



Clover型高纯锗探测器使用中的add-back性能

马鹏琮 郑鹏松 曾全波 黄浩 曾凡斐 嘎达吉勒湖 马鑫 强赉华 王建国 李广顺

Studies on the add-back Performance of a Clover Type HPGe Detector

MA Pengcong, ZHENG Pengsong, ZENG Quanbo, HUANG Hao, ZENG Fanfei, GADA Jilehu, MA Xin, QIANG Yunhua, WANG Jianguo, LI Guangshun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.40.2023023>

引用格式:

马鹏琮, 郑鹏松, 曾全波, 黄浩, 曾凡斐, 嘎达吉勒湖, 马鑫, 强赉华, 王建国, 李广顺. Clover型高纯锗探测器使用中的add-back性能[J]. *原子核物理评论*, 2023, 40(4):555-559. doi: 10.11804/NuclPhysRev.40.2023023

MA Pengcong, ZHENG Pengsong, ZENG Quanbo, HUANG Hao, ZENG Fanfei, GADA Jilehu, MA Xin, QIANG Yunhua, WANG Jianguo, LI Guangshun. Studies on the add-back Performance of a Clover Type HPGe Detector[J]. *Nuclear Physics Review*, 2023, 40(4):555-559. doi: 10.11804/NuclPhysRev.40.2023023

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

镀膜型²³MCP探测效率和位置分辨优化的蒙特卡罗模拟研究

Monte Carlo Simulation Study on Optimization of Detection Efficiency and Spatial Resolution of Coated ²³MCP
原子核物理评论. 2021, 38(2): 190-195 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.38.2020058>

用于快中子探测的裂变电离室实验及模拟结果比较(英文)

Comparison Between Experiment and Simulation for the Fission Chamber Used in Fast Neutron Detection
原子核物理评论. 2019, 36(4): 471-476 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.04.471>

用于GPPD谱仪的大面积闪烁体中子探测器性能测试

Performance Test of the Array Scintillator Detector with a Large Area for GPPD
原子核物理评论. 2019, 36(2): 190-196 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.02.190>

新型M-THGEM结构探测器的蒙特卡罗模拟研究

Monte Carlo Simulation on the Novel M-THGEM Detector
原子核物理评论. 2019, 36(1): 85-90 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.01.085>

中国散裂中子源小角中子散射谱仪探测器研制

Small Angle Neutron Scattering Spectrometer Detector of China Spallation Neutron Source
原子核物理评论. 2019, 36(2): 204-210 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.02.204>

基于差分曲率的各项异性扩散小波图像降噪算法研究

Research on Anisotropic Diffusion Wavelet Image Denoising Algorithm Based on Differential Curvature
原子核物理评论. 2021, 38(3): 311-318 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.38.2020067>

文章编号: 1007-4627(2023)04-0555-05

Clover型高纯锗探测器使用中的add-back性能

马鹏琮^{1,2}, 郑鹏松^{1,2}, 曾全波^{1,2}, 黄浩^{1,2}, 曾凡斐^{1,2}, 嘎达吉勒湖^{1,2},
马鑫^{1,2}, 强赞华¹, 王建国¹, 李广顺^{1,2,†}

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;
2. 中国科学院大学核科学与技术学院, 北京 100049)

摘要: 高纯锗探测器在 γ 谱学研究当中一直被广泛应用。本工作基于蒙特卡罗模拟的方法研究了Clover型高纯锗探测器的add-back性能。模拟了单晶体能谱和 γ 射线在不同晶体间发生康普顿散射的概率。与实验符合后, 从 γ 射线多重性和 γ 源到探测器距离两个方面对add-back性能进行了研究。研究表明, 在 γ 源距探测器25 cm的条件下, 较高的多重性($M=6$)对探测器的add-back因子影响不大, 主要体现在低能区域。当 γ 源与探测器的距离减小时, add-back因子变化显著。特别是, 在距离为5 cm和 $M=6$ 的条件下, 不推荐使用add-back分析。

关键词: Clover型高纯锗探测器; 探测效率; 蒙特卡罗模拟; add-back性能

中图分类号: O571.53 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.40.2023023

0 引言

在核辐射测量中, 人们发展了气体探测器、闪烁体探测器以及半导体探测器等多种不同类型的探测设备, 用于不同的探测需求。其中, 半导体探测器由于具有能量分辨好、线性响应好等特点, 在测量中有着非常广泛的应用。对于 γ 射线的测量, 当对能量分辨要求较高时, 人们通常采用平面型或者同轴型高纯锗探测器。平面型探测器的灵敏层较薄, 一般适用于测量能量在keV量级及以下的 γ 射线; 同轴型探测器的灵敏层可以做得很厚, 能够测量高达MeV量级的 γ 射线。

随着探测器研发技术的不断升级, 人们又发展了Clover型的高纯锗探测器^[1]。它由四块锗晶体构成, 实验时可以作为四个独立的探测器。在使用中, γ 射线在相邻锗晶体间发生康普顿散射的概率较大, 使得每个探测器测得的能谱中都具有相对较高的康普顿平台。目前, 降低能谱中康普顿平台最好的办法是做add-back处理。它是指将一条 γ 射线因康普顿散射在不同锗晶体中所沉积的能量加和回来, 这样不仅可降低能谱中的康普顿平台, 还可以提高全能峰的探测效率。

在针对Clover型探测器的数据分析中, add-back方法虽然可以通过分析康普顿散射事件将 γ 射线的能量重

构出来, 但是随着探测器对 γ 源覆盖立体角的变化, add-back的效果也会发生较大的变化。特别是在 γ 源距探测器较近时, 多重 γ 事件下的重构事件会包含不需要的“加和峰”, 导致全能峰探测效率的降低。目前已经针对Clover型探测器工作性能及add-back效果的研究^[2-6]。在本工作中, 将根据实验中的实际需求, 从 γ 射线多重性和 γ 源到Clover型探测器的距离方面进一步深入分析, 来了解add-back的性能和使用条件。

1 模拟程序开发及其数据检验

研究中的模拟程序基于Geant4工具包开发^[7-8]。该工具包由欧洲核子中心主导开发, 可以模拟粒子与物质发生相互作用的过程。它包括一系列完整的功能, 如几何模型构建、物理模型选取、事件跟踪等。根据实验中所使用Clover型探测器的实际晶体尺寸, 在模拟程序中构建了几何模型, 检测模拟程序的预测能力。如图1所示, 该探测器由四块高纯锗晶体组成, 分别用A、B、C、D来标识。每块晶体由高90 mm、半径30 mm的圆柱切割而成, 两侧晶体切面构成的夹角为45°。模型还包含了探测器的外壳结构, 来准确模拟 γ 射线在晶体及其外壳中的散射过程。

收稿日期: 2023-03-11; 修改日期: 2023-04-23

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB34010000); 国家自然科学基金资助项目(12121005, U1932138)

作者简介: 马鹏琮(1998-), 男, 甘肃靖远人, 硕士研究生, 从事实验核物理研究; E-mail: mapengcong@impcas.ac.cn

† 通信作者: 李广顺, E-mail: ligs@impcas.ac.cn

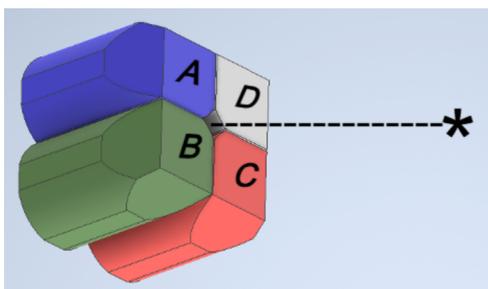


图 1 Clover 型高纯锗探测器中的锗晶体模型图(在线彩图)

构建好几何模型后, 首先模拟了 ^{137}Cs 源处于 Clover 型探测器正前方 14 cm 处时单个晶体的能谱, 并与实验测量结果进行了对比。如图 2 所示, 实验测量的能谱用蓝色标识, 星号标识的 γ 峰来自于自然界的本底, 模拟得到的能谱用红色标识。为便于比较, 对模拟的能谱进行了归一化处理, 使得模拟得到的 661.2 keV 处全能峰计数与实验值相同。从图 2 中可以看出, 在全能峰处归一后, 分别处于 180~200 keV 和 460~480 keV 之间的背散射峰和康普顿边缘都符合得很好。实验能谱的康普顿平台比模拟的结果要高一些, 这主要是由于实验测量过程中自然界的 γ 本底在探测器中也沉积能量, 叠加在 ^{137}Cs 放射源产生的能谱中。而在整个模拟中, 并没有引入自然界中的本底辐射, 只模拟了标准放射源在探测器中的能量沉积。

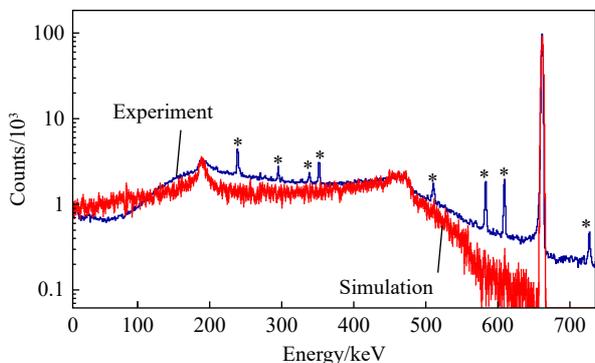


图 2 实验测量和模拟得到的 ^{137}Cs 源在 Clover 型高纯锗探测器单晶体中的能量沉积能谱(在线彩图)

γ 射线进入 Clover 型高纯锗探测器后, 可以把能量全部沉积在一个晶体中, 也可以发生康普顿散射把能量沉积在两个、三个甚至四个晶体中。在上述几种情况下, 分别模拟得到了 661.2 keV γ 射线的沉积概率, 并与实验测量值进行了对比, 如图 3 所示。如果把探测器任意晶体间发生的康普顿散射重构后所修正的全能峰计数作为标准, γ 射线将其能量全部沉积在 A 晶体中的计数约占 18.50%, 在 A、B 和 A、D 相邻晶体间发生康普顿散射的计数共占约 11.20%, 在 A、B、C 和 A、D、C 三块晶体间发生康普顿散射的计数共占约 0.90%, 在 A、B、C、

D 四块晶体间发生康普顿散射的计数约占 0.04%。从图 4 可以看出, 所使用的模拟程序对于康普顿散射概率也具有较好的预测能力。此外, 模拟程序也经过了其它实验数据的检验 [9]。

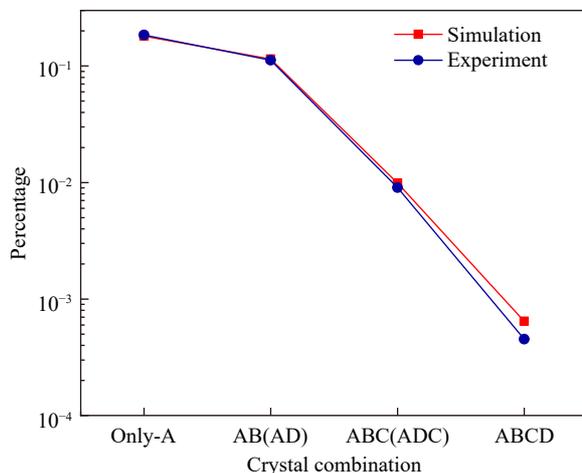


图 3 实验测量和模拟得到的 661.2 keV γ 射线在 Clover 型高纯锗探测器各晶体组合中的能量沉积概率(在线彩图)

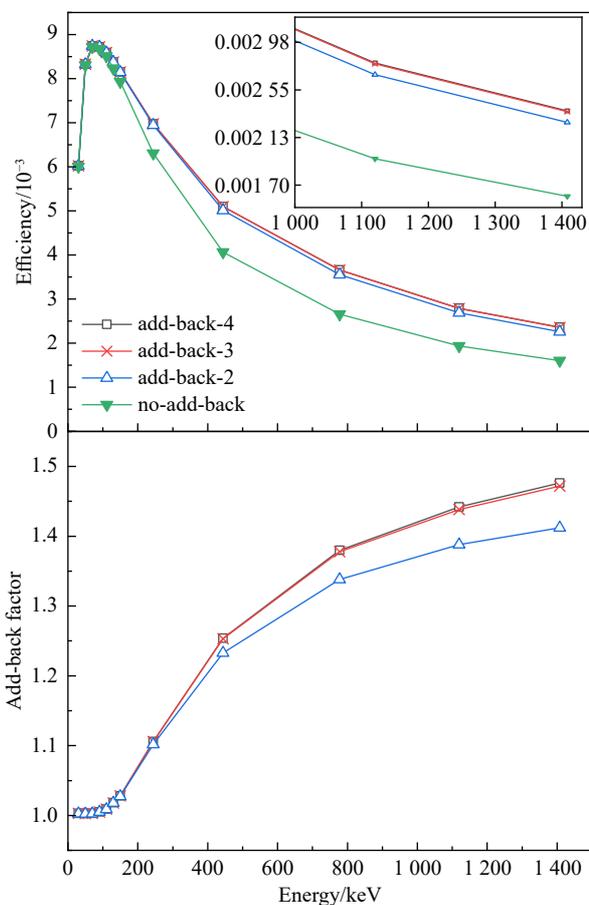


图 4 $M=1$ 、距离 25 cm 条件下模拟得到的 Clover 型高纯锗探测器探测效率及其 add-back 因子(在线彩图)

2 模拟结果及分析

在 Clover 型探测器 add-back 性能的模拟中选取了 12 条 γ 射线, 能量从低到高分别是 30, 50, 70, 90, 110, 130, 150, 244, 444, 778, 1 120 和 1 408 keV。在能量较低的范围, γ 射线的能量间隔被设置为 20 keV, 这样可以更清楚地描述低能部分探测效率的变化趋势。在高能部分, γ 能量被设置成与 ^{152}Eu 放射源放出的 γ 能量一致, 以便于后期与实验数据的对比。此外, 30~1 408 keV 的能量区间也是低能核物理中人们常常关注的范围。

在 add-back 分析过程中, 选取了四种条件进行研究, 分别是 no-add-back、add-back-2、add-back-3 和 add-back-4。其中, no-add-back 条件是指不对 Clover 型探测器进行任何 add-back 分析, 四块晶体作为四个独立的探测器使用; add-back-2 条件是指当 γ 射线在探测器相邻的两块晶体间发生康普顿散射时做 add-back 处理; add-back-3 和 add-back-4 同时还包含了 γ 射线分别在三块晶体和四块晶体中有沉积能量时, 进行 add-back 处理。

2.1 γ 射线多重性对 add-back 性能的影响

Clover 型探测器做 add-back 分析的目的是将在不同晶体中发生康普顿散射的 γ 射线原始能量重构出来, 以提高全能峰的探测效率。这个目的在 γ 射线的多重性较低的时候容易实现。但是, 当衰变的时间窗内有多条或者多条 γ 射线进入探测器时, 测量中很难区分不同晶体同时测到的 γ 射线是分别来自不同的全能峰还是同一个 γ 射线的康普顿散射事件。这样, add-back 处理时会有“加错”的风险。特别地, 高纯锗探测器对低能量的 γ 射线有较高的探测效率, 在射线多重性增高的时候, “加错”的风险也会增大。多重性选取了 $M=1$ 和 $M=6$ 两种情况, $M=1$ 是指 γ 源在探测器的每个事件时间窗内只放出一条 γ 射线, 模拟时能量从上述 12 个能量中随机选取; $M=6$ 是指 γ 源在每个 γ 事件的时间窗内放出 6 条 γ 射线, 1 条 γ 射线设为待研究能量点的能量, 其余 5 条 γ 射线从上述 12 个能量中随机选取。模拟过程中, γ 源到探测器的距离被设置为 25 cm。

图 4 给出了 $M=1$ 情况下 no-add-back 和 add-back-2、add-back-3、add-back-4 处理后的探测器效率曲线以及 add-back 因子。其中, add-back 因子定义为做 add-back 处理后的效率与 no-add-back 分析时效率的比值。从图中可以看出, 低能部分在 add-back 处理后效率并没有明显的提高, add-back 因子保持在 1 左右, 而高能部分 add-back 处理后效率有较大幅度提升, add-back 因子在 1.4 MeV 能量处可达 1.4 左右。这主要是由于低能 γ 射线把能量沉积在单个晶体中的概率比较大, 而高能 γ 射线

在晶体间发生康普顿散射的概率比较大, 使得 add-back 因子在高能部分比较明显。此外, add-back-4 和 add-back-3 的效果与 add-back-2 对比, 并没有明显的提升。图 5 展示了 $M=6$ 情况下模拟得到的探测器效率曲线及 add-back 因子。在低能区域, 由于 add-back 处理时有一定的概率把不同晶体中的全能峰当做康普顿散射事件“加错”, 导致全能峰位置处的效率降低。需要指出的是, 如果实验中的目标 γ 射线与非目标射线的时间差是随机分布的, 或者大于康普顿散射的时间窗(一般是 ps 量级), 测量中缩短符合时间窗可以排除部分偶然符合, 从而降低 add-back “加错”的概率。在高能部分, 把康普顿散射事件加回全能峰的概率要大于在全能峰“加错”的概率, 所以 add-back 因子高于 1。

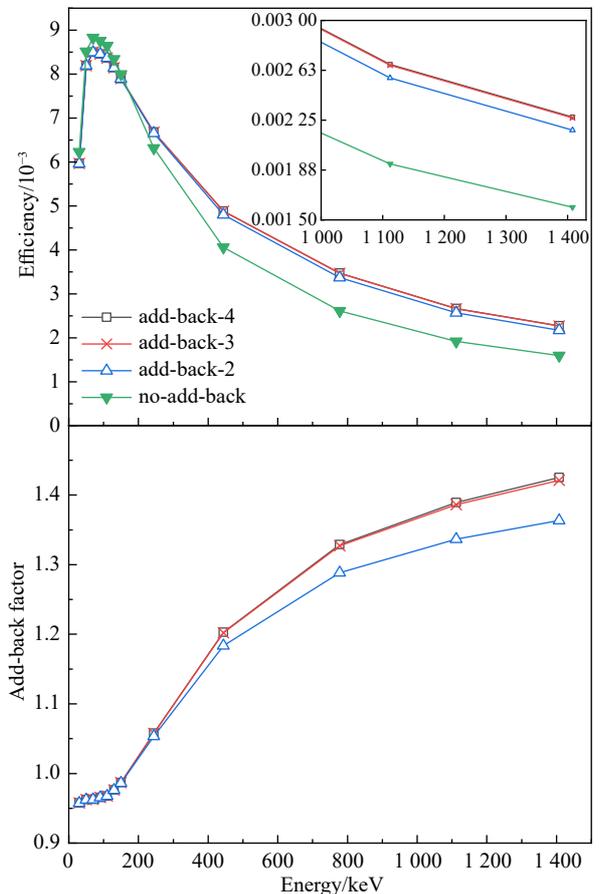


图 5 $M=6$ 、距离 25 cm 条件下模拟得到的 Clover 型高纯锗探测器探测效率及其 add-back 因子(在线彩图)

图 6 展示了在特定能量时(70, 110, 244, 778, 1 120 和 1 480 keV)add-back 的效果对比。其中, 纵轴表示 add-back-4 与 no-add-back 效率的差值与 no-add-back 效率的比值。从图中可以看出, 在 70 和 110 keV 值处, $M=6$ 的情况下由于“加错”的概率大于“加对”的概率, add-back-4 与 no-add-back 的效率差值小于 0。在较高的能量范围, add-back 的“加对”概率大于“加错”概率, 二

者的差值大于 0。在距离为 25 cm, $M=6$ 的多重条件下, add-back 分析在低能区并不适用。

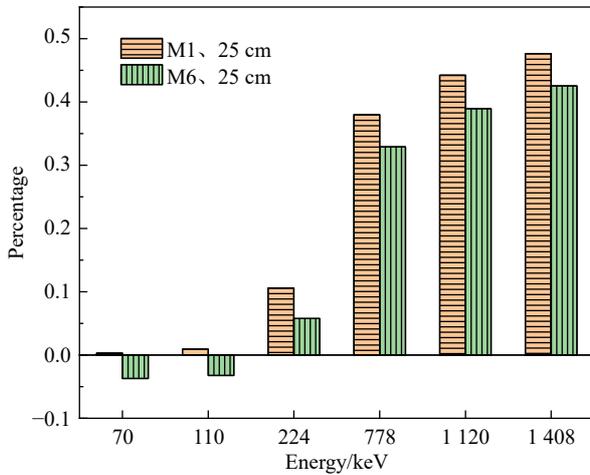


图 6 特定能量值处 $M=1$ 和 $M=6$ 条件下的 add-back-4 与 no-add-back 效率的差值与 no-add-back 效率的比值 (研究中 γ 源到探测器的距离设置为 25 cm)(在线彩图)

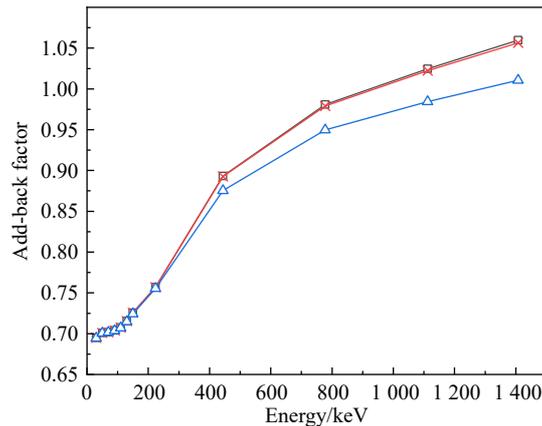
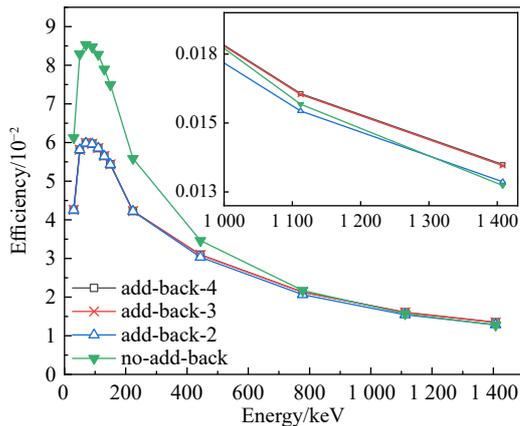


图 7 $M=6$ 、距离 5 cm 条件下模拟得到的 Clover 型高纯锗探测器探测效率及其 add-back 因子 (在线彩图)

3 结论

依托 Geant4 工具包, 对 Clover 型高纯 S 锗探测器进行了模拟程序的开发。与实验数据相比, 模拟程序很好地再现了 γ 射线在探测器中所产生的能谱以及不同晶体间的康普顿散射概率。基于此, 对 Clover 型探测器的 add-back 性能进行了模拟研究。研究从 γ 射线的多重性和 γ 源到探测器的距离两个条件进行。结果表明, 25 cm 距离条件下 γ 射线的多重性对 add-back 的性能影响并不大。当每个发射时间窗内有 6 条 γ 射线 ($M=6$) 时, add-back 因子在低能部分会有降低, 高能部分没有明显变化。当 γ 源的距离从 25 cm 缩减到 5 cm 时, $M=6$ 条件下由于探测器的加和效应非常明显, 不推荐使用 add-back 分析。

2.2 γ 源到探测器距离对 add-back 性能的影响

随着 γ 源到探测器距离的缩小, 探测器所覆盖的测量立体角也在变大, 使得多重 γ 射线条件下 add-back 的“加错”概率增大。在模拟中, 仍然把 γ 源的多重性设为 $M=6$, 到探测器的距离设置为 5 cm, 并与上述 25 cm 距离条件下的结果进行对比。5 和 25 cm 两个距离代表了使用 Clover 型探测器中的两种典型的情况。当实验中所使用的探测器较少时, 需要将其紧靠在靶室外壁, 考虑到常用小靶室的尺寸, 5 cm 具有典型的代表性。当实验中需要使用尽量多的 Clover 型探测器时, 在目前使用的支架上常配置的距离为 25 cm。图 7 给出了 $M=6$, 5 cm 距离时模拟得到的探测器效率曲线和 add-back 因子。从图中可以看出, 在低能部分 add-back 因子已经低至 0.7 附近, 而图 5 中 25 cm 条件下的 add-back 因子仍在 0.95 左右。这说明 $M=6$ 、距离 5 cm 条件下的加和效应已经非常明显, add-back 功能已经不具有优势。

参考文献:

- [1] DUCHÊNE G, BECK F, TWIN P, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 1999, 432(1): 90.
- [2] BOUNEAU S, PORQUET M, SLETTEN G, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2000, 443(2): 287.
- [3] SCHUMAKER M, SVENSSON C. *Nucl Instr and Meth A*, 2007, 575(3): 421.
- [4] ZHANG N T, LEI X G, ZHANG Y H, et al. *Chin Phys Lett*, 2012, 29(4): 042901.
- [5] ZHANG N T, LEI X G, GUO Y X, et al. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 2013, 40(3): 035101.
- [6] AGARWAL C, DANU L, GATHIBANDHE M, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2014, 763: 240.
- [7] AGOSTINELLI S, ALLISON J, AMAKO K, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2003, 506(3): 250.
- [8] ALLISON J, AMAKO K, APOSTOLAKIS J, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2016, 835: 186.
- [9] LI G, LIZARAZO C, GERL J, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2018,

Studies on the add-back Performance of a Clover Type HPGe Detector

MA Pengcong^{1,2}, ZHENG Pengsong^{1,2}, ZENG Quanbo^{1,2}, HUANG Hao^{1,2}, ZENG Fanfei^{1,2}, GADA Jilehu^{1,2},

MA Xin^{1,2}, QIANG Yunhua¹, WANG Jianguo¹, LI Guangshun^{1,2,†}

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

2. School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: High Purity Germanium(HPGe) detectors have been widely used in γ spectroscopy. The add-back performance of Clover type HPGe detector is studied based on Monte Carlo simulation. We have simulated the energy spectrum from a single crystal and the Compton scattering probability of γ ray between different crystals. Good agreements have been achieved between the simulated results and experimental data. Afterwards the add-back performance is further studied in terms of γ ray multiplicity and the distance between γ source and the detector. The studies revealed that the higher multiplicity ($M=6$) affects slightly on the add-back factor at 25 cm distance, mainly in the low energy region. With the distance decreases, the add-back factor changes dramatically. Typically, in the situation of 5 cm distance and $M=6$, the add-back analysis is not recommended.

Key words: Clover type HPGe detector; detection efficiency; Monte Carlo simulation; add-back function

Received date: 11 Mar. 2023; **Revised date:** 23 Apr. 2023

Foundation item: Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (Class B) (XDB34010000); National Natural Science Foundation of China (12121005, U1932138)

† **Corresponding author:** LI Guangshun, E-mail: ligs@impcas.ac.cn