

文章编号: 1007-4627(2013)01-0058-05

## HPGe 探测器晶体尺寸及效率的研究

牟婉君, 李梅, 钟正坤

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 采用蒙特卡罗方法模拟计算光子的探测效率需对高纯锗 (HPGe) 探测器进行准确的建模。模拟计算研究了 HPGe 晶体长度对探测效率的影响, 并在空间不同的测量位置对放射源进行测量, 将模拟计算与实验测量相结合, 对探测器晶体的尺寸进行调整, 获得了 HPGe 探测器晶体的模拟计算的准确尺寸, 并在 122~1332 keV 能量范围内对模拟结果进行了验证。结果表明, 在此能量范围内 HPGe 探测器的探测效率的模拟计算值与实验测量值的相对偏差大多数在 5% 内, 并建立点源探测效率与探测器轴向距离的关系。

**关键词:** 蒙特卡罗方法; HPGe 探测器; 探测效率

**中图分类号:** TL 84    **文献标志码:** A    **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.30.01.058

### 1 引言

采用高纯锗 (HPGe) 探测器测量放射性物质必须准确地刻度探测器的探测效率, 在实际工作中, 一般采用标准源对探测器进行刻度, 针对不同的测量条件 (如源的形式、几何位置和测量环境等), 一般需要通过对标样品进行测量, 以获得探测器在此条件下的探测效率, 这种方法既昂贵又费时, 对探测器的准确刻度造成影响。针对以上问题, 目前许多研究人员通过理论计算的方法, 采用蒙特卡罗方法模拟计算探测器对光子的探测效率, 使得此过程更加简便、节省, 而且准确度很高<sup>[1-4]</sup>。

采用蒙特卡罗方法模拟计算 HPGe 探测器的探测效率时, 需要输入准确的 HPGe 探测器的结构和几何参数, 而一些设备供应商为了技术上的保密, 一般只给出探测器晶体的大概体积, 所得的参数精确度不够, 致使模拟计算结果与实验测量结果有一定的误差。为了使计算结果和测量结果相符合, 需要先对探测器的一些几何尺寸进行准确确定, 如晶体的长度、半径、死层厚度及冷指尺寸。一般低能光子受探测器晶体前部死层厚度的影响, 中能光子受晶体的长度和半径的影响, 高能光子受冷指尺寸的影响。而在实际测量中, 仅关注中能光子, 因此实验中需考虑 HPGe

$\gamma$  谱仪探测器晶体尺寸对光子探测效率的影响<sup>[3-5]</sup>。

实验中, 我们采用蒙特卡罗方法分析同轴型 HPGe  $\gamma$  谱仪探测器的晶体直径及长度对点源探测效率的影响, 这样可以适当调节探测器晶体尺寸, 以修正晶体尺寸参数输入不准带来的系统偏差。通过模拟计算与实验测量相结合确定探测器的真实晶体尺寸, 并通过模拟计算获得点源在空间不同位置的探测效率, 从而建立探测效率与轴向距离  $r$  的关系。

### 2 材料与方法

#### 2.1 实验仪器与材料

美国 ORTEC 公司生产的同轴型 HPGe  $\gamma$  谱仪探测器, 相对探测效率 70%, 分辨率 (FWHM) 1.85 keV ( $^{60}\text{Co}$ , 1.33 MeV)。实验所用的标准源如表 1 所列。实验中, 选用多条  $\gamma$  特征射线对 HPGe 探测器进行刻度, 而固定样品测量的几何条件, 因受实验条件的限制, 未做样品的自吸收校正, 按能量分布, 采用式 (1) 计算全能峰的探测效率<sup>[5]</sup>。

$$\varepsilon_p(E_i) = \frac{N_a(E_i)}{A_0(E_i)P(E_i)}, \quad (1)$$

式中:  $\varepsilon_p(E_i)$  为谱仪对  $E_i$  能量的  $\gamma$  射线的探测效率;  $N_a(E_i)$  是能量为  $E_i$  的  $\gamma$  射线在谱仪上观测到的全能

收稿日期: 2012-05-14    修改日期: 2012-06-11

作者简介: 牟婉君 (1983-), 女, 陕西宝鸡人, 助理研究员, 本科, 从事放射化学研究; E-mail: jun19820922@163.com

通信作者: 钟正坤, E-mail: jun19820922@163.com

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

峰面积 (净计数率, 单位  $s^{-1}$ );  $A_0(E_i)$  为加入标准源能量为  $E_i$  的  $\gamma$  核素活度;  $P(E_i)$  为分支比。

表 1 效率刻度时选用的特征  $\gamma$  射线

点源	半衰期/a	能量/keV	分支比/%
$^{241}\text{Am}$	432.18	59.54	35.78
		121.78	28.41
$^{152}\text{Eu}$	13.52	244.67	7.55
		344.30	26.58
		778.90	12.96
		964.00	14.62
		1112.07	13.40
$^{133}\text{Ba}$	10.54	1408.08	20.85
		276.40	7.16
		302.85	18.34
$^{60}\text{Co}$	5.27	356.01	62.05
		1173.23	99.85
		1332.51	99.98
$^{137}\text{Cs}$	30.09	661.62	84.99

根据同轴型 HPGe  $\gamma$  探测器的对称性, 点源效率应是点源到探测器前表面距离  $h$  和点源到探测器轴线距离  $r$  的函数, 同时又与特征  $\gamma$  射线能量  $E$  有关, 可表示为  $\varepsilon(E, h, r)$ , 其中  $\varepsilon$  为探测器对点源的探测效率。在本实验的测量过程中, 探测器距离点源的探测高度  $h$  始终保持不变, 而距离探测器的轴线距离  $r$  不同,  $r$  成为影响探测效率的关键因素, 通过模拟计算获得点源探测效率, 并建立了  $\varepsilon$ - $r$  的拟合关系。

## 2.2 模拟计算方法与实验空间几何布局

蒙特卡罗方法能够逼真地描述随机事件的特点并模拟实验过程, 解决一些数值方法难以解决的问题。随着计算机技术的飞速发展, 此方法已被广泛地用于统计物理、实验核物理、高能物理、核医学、生物医学以及环境保护等领域。

模拟计算选用蒙特卡罗计算程序 MCNP4C, 实验中考虑了光子与物质相互作用过程的光电效应、康普顿效应和电子对效应, 采用 F8 脉冲能量分布计数卡记录某种光子的探测效率, 电子对的输运截止能量

为 1 keV, 模拟计算的光子数位  $10^8$ 。实验中, 测量了点源在不同位置处的探测效率, 并将模拟计算结果与其进行比较。

模拟计算时, 点源与 HPGe 探测器晶体的空间几何关系如图 1 所示, 点源与探测器的轴向距离为 35 cm, 可有效地减少符合相加效应的影响及源位置的几何误差; 点源分别位于图中 a, b, c, d 和 e 5 个不同的位置处, 其中 b, c, d, e 和 a 点的水平距离分别为 2, 4, 6 和 10 cm。

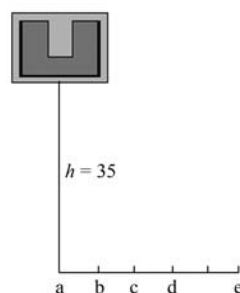


图 1 模拟计算的空间几何图

## 3 结果与讨论

### 3.1 探测器晶体尺寸的确定

实验中晶体尺寸的确定主要采用试探法, 即在探测器厂家给出的探测器晶体的尺寸 2.96 cm (半径)  $\times$  6.75 cm 的基础上, 通过实验测量与模拟计算两种方法不断的比较, 对探测器晶体尺寸进行修正, 对于中能的入射光子。探测器晶体尺寸对其探测效率有较为明显的影响, 但光子的入射方向的不同对其探测效率的影响也不同, 因此, 模拟计算了在 a, b, c, d 和 e 不用空间位置时点源  $^{137}\text{Cs}$  的 661.61 keV 的探测效率, 反复对晶体的尺寸进行修正调节, 使得这些位置点的模拟计算结果与实验结果一致。探测器的探测效率比较见表 2。当探测器的晶体尺寸为 2.96 cm (半径)  $\times$  6.75 cm 时, 点源在不同空间测量位置处探测效率计算值与实验值的相对偏差在 1.8% 以内。

表 2 不同晶体长度时计算效率与实验效率的相对偏差

源位置	晶体半径/cm	晶体长度/cm	计算结果 ( $\times 10^{-3}$ )	测量结果 ( $\times 10^{-3}$ )	绝对测量误差 ( $\times 10^{-4}$ )	相对偏差/%
a	2.96	7.00	1.78	1.71	6.31	4.09
	2.96	6.90	1.77	1.71	3.56	3.51
	2.96	6.80	1.74	1.71	2.49	1.75
	2.96	6.75	1.71	1.71	3.85	0
	2.96	6.70	1.68	1.71	5.72	-1.75

b	2.96	6.75	1.76	1.73	8.59	1.73
c	2.96	6.75	1.74	1.72	7.62	1.16
d	2.96	6.75	1.72	1.74	5.23	-1.15
e	2.96	6.75	1.66	1.68	3.58	-1.19

### 3.2 实验结果验证

通过以上研究, 确定探测器晶体尺寸为 2.96 cm×6.75 cm。为验证实验结果的准确性, 我们研究了在 122~1 332 keV 能量范围内空间不同测量位置处点源的探测效率, 并将模拟计算值与实验值进行了对比, 结果见表 3。从表中可看出, 点源探测效率计算

值与实验值的相对偏差大多数在 5% 以内 (在 996 keV 时 d 点的相对偏差)。实验过程中忽略样品自吸收的影响, 并保持样品探测位置的准确性, 实验中的误差主要来自于: (1) 全能峰净计数率的统计涨落; (2) 样品与探头的精密控制; (3) 曲线拟合和计算过程的误差。

表 3 不同空间位置点源的探测效率与实验效率的比较

能量/keV	源位置	计算结果	测量结果	绝对测量误差 ( $\times 10^{-4}$ )	相对偏差/%
122	a	$8.12 \times 10^{-3}$	$8.47 \times 10^{-3}$	4.33	-4.13
	b	$8.18 \times 10^{-3}$	$8.37 \times 10^{-3}$	7.26	-2.27
	c	$8.14 \times 10^{-3}$	$8.43 \times 10^{-3}$	3.19	-3.44
	d	$8.15 \times 10^{-3}$	$8.33 \times 10^{-3}$	4.85	-2.16
	e	$7.93 \times 10^{-3}$	$8.02 \times 10^{-3}$	7.73	-1.12
303	a	$5.63 \times 10^{-3}$	$5.63 \times 10^{-3}$	2.29	0
	b	$5.68 \times 10^{-3}$	$5.58 \times 10^{-3}$	4.67	1.79
	c	$5.69 \times 10^{-3}$	$5.61 \times 10^{-3}$	5.03	1.43
	d	$5.65 \times 10^{-3}$	$5.67 \times 10^{-3}$	4.98	-0.35
	e	$5.33 \times 10^{-3}$	$5.48 \times 10^{-3}$	2.13	-2.74
344	a	$4.72 \times 10^{-3}$	$4.81 \times 10^{-3}$	6.06	-1.87
	b	$4.74 \times 10^{-3}$	$4.78 \times 10^{-3}$	5.49	-0.84
	c	$4.76 \times 10^{-3}$	$4.77 \times 10^{-3}$	9.35	-0.21
	d	$4.71 \times 10^{-3}$	$4.84 \times 10^{-3}$	2.93	-2.69
	e	$4.38 \times 10^{-3}$	$4.39 \times 10^{-3}$	4.21	-0.23
356	a	$3.62 \times 10^{-3}$	$3.60 \times 10^{-3}$	6.87	0.56
	b	$3.64 \times 10^{-3}$	$3.67 \times 10^{-3}$	5.87	-0.82
	c	$3.67 \times 10^{-3}$	$3.58 \times 10^{-3}$	9.08	2.51
	d	$3.61 \times 10^{-3}$	$3.54 \times 10^{-3}$	5.73	1.98
	e	$3.14 \times 10^{-3}$	$3.10 \times 10^{-3}$	7.01	1.29
779	a	$6.12 \times 10^{-4}$	$6.21 \times 10^{-4}$	2.15	-1.45
	b	$6.17 \times 10^{-4}$	$6.09 \times 10^{-4}$	9.45	1.31
	c	$6.15 \times 10^{-4}$	$6.22 \times 10^{-4}$	7.13	-1.13
	d	$6.13 \times 10^{-4}$	$6.16 \times 10^{-4}$	4.59	-0.49
	e	$5.67 \times 10^{-4}$	$5.59 \times 10^{-4}$	6.61	1.43
964	a	$4.96 \times 10^{-4}$	$4.97 \times 10^{-4}$	7.43	-0.20
	b	$4.93 \times 10^{-4}$	$4.92 \times 10^{-4}$	5.08	0.20
	c	$4.97 \times 10^{-4}$	$5.08 \times 10^{-4}$	2.93	-2.17
	d	$4.94 \times 10^{-4}$	$5.22 \times 10^{-4}$	4.76	-5.36
	e	$4.47 \times 10^{-4}$	$4.51 \times 10^{-4}$	4.49	-0.89
1 173	a	$3.71 \times 10^{-4}$	$3.74 \times 10^{-4}$	6.25	-0.80
	b	$3.69 \times 10^{-4}$	$3.61 \times 10^{-4}$	5.13	2.22
	c	$3.72 \times 10^{-4}$	$3.76 \times 10^{-4}$	8.21	-1.06
	d	$3.70 \times 10^{-4}$	$3.65 \times 10^{-4}$	9.27	1.37
	e	$3.38 \times 10^{-4}$	$3.35 \times 10^{-4}$	4.77	0.89
1 332	a	$2.83 \times 10^{-4}$	$2.87 \times 10^{-4}$	4.08	-1.39
	b	$2.86 \times 10^{-4}$	$2.84 \times 10^{-4}$	3.21	0.70
	c	$2.81 \times 10^{-4}$	$2.73 \times 10^{-4}$	7.77	2.93
	d	$2.82 \times 10^{-4}$	$2.79 \times 10^{-4}$	8.23	1.08
	e	$2.51 \times 10^{-4}$	$2.47 \times 10^{-4}$	5.18	1.62

### 3.3 建立 $\varepsilon$ - $r$ 拟合关系

对表3中的不同特征 $\gamma$ 射线的探测效率与轴向距离 $r$ 进行多项式拟合, 多项式拟合相关指数 $R^2$ 在0.998 50~0.999 98之间。图2给出了 $\gamma$ 射线能量在122, 303, 344和356 keV处模拟计算效率 $\varepsilon$ 随轴向距离 $r$ 的变化曲线; 图3给出了 $\gamma$ 射线能量在779, 964, 1 173和1 332 keV处模拟计算效率 $\varepsilon$ 随轴向距离 $r$ 的变化曲线。由图看出, 随测量轴向距离的变大, 探测效率 $\varepsilon$ 保持平稳, 变化不大。

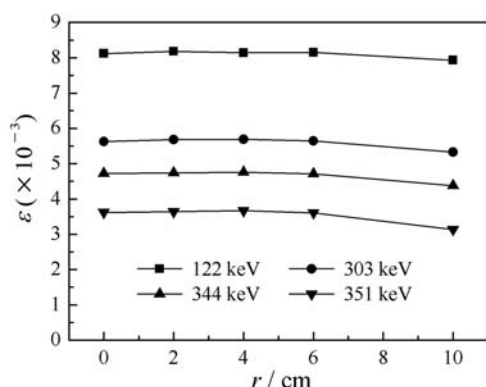


图2 122~356 keV之间特征 $\gamma$ 射线效率随轴向距离变化

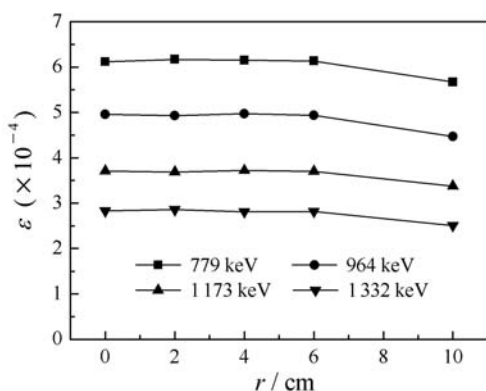


图3 779~1 332 keV之间特征 $\gamma$ 射线效率随轴向距离变化

## 4 结论

实验中, 结合蒙特卡罗模拟计算方法与实验测量相结合, 将点源探测效率计算值与实验值比较, 反复对HPGe探测器晶体尺寸进行调节, 获得了HPGe探测器晶体的模拟计算的准确尺寸; 在122~1 332 keV能量范围内对实验结果进行验证, 表明探测效率的模拟计算值与实验值的相对偏差大多数在5%内, 并建立点源探测效率与探测器轴向距离的关系。

### 参考文献 (References):

- [1] XING Dong, GUO Nanying. Journal of Mathematical Medicine, 2006, **19** (3): 77(in Chinese).  
(向东, 郭南英. 数理医药杂志, 2006, **19** (3): 77.)
- [2] ZHNAG Binqun, MA Jizeng, CHENG Jianping, *et al.* Nuclear Electronics & Detection Technology, 2005, **25** (3): 274(in Chinese).  
(张斌全, 马吉增, 程建平, 等. 核电子学与探测技术, 2005, **25** (3): 274.)
- [3] MONES L, DEDONDER J, XILEI L, *et al.* Nucl Instr and Meth, 1981, **187**: 451.
- [4] MONES L, HOSTE J. Int J Appl Radiat Isot, 1983, **34** (8): 1085.
- [5] XIANG Changxin. Nuclear Electronics & Detection Technology, 1994, **14** (6): 363(in Chinese).  
(向长欣. 核电子学与探测技术, 1994, **14** (6): 363.)
- [6] MU Wanjun, LI Mei, JIAN Yuan. Atomic Energy Science and Technology, 2011, **45** (10): 1266(in Chinese).  
(牟婉君, 李梅, 蹇源. 原子能科学与技术, 2011, **45** (10): 1266.)
- [7] MU Wanjun, LI Mei, LIU Guoping. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2010, **30** (7): 960(in Chinese).  
(牟婉君, 李梅, 刘国平. 核电子学与探测技术, 2010, **30** (7): 960.)

## Study on Crystal Size and Detection Efficiency of HPGe Detector

MU Wan-jun, LI Mei, ZHONG Zheng-kun

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China)

**Abstract:** The accurate shape of HPGe detector is needed in order to calculate its detection efficiency with Monte Carlo methods. In our calculation, the influence of the HPGe crystal size on efficiency has been investigated; the final

Received date: 14 May 2012; Revised date: 11 Jun. 2012

Corresponding author: ZHONG Zheng-kun, E-mail: jun19820922@163.com

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

crystal sizes were determined by comparison with experiments and were validated by the experimental efficiency obtained at several source-to-detector positions. The results show that when the crystal dimensions determined are used to calculate the detection efficiency in the energy range 122~1 332 keV, the relative deviations between simulated and most experimental results were within 5%. In addition, the relationship between detection efficiency and axial distance to detector was established.

**Key words:** Monte Carlo method; HPGe detector; detection efficiency