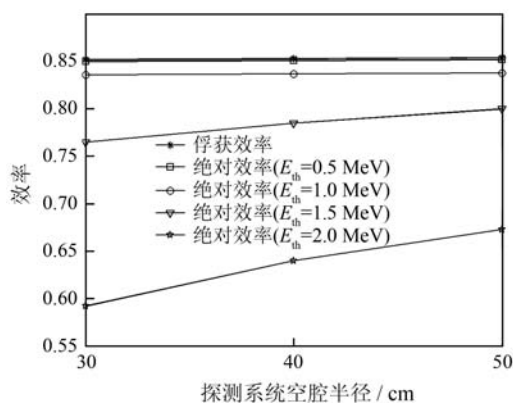


图7 两中子的符合效率曲线(厚度=60 cm)

## 4 结论及展望

采用基于蒙特卡罗方法的模拟软件建立了4 $\pi$ 载Gd液闪探测系统的Geant4物理模型。并通过模拟计算初步分析了系统的一些基本性能, 并由此得到以下几点结论:

(1) 该探测系统对中子具有较高的探测效率, 探测效率随系统厚度的增大而增加, 当厚度超过60 cm后趋于平缓。为了使系统有较高的探测效率, 同时又不至于体积过于庞大, 初步确定系统的厚度为50 cm。

(2) 由于系统具有较大的灵敏体积, 总能量为8 MeV的级联 $\gamma$ 射线的能量得以充分沉积。而环境中 $\gamma$ 射线的能量大部分为低能射线, 这对于中子事件的判断非常有益, 可大大减小环境中 $\gamma$ 辐射的影响。

(3) Gd发射的级联 $\gamma$ 射线的能量主要沉积在局部探测单元中(俘获中子所在探测器以及与之相邻的5~6个探测单元的集合)。在以后的实验测量过程中, 这一规律可以作为一种n- $\gamma$ 鉴别方法, 从而提高系统对中子事件的鉴别能力, 进一步减小环境 $\gamma$ 本底

对测量结果的影响。

本文论述的仅是对载Gd液闪探测系统的初步设计和计算, 还有许多地方有待完善。在以后的工作中, 准备把裂变电离室加入到探测系统的模型之中, 对整个实验过程做全面的分析和计算。这些工作主要包括各种脉冲信号(散射中子、非弹性散射中子以及裂变中子等)的飞行时间谱、各种本底事件对测量结果的影响等, 汇总后对实验方案的可行性给出科学的分析和评价。

**致谢** 本课题受到了中国原子能科学院的侯龙研究员以及王朝辉、苏晓斌、王琦等的大力帮助和支持, 特此表示感谢。

### 参考文献(References):

- [1] ZHANG Feng, KONG Xiangzhong. Journal of the University of Petroleum, 2003, **27**(2): 128. (in Chinese)  
(张峰, 孔祥忠. 石油大学学报(自然科学版), 2003, **27**(2): 128.)
- [2] SHI Zongren. Nuclear Physics Review, 2002, **19**(1): 42. (in Chinese)  
(石宗仁. 原子核物理评论, 2002, **19**(1): 42.)
- [3] FREHAUT J. Nucl Instr and Meth, 1976, **135**: 511.
- [4] FREHAUT J, BERTIN A, BOIS R. Nuclear Science and Engineering, 1980, **74-79**: 29.
- [5] XIANG Zhengyu. Nuclear Physics Review(Trends in Nuclear Physics), 1989, **6**(2): 23. (in Chinese)  
(向正瑜. 原子核物理评论(核物理动态), 1989, **6**(2): 23.)
- [6] ZHANG Huanqiao, WEN Tongqing. Atomic Energy Science and Technology, 1979, **13**(2): 113. (in Chinese)  
(张焕乔, 温同庆. 原子能科学技术, 1979, **13**(2): 113.)
- [7] SHU Chang, ZHOU Fengjun, LIANG Bin, *et al.* Journal of Henan University of Science & Technology (Natural Science), 2007, **28**(6): 53. (in Chinese)  
(舒畅, 周丰峻, 梁斌, 等. 河南科技大学学报, 2007, **28**(6): 53.)
- [8] DU Zeli, ZHOU Fengjun, LINAG Bin, *et al.* Journal of Henan University of Science & Technology (Natural Science), 2008, **29**(2): 62. (in Chinese)  
(杜泽丽, 周丰峻, 梁斌. 河南科技大学学报, 2008, **29**(2): 62.)
- [9] Fudan University, Tsinghua University, Peking University. The Experimental Method for Nuclear Physics[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1997: 54-67. (in Chinese)  
(复旦大学, 清华大学, 北京大学. 原子核物理实验方法[M]. 北京: 原子能出版社, 1997: 54-67.)

## Preliminary Design of $4\pi$ Multicell Gd-Loaded Liquid Scintillator Detection System Using Geant4 Package

YU Guoliang<sup>1)</sup>

(School of Mathematics and Physics, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei, China)

**Abstract:** A gadolinium-loaded neutron detection system with 40 liquid scintillators is designed and simulated by using Geant4 Package based on Monte Carlo method. This system with a fission chamber placed in its center is mainly used for the cross section measurement of (n, 2n) reaction of fissile nuclides. We firstly test the physics model, and then calculate and analyze some basic performance of this system. According to the calculation, the detecting efficiency is not sensitive to the inner radius of the detecting system. The efficiency increase with the system thickness at limited thickness value. The calculated results also indicate that the energy of the  $\gamma$  rays emitted from Gd isotope after capturing a thermal neutron is mainly deposited in a few adjacent detectors. Based on above calculations, the thickness and inradius of this detecting system have been preliminarily determined.

**Key words:** Geant4; (n, 2n) reaction; gadolinium-loaded liquid scintillator

---

**Received date:** 25 Dec. 2012; **Revised date:** 23 May 2013

**Foundation item:** Fundamental Research Funds for the Central Universities(13QN59)

1) E-mail: yuguoliang2011@163.com

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