



### 充气反冲核谱仪焦平面探测阵列的GEANT4模拟

温小江 张志远 周厚兵 张明明 李广顺 王建国 甘再国 马龙 黄明辉 杨华彬 杨春莉

#### GEANT4 Simulation of the Focal Plane Detection Array of Gas-filled Recoil Separator

WEN Xiaojiang, ZHANG Zhiyuan, ZHOU Houbing, ZHANG Mingming, LI Guangshun, WANG Jianguo, GAN Zaigu, MA Long, HUANG Minghui, YANG Huabin, YANG Chunli

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.38.2021014>

#### 引用格式:

温小江, 张志远, 周厚兵, 张明明, 李广顺, 王建国, 甘再国, 马龙, 黄明辉, 杨华彬, 杨春莉. 充气反冲核谱仪焦平面探测阵列的GEANT4模拟[J]. *原子核物理评论*, 2021, 38(4):423–429. doi: 10.11804/NuclPhysRev.38.2021014

WEN Xiaojiang, ZHANG Zhiyuan, ZHOU Houbing, ZHANG Mingming, LI Guangshun, WANG Jianguo, GAN Zaigu, MA Long, HUANG Minghui, YANG Huabin, YANG Chunli. GEANT4 Simulation of the Focal Plane Detection Array of Gas-filled Recoil Separator[J]. *Nuclear Physics Review*, 2021, 38(4):423–429. doi: 10.11804/NuclPhysRev.38.2021014

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 基于 $^{10}\text{B}_4\text{C}$ 转换体的多层多丝正比室中子探测器模拟

Simulation of a Novel Neutron Detector Based on Multi-layer MWPC with  $^{10}\text{B}_4\text{C}$  Convertor

原子核物理评论. 2019, 36(1): 71–77 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.01.071>

#### 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>

#### 缺中子Np新核素的 $\alpha$ 衰变研究

$\alpha$  Decay Studies on New Neutron-deficient Np Isotopes

原子核物理评论. 2020, 37(3): 455–461 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC44>

#### 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>

#### 镀膜型 $^{\text{MCP}}$ 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  $^{\text{MCP}}$

原子核物理评论. 2021, 38(2): 190–195 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.38.2020058>

#### 400~1500 MeV质子轰击铅靶和钨靶的出射中子能谱的FLUKA和Geant4模拟研究

FLUKA and Geant4 Simulation of Spallation Neutrons from Lead and Tungsten Targets Bombarded with 400~1500 MeV Protons

原子核物理评论. 2018, 35(1): 100–104 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.35.01.100>

文章编号: 1007-4627(2021)04-0423-07

# 充气反冲核谱仪焦平面探测阵列的 GEANT4 模拟

温小江<sup>1,2</sup>, 张志远<sup>2,3,†</sup>, 周厚兵<sup>1,4,†</sup>, 张明明<sup>2</sup>, 李广顺<sup>2</sup>, 王建国<sup>2</sup>, 甘再国<sup>2,3</sup>, 马龙<sup>2</sup>,  
黄明辉<sup>2,3</sup>, 杨华彬<sup>2</sup>, 杨春莉<sup>2,3</sup>

1. 广西师范大学物理科学与技术学院, 广西 桂林 541004;
2. 中国科学院近代物理研究所高精度核谱学重点实验室, 兰州 730000;
3. 中国科学院大学核科学与技术学院, 北京 100049;
4. 广西核物理与核技术重点实验室, 广西 桂林 541004

**摘要:** 充气反冲核谱仪 (SHANS) 是目前国内合成缺中子锕系新核素、研究重核素  $\alpha$  衰变性质的重要实验装置。为进一步提高焦平面探测阵列对重核素  $\alpha$  衰变粒子和射线的探测效率, 计划对现有探测装置进行升级。本文的主要工作是采用基于蒙特卡罗方法的 GEANT4 软件对现有的谱仪探测器阵列进行模拟, 并与实验测量数据进行比较, 以验证程序的准确性。结果表明, 新探测系统对  $\alpha$  衰变粒子的探测效率可达到 88% 左右, 对能量在 1 MeV 的  $\gamma$  射线全能峰的探测效率约为 7%。

**关键词:** 充气反冲核谱仪; 焦平面探测器; GEANT4 模拟; 探测效率

**中图分类号:** O571.53

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.38.2021014

## 1 引言

探索原子核质量数存在的极限, 研究超重原子核衰变模式以及核结构, 合成新核素是当前核物理学研究的重要前沿领域<sup>[1-3]</sup>。

中国科学院近代物理研究所的充气反冲核谱仪 SHANS<sup>[4]</sup>(Spectrometer of Heavy Atoms and Nuclear Structure) 是用于重核和超重核的实验研究装置。近年来, 利用该装置在缺中子的锕系核区已经合成近十种新核素 ( $^{205}\text{Ac}$ ,  $^{215,216}\text{U}$ ,  $^{219,220,222,223,224}\text{Np}$ )<sup>[5-9]</sup>, 并研究了其  $\alpha$  衰变的性质。在该装置中, 入射束流与靶核通过重离子熔合蒸发反应产生带有不同电荷的反冲余核, 这些反冲余核经与稀薄气体 (氢气) 多次碰撞后最终达到电荷平衡态。实验过程中, 可通过设置合适的磁场强度实现对具有平衡电荷态的反冲余核的分离, 分离出的目标核再被送到低本底区的探测系统进行测量和鉴别。由于超重核或近质子滴线核素产生截面非常低 (一般小于 1 nb), 经过很长的束流时间, 只能合成有限的几个目标核, 而经过选择的反冲产物中, 还包含大量的本底粒子。因此, 高效率的探测系统以及可靠的鉴别手段是

开展相关研究的重要前提。为了进一步满足实验的要求, 尤其是增加  $\alpha$  衰变粒子和  $\gamma$  射线的探测效率, 我们计划对 SHANS 谱仪上的焦平面探测阵列进行升级。本工作对建设中的新焦平面探测系统进行探测效率的蒙特卡罗模拟, 以对该探测系统的设计进行优化。

本工作首先利用 GEANT4<sup>[10-12]</sup> 蒙特卡罗程序对目前正在使用的探测器阵列进行模拟, 得到焦平面探测器对注入反冲核发射的  $\alpha$  衰变粒子的探测效率以及 CLOVER 探测器对  $\gamma$  放射源的探测效率, 将模拟计算结果与实验数据进行比对, 以验证模拟的可靠性。在此基础上对即将建设的新探测系统的性能进行模拟, 为其优化设计提供参考。

## 2 焦平面探测系统

SHANS 谱仪焦平面的探测阵列由硅盒 (Si-box) 探测器, 反符合 (VETO) 探测器及 HpGe、CLOVER 探测器组成, 如图 1(a) 所示。

Si-box 探测器由 3 块并排放置的电阻分配型位置灵敏硅条探测器 (PSSD 探测器) 和周围 8 块非位置灵敏型

收稿日期: 2021-02-10; 修改日期: 2021-03-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11975279, U1732270, 11965003, 11505035, 11675266); 国家重点研发计划项目 (2018YFA0404402); 中国科学院战略性先导科技专项 (B 类)(XDB34010000); 广西自然科学基金资助项目 (2017GXNSFAA198160, 2017GXNSFGA198001); 广西高等学校高水平创新团队及卓越学者计划资助

作者简介: 温小江 (1993-), 男, 广西河池人, 硕士研究生, 从事原子核物理研究; E-mail: 799613208@qq.com

† 通信作者: 张志远, E-mail: zhangzy@impcas.ac.cn; 周厚兵, E-mail: zhb@mailbox.gxnu.edu.cn.

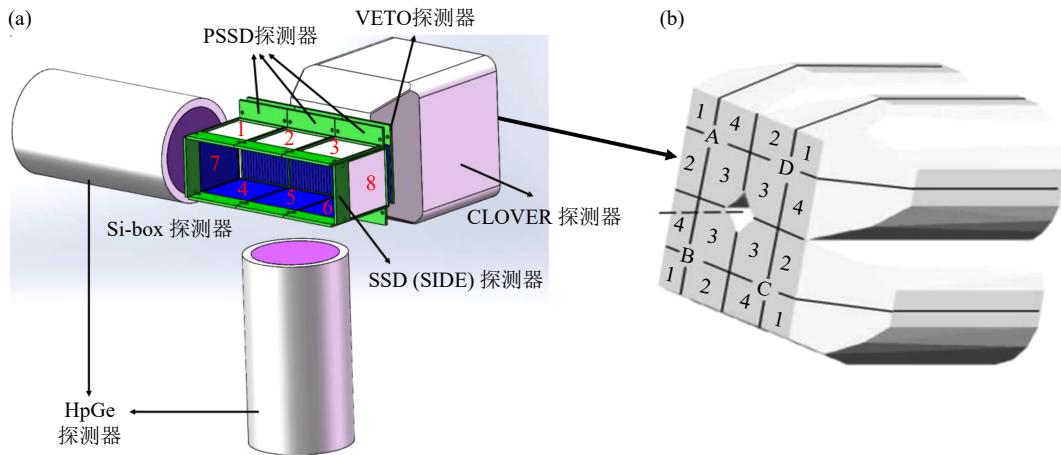


图 1 (在线彩图)GEANT4 构建的焦平面探测阵列模型 (a) 及 CLOVER 晶体模型示意图 (b)

方硅探测器 (SSD 探测器) 组成, 形成一个向着束流方向开口的盒子形状。每块 PSSD 探测器的灵敏面积为  $50\text{mm} \times 50\text{mm}$ , 正面被竖直等分为 16 条, 每条的宽度为  $3\text{mm}$ , 长度为  $50\text{mm}$ , 主要用来探测反冲余核的注入信号及其随后的衰变信号。在 PSSD 四周围绕有 8 块 SSD 探测器, 每块探测器的灵敏面积为  $50\text{mm} \times 50\text{mm}$ , 主要用来探测从 PSSD 中逃逸的  $\alpha$  粒子。在 Si-box 探测阵列后端的 VETO 探测器由 3 块非位置灵敏的方硅探测器组成, 每块灵敏面积与 SSD 探测器相同, 主要用来探测穿出 PSSD 的轻带电粒子 (例如  $^1\text{H}$ 、 $^2\text{H}$ 、 $^3\text{H}$  以及  $\alpha$  粒子等)<sup>[13]</sup>。所有硅探测器的灵敏层厚度均为  $300\mu\text{m}$ 。Si-box 探测阵列与外部通过铝制腔体进行隔离, 隔离窗的厚度为  $1.5\text{mm}$ 。

在距离 VETO 探测器后表面  $13.5\text{mm}$  处安装了一台 CLOVER 探测器, 它由四个紧密排列的同轴 Ge 晶体组成 [见图 1(b)], 每个晶体的长为  $90\text{mm}$ , 半径为  $30\text{mm}$ , 单个晶体又切割成四部分<sup>[14]</sup>, 每个晶体对  $1.33\text{MeV}$  的  $\gamma$  射线的相对探测效率为  $40\%$ 。

Si-box 探测阵列的侧面, 安装有两台 HpGe 探测器, 侧面 HpGe 探测器距离 SSD  $24.7\text{mm}$ , 下方 HpGe 探测器距离 SSD  $45.2\text{mm}$ , 该探测器晶体直径为  $71\text{mm}$ 、长度为  $72\text{mm}$ , 对  $1.33\text{MeV}$  的  $\gamma$  射线的相对探测效率为  $70\%$ 。Si-box 探测阵列周围的 CLOVER 探测器、HpGe 探测器, 主要用于探测与反冲余核相关联的  $\gamma$  射线或 X 射线。这些探测器的周围放置铅砖, 以减少环境本底的影响。

### 3 蒙特卡罗模拟程序及模拟方法

#### 3.1 GEANT4 程序

目前应用比较广泛的蒙特卡罗程序有 FLUKA<sup>[15-17]</sup>、

GEANT4 和 EGS4<sup>[18]</sup> 等。本工作使用 GEANT4 对探测系统进行模拟。

GEANT4(GEometry ANd Tracking 4) 是一种由欧洲核子中心 (CERN) 和日本高能物理中心 (KEK) 联合开发的面向对象、开放源代码、基于 C++ 语言的蒙特卡罗模拟软件, 主要用于模拟粒子输运和粒子与物质相互作用过程。因其具有可视化、粒子追踪、可以处理复杂的几何体等优点, 在核物理和粒子物理等方面获得了广泛的应用。在 GEANT4 程序中, 包含多种描述粒子与物质相互作用的物理模型, 用户可根据需要选择不同的数据库和物理模型或将不同物理过程结合使用。

#### 3.2 模拟方法

使用 GEANT4 对探测器进行模拟, 可以分为以下几个步骤: 构建探测器的几何模型, 设置粒子源, 选择物理过程及数据输出。下面对每一步进行说明。

首先, 构建探测器的几何模型。为了使模拟结果尽可能可靠, 整个探测系统的几何形状、尺寸、材料和距离的构建都尽可能接近真实的探测器<sup>[19]</sup>。Si-box 探测阵列和 Ge 探测器均是经过 SolidWorks 软件以 1:1 尺寸构建, 再将构建好的模型转化为 GDML(Geometry Description Markup Language)<sup>[20]</sup> 格式应用到 GEANT4 中。图 1 为经过 SolidWorks 创建的 1:1 比例的焦平面探测系统模型。

其次, 设置粒子源。在 GEANT4 中, 源的设置有两种方法, 分别是 Particle Gun 和 General Particle Source(GPS)<sup>[10]</sup>, 本次模拟选用的是 GPS 方法, 包括设定源的种类、能量、类型、位置、大小等, 模拟中设置源所放出的射线为全空间各向同性。

最后, 选择物理过程及数据输出。GEANT4 模拟中需要给定粒子与物质相互作用的物理过程模型, 本工

作中选取的是 Livermore 物理列表<sup>[21]</sup>中的低能电磁过程。在数据输出方面, GEANT4 提供了专门的数据输出机制, 对于特定的几何模型, 只需要设置好灵敏元, 数据信息会收集并沉积在灵敏元内, 所有的原始数据都使用 CERN 开发的 ROOT<sup>[22]</sup> 软件进行统计分析, 并与实验的结果进行比较。

## 4 模拟结果

### 4.1 现有 Si-box 阵列的模拟及与实验数据的对比

本工作对现有 Si-box 阵列的探测效率进行了模拟, 其中实验数据选取的反应道是  $^{175}\text{Lu}(^{40}\text{Ar}, 4n)^{211}\text{Ac}$ 。实验是在兰州重离子加速器国家实验室 (HIRFL) 进行的。利用电子回旋共振 (ECR) 离子源产生能量为 189 MeV 的强流重离子束流  $^{40}\text{Ar}^{11+}$ , 经扇聚焦回旋加速器 (SFC) 加速后, 轰击质量厚度为  $400 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  的  $^{175}\text{Lu}$  靶, 进而发生熔合蒸发反应, 通过  $4n$  反应道产生激发能为 20.5 MeV 的  $^{211}\text{Ac}$  并注入到 PSSD 中, 随后在其中发生衰变放出能量为 7.47 MeV 的  $\alpha$  粒子。实验得到的  $\alpha$  粒子在 PSSD 的位置分布如图 2(a) 所示,  $\alpha$  能谱如图 3(a) 所示, 探测器能量分辨为 40 keV。基于内参考源刻度后, 提取了每块硅对能量为 7.47 MeV 的  $\alpha$  粒子的绝对探测效率 (见表 1)。

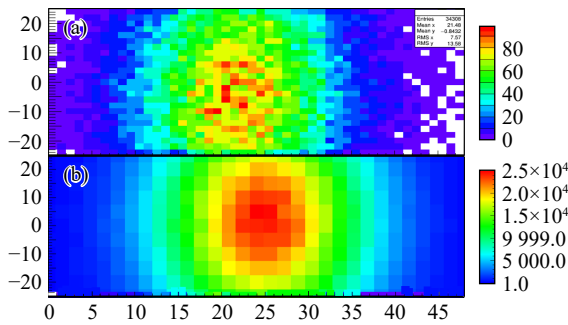


图 2 (在线彩图)  $\alpha$  粒子在 PSSD 中的位置分布 (a) 为实验数据, (b) 为模拟结果。

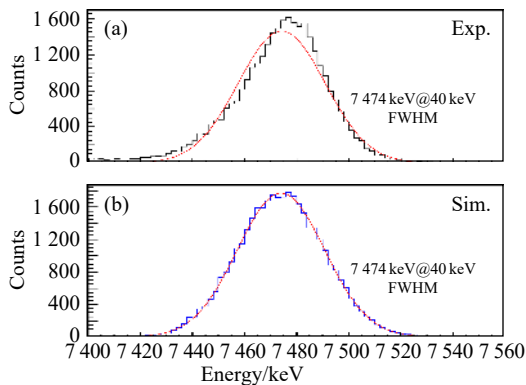


图 3 (在线彩图) 实验探测到的  $\alpha$  粒子能谱及 GEANT4 模拟得出的  $\alpha$  能谱

表 1 现有 Si-box 阵列的  $\alpha$  探测效率结果对比

探测器类型	模拟值/%	实验值/%
PSSD	54	54
SSD1	2.50	2.04
SSD2	6.30	2.75
SSD3	2.50	1.37
SSD4	2.48	1.99
SSD5	6.29	3.81
SSD6	2.46	1.33
SSD7	2.39	2.04
SSD8	2.34	1.49
求和	27.3+54=81.3	17.8+54=71.8

为了在模拟中再现实验结果, 首先, 采用 SolidWorks 以 1:1 的比例构建了 Si-box 探测阵列的模型 (见图 1); 其次, 通过 SRIM<sup>[23-24]</sup> 程序对反冲余核注入 PSSD 的过程进行了模拟, 得出能量为 20.5 MeV 的  $^{211}\text{Ac}$  在 PSSD 中的注入深度为  $3.83 \mu\text{m}$ 。因此, 在对 Si-box 阵列的探测效率模拟过程中, 设置  $^{211}\text{Ac}$  核在 PSSD 中的注入深度为  $3.83 \mu\text{m}$ , 衰变过程放出的  $\alpha$  粒子能量为 7.47 MeV。根据实验时的束流情况及 PSSD 在 7.47 MeV 下的能量分辨, 模拟时源的类型采用全空间各向同性  $\alpha$  源, 以高斯分布布居在 PSSD 的灵敏面积内, 设置 PSSD 的能量分辨为 40 keV, 模拟的事件总数为  $10^5$  个。如图 2 所示,  $\alpha$  粒子在 PSSD 上位置分布的模拟结果很好地重现了实验数据。此外, 针对该  $\alpha$  粒子的能谱也进行了模拟, 结果如图 3 所示, 同样再现了实验探测到的  $\alpha$  粒子全能峰及其探测器的能量分辨。

对 Si-box 阵列探测效率的模拟过程中, 由于反冲余核种类繁多且伴随有大量本底, 因此实验过程中很难得知注入 PSSD 中反冲余核的数目, 这为准确测量 PSSD 的探测效率带来了困难。本工作中, 考虑反冲余核注入深度和  $\alpha$  粒子的能量及射程后, 用 SRIM 模拟得到 PSSD 的探测效率为 54%, 故在模拟时假定 PSSD 的  $\alpha$  探测效率为 54%。表 1 中分别给出了 Si-box 阵列探测效率的实验数据和模拟结果, 其中 SSD 的序号对应图 1 中的序号, SSD 探测效率计算方法如下

$$\varepsilon_{\text{SSD}} = \frac{\text{全能峰计数}_{(E_{\text{PSSD}}+E_{\text{SSD}})}}{\text{全能峰计数}_{E_{\text{PSSD}}}} \times 54\% \quad (1)$$

通过比较发现 Si-box 阵列的模拟值与实验测量值总体符合较好, 但模拟结果高于实验值, 原因可能是来自模拟或探测器的电子学性能。

### 4.2 CLOVER 探测器的模拟及与实验数据的比较

Ge 探测器阵列的空间布局见图 1, 其中 CLOVER

探测器在铝腔体的正后方，另外 2 个 HpGe 探测器分别在铝腔体的侧方和下方。如图 4 所示，实验测量时，分别将三种不同的标准  $\gamma$  源 ( $^{60}\text{Co}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ ) 放置于铝腔体正前方距 PSSD 112.1 mm 处，每一种源的测量时间为 10 min，各  $\gamma$  源能谱如图 5(a~c) 所示。基于实验数据，我们提取了 CLOVER 探测器的绝对探测效率 (如图 6 所示)，其中实验测量误差由误差传递公式 [25] 计算得到。在模拟过程中，我们分别对 CLOVER 探测器的能谱和探测效率均进行了模拟。如图 5 所示， $\gamma$  能谱的模拟结果很好地再现了实验数据在低能区域产生的康普顿平台，以及放射源的各条  $\gamma$  射线特征峰。由于模拟的物理过程中没有考虑 X 射线的产生过程，故实验中在低能端探测到的 X 射线峰 (图 5 中红色框所示) 没有出现在模拟的结果中。使用 GEANT4 对 CLOVER 探

测器模拟得到的效率曲线如图 6 中的实线所示，模拟结果很好地再现了实验数据。

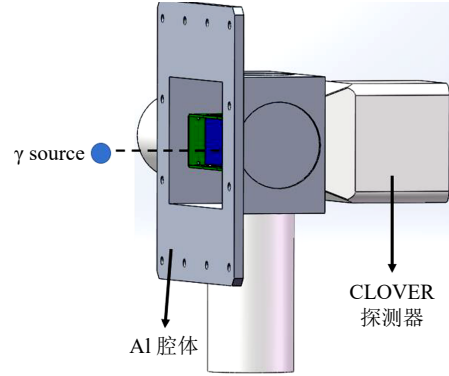


图 4 (在线彩图) 实验测量示意图

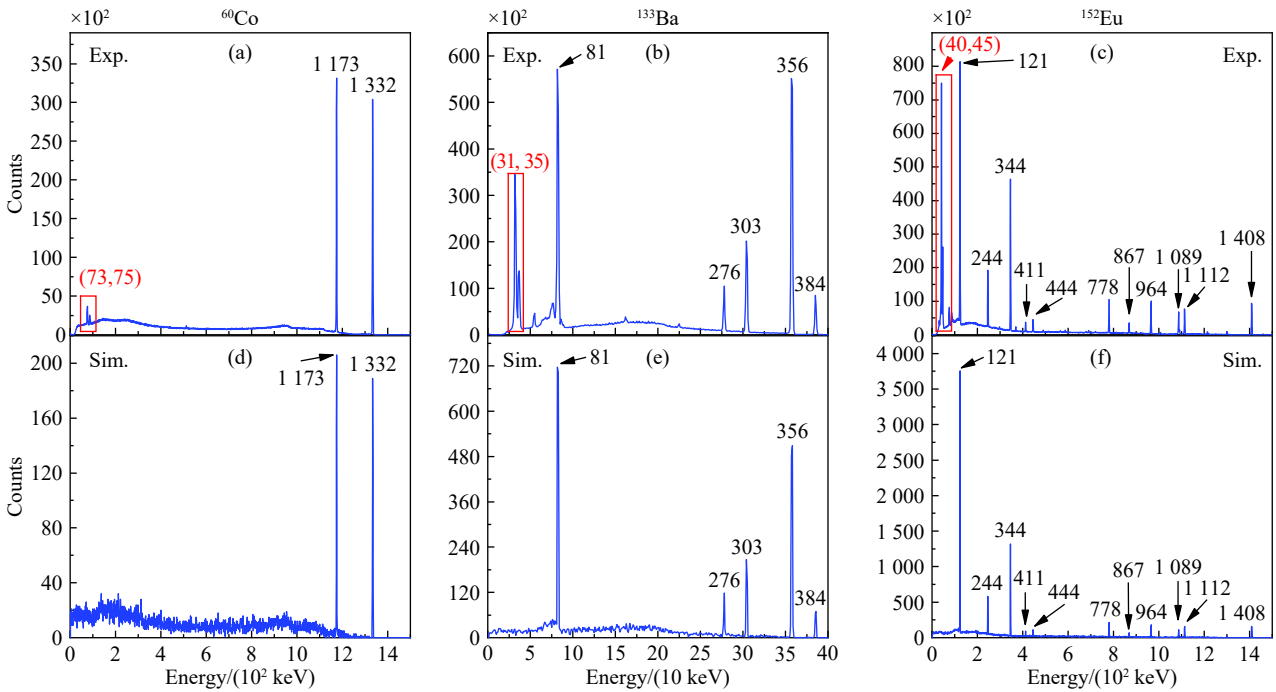


图 5 (在线彩图) 采用 CLOVER 探测到的  $^{60}\text{Co}$ 、 $^{133}\text{Ba}$  和  $^{152}\text{Eu}$  标准源的实验能谱及模拟结果

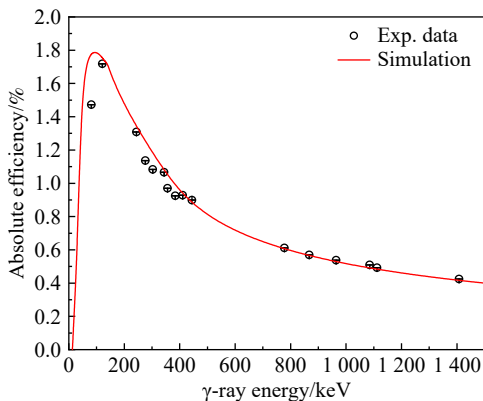


图 6 (在线彩图) CLOVER 探测效率的实验测量值与模拟结果

综上所述，通过分别比较 Si-box 探测阵列和 CLOVER 探测器的模拟结果与实验数据，证实了本工作所建立的 GEANT4 物理模型的正确性和可靠性，可用于对新探测系统的模拟计算。

## 5 新探测器阵列模拟

### 5.1 新 Si-box 探测阵列及其模拟

如图 7 所示，拟新建的硅盒探测阵列与现有的 Si-box 探测阵列空间布局类似。为进一步提高该阵列对重核素  $\alpha$  衰变粒子的探测效率，将采用 Micron 公司生产的 BB17 型号的双面硅条位置灵敏型探测器 (DSSSD)、

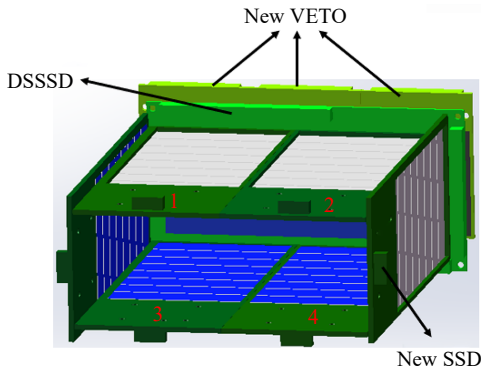


图 7 (在线彩图)新 Si-box 探测阵列示意图

W4 型号的位置灵敏型硅探测器以及 MSX25 型号的非位置灵敏型硅探测器。其中 DSSSD 的灵敏面积为  $48\text{ mm} \times 128\text{ mm}$ ，正面被水平等分为 48 条，每条长度为 128 mm，背面(欧姆面)被竖直等分为 128 条，每条的长度为 48 mm，正面、背面的条宽均为 1 mm，将探测器分成  $128 \times 48$  个  $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$  的小区域；W4 型号硅探测器将替换原 SSD 探测器，其灵敏面积为  $120\text{ mm} \times 63\text{ mm}$ ，正面被竖直等分为 8 条，每条的长度为 63 mm，宽度为 15 mm；MSX25 型号硅探测器将作为反符合(VETO)探测器，灵敏面积为  $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 。考虑到 DSSSD 上的排针对搭建探测器的影响，W4 型号探测器与 DSSSD 的距离为 6.6 mm，而在 SHANS 谱仪原有的 Si-box 探测阵列中，SSD 与 PSSD 的距离为 1.6 mm。新 Si-box 探测阵列与外部也是通过铝制腔体进行隔离，隔离窗厚度为 1.5 mm。

新 Si-box 探测阵列的  $\alpha$  模拟与原 Si-box 阵列模拟时的条件相同，该阵列探测效率的模拟结果如表 2 所列，结果表明，其最大探测效率可达： $33.8\% + 54\% = 87.8\%$ ，比现有的 Si-box 阵列的  $\alpha$  总探测效率提高了 6.5%。

表 2 新 Si-box 探测阵列的  $\alpha$  探测效率结果

探测器类型	模拟值/%
DSSSD	54
W4型探测器1	6.26
W4型探测器2	6.16
W4型探测器3	6.22
W4型探测器4	6.10
W4型探测器5	4.54
W4型探测器6	4.56
求和	$33.8 + 54 = 87.8$

### 5.2 新 Ge 探测阵列模拟

新探测系统中，在 Si-box 探测阵列正后方将继续使用 CLOVER 探测器，但与原探测系统不同的是 Hp-

Ge 探测器的数目将增加至 4 个(位于铝腔体四周)，且所有 Ge 探头与铝腔体的距离拉近至 2 mm(见 图 8)。CLOVER 探测器及 HpGe 探测器的晶体尺寸、探测效率、能量分辨等参数与焦平面原探测系统采用的 Ge 探测器一致。

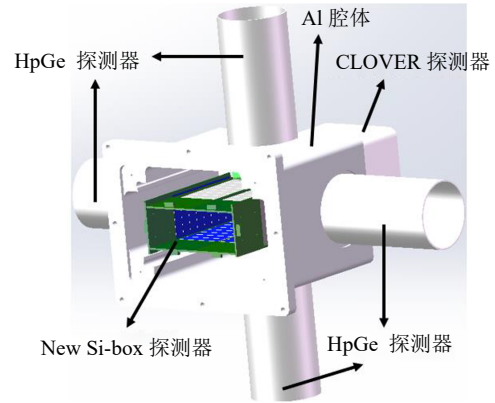


图 8 (在线彩图)Ge 探测阵列示意图

在对新 Ge 探测阵列的模拟过程中，粒子源采用注入型全空间各向同性的  $\gamma$  源，其注入深度设置为  $3.83\text{ }\mu\text{m}$ ，对 0~1500 keV 能量范围内的探测效率进行了模拟，结果如图 9 所示。可以发现， $\gamma$  的总探测效率在 100 keV 时达到最大，约为 22%；其中对 1 MeV 的  $\gamma$  射线全能峰的探测效率约为 7%。

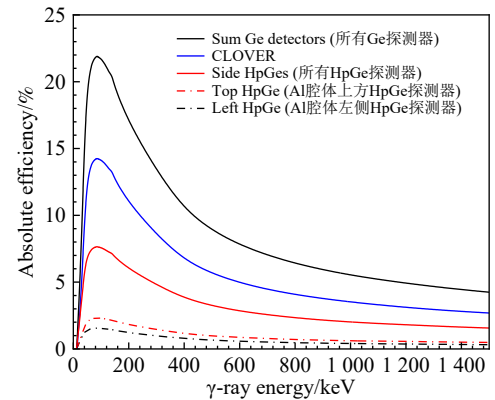


图 9 新 Ge 探测阵列的  $\gamma$  绝对探测效率

## 6 总结

本工作使用 GEANT4 蒙特卡罗模拟程序对 Si-box 探测器构建了合理的理论模型，模拟了 Si-box 的  $\alpha$  粒子探测效率和 CLOVER 探测器的  $\gamma$  能谱、 $\gamma$  射线探测效率，并将模拟结果与实验数据比较，结果表明： $\alpha$  粒子的模拟与实验结果具有较好的一致性，证实了模型的可靠性；对于  $\gamma$  射线的模拟，其能谱和探测效率均很好地再现了实验结果。此外，在对现有谱仪探测器阵列模拟

的基础上,对 SHANS 谱仪上即将升级的焦平面探测系统进行了理论建模,模拟了其  $\alpha$  粒子的探测效率和  $\gamma$  射线的探测效率。相比于现有的探测器阵列,新 Si-box 探测阵列的  $\alpha$  探测效率最高可达约 88%;  $\gamma$  的总探测效率在 100 keV 时达到最大,约为 22%。总体来看,GEANT4 的模拟结果是合理可靠的,可以为后续探测系统的建设提供参考。

#### 参考文献:

- [1] HOFMANN S, MÜNZENBERG G. *Rev Mod Phys*, 2000, 72: 733.
- [2] OGANESSIAN Y T, SOBICZEWSKI A, TER-AKOPIAN G M. *Physica Scripta*, 2017, 92(2): 023003.
- [3] MORITA K. *Nuclear Physics A*, 2015, 944: 30.
- [4] ZHANG Z Y, MA L, GAN Z G, et al. *Nuclear Instr and Meth B*, 2013, 317: 315.
- [5] ZHANG Z Y, GAN Z G, MA L, et al. *Phys Rev C*, 2014, 89(1): 014308.
- [6] YANG H B, ZHANG Z Y, WANG J G, et al. *European Physical Journal A*, 2015, 51(7): 88.
- [7] MA L, ZHANG Z Y, GAN Z G, et al. *Phys Rev C*, 2015, 91(5): 051302.
- [8] YANG H B, MA L, ZHANG Z Y, et al. *Phys Lett B*, 2017, 777: 212.
- [9] HUANG T H, ZHANG W Q, SUN D, M, et al. *Phys Rev C*, 2018, 98(4): 044302.
- [10] Geant4 Collaboration. Geant4 User' s Guide for Application Developers [EB/OL].[2021-01-23]. <http://www.geant4.org/>.
- [11] AGOSTINELLI S, ALLISON J, AMAKO K, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2003, 506(3): 250.
- [12] ALLISON J, AMAKO K, APOSTOLAKIS J, et al. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2006, 53(1): 270.
- [13] ZHANG Mingming.  $\alpha$ -decay Studies of the Neutron-deficient Nuclides  $^{218}\text{Pa}$  and  $^{219}\text{U}$ [D]. Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 2020: 115. (in Chinese)  
(张明明. 极缺中子核素  $^{218}\text{Pa}$ 和 $^{219}\text{U}$ 的 $\alpha$ 衰变研究[D]. 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 2020: 115.)
- [14] LI G S, LIZARAZO C, GERL J, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2018, 890: 148.
- [15] MARK S, KHOMCHENKO S, SHIFRIN M, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2007, 572(2): 929.
- [16] FASSÒ A, FERRARI A, RANFT J, et al. New Developments in Fluka Modelling of Hadronic and em Interactions[C]//Workshop on Simulating Accelerator Radiation Environments. 1997.
- [17] PORTA A, AGOSTEO S, CAMPI, et al. *Radiation Protection Dosimetry*, 2006, 121(3): 211.
- [18] NELSON W, NAMITO Y. The EGS4 code system: Solution of Gammaray and Electron Transport Problems[Z]. 1990.
- [19] ANDREYEV A, BUTLER P, PAGE R, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2004, 533(3): 422.
- [20] CHYTRACEK R, MCCORMICK J, POKORSKI W, et al. *Nuclear Science, IEEE Transactions on*, 2006, 53: 2892.
- [21] CIRRONE G, CUTTONE G, DI ROSA F, et al. *Nucl Instr and Meth A*, 2010, 618(1): 315.
- [22] BRUN R, RADEMAKERS F. *Nucl Instr and Meth A*, 1997, 389(1): 81.
- [23] ZIEGLER J F. *Nucl Instr and Meth B*, 2004, 219-220: 1027.
- [24] ZIEGLER J F, ZIEGLER M D, BIRSACK J P. *Nucl Instr and Meth B*, 2010, 268(11-12): 1818.
- [25] Fudan University, Tsinghua University, Peking University. Experimental Methods of Nuclear Physics[M]. 2nd ed. Beijing: Atomic Energy Press, 1997.6. (in Chinese)  
(复旦大学, 清华大学, 北京大学. 原子核物理实验方法[M]. 2版. 北京: 原子能出版社, 1997: 6.)

## GEANT4 Simulation of the Focal Plane Detection Array of Gas-filled Recoil Separator

WEN Xiaojiang<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhiyuan<sup>2,3,†</sup>, ZHOU Houbing<sup>1,4,†</sup>, ZHANG Mingming<sup>2</sup>, LI Guangshun<sup>2</sup>, WANG Jianguo<sup>2</sup>,  
GAN Zaiguo<sup>2,3</sup>, MA Long<sup>2</sup>, HUANG Minghui<sup>2,3</sup>, YANG Huabin<sup>2</sup>, YANG Chunli<sup>2,3</sup>

(1. Department of Physics, Guangxi Normal University, Guilin 541004, Guangxi, China;

2. CAS Key Laboratory of High Precision Nuclear Spectroscopy, Institute of Modern Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

3. School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. Guangxi Key Laboratory Breeding Base of Nuclear Physics and Technology, Guangxi Normal University,  
Guilin 541004, Guangxi, China)

**Abstract:** The gas-filled recoil nuclear separator SHANS(Spectrometer for Heavy Atoms and Nuclear Structure) is an important experimental device for synthesizing new neutron-deficient actinide nuclides and studying  $\alpha$  decay properties of heavy nuclides in China. In order to further improve the detective efficiency of the focal plane detector array for heavy nuclide  $\alpha$  decay particles and  $\gamma$  rays, we plan to upgrade the existing detection instrument. The main work of this paper is to simulate the existing detector array by using the GEANT4 software based on Monte Carlo method. In order to verify the accuracy of the program, the simulation was compared with the experimental data. The results show that the detective efficiency of the new detector system for  $\alpha$  decay particles is about 88%, and the detective efficiency for  $\gamma$  rays with an energy of 1 MeV is about 7%.

**Key words:** gas-filled recoil separator; focal plane detector; GEANT4 simulation; detective efficiency

---

**Received date:** 10 Feb. 2021; **Revised date:** 31 Mar. 2021

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(11975279, U1732270, 11965003, 11505035, 11675266); National Key R&D Program of China(2018YFA0404402); National Key R&D Program of China(2018YFA0404402); Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences(XDB34010000); Natural Science Foundation of Guangxi, China(2017GXNSFAA198160, 2015GXNSFDA139004); Foundation of Guangxi Innovative Team and Distinguished Scholar in Institutions of Higher Education

† **Corresponding author:** ZHANG Zhiyuan, E-mail: [zhangzy@impcas.ac.cn](mailto:zhangzy@impcas.ac.cn); ZHOU Houbing, E-mail: [zhb@mailbox.gxnu.edu.cn](mailto:zhb@mailbox.gxnu.edu.cn).