

CeBr₃探测器 γ 辐射性能的GEANT4模拟

李生根, 刘 洋*

华北电力大学核科学与工程学院, 北京

收稿日期: 2024年3月29日; 录用日期: 2024年4月10日; 发布日期: 2024年7月30日

摘 要

砂岩型铀矿资源定量分析是我国研究的主攻方向, 现有“直接铀定量”技术受探测晶体限制, 不能很好的提取^{234m}Pa特征峰。CeBr₃晶体作为一种高性能无机闪烁体材料, 在核测井、环境监测、核医学等领域得到了广泛应用。本文使用Geant4建立CeBr₃探测器的探测模型, 对影响探测器探测性质的相关因素进行研究。结果表明: 在相同截面积条件下, 相较于长方形截面, 正方形和圆形截面的CeBr₃闪烁体表现出更高的探测效率, 其中圆形截面的探测效率最优, 同时伴有最大能量沉积。此外, 随着入射能量的增加, CeBr₃闪烁体的探测效率呈现出下降趋势。当其他条件一致时, 选用不同的反射层材料, 对探测效率的并无明显影响。通过探测器探测性质的影响因素分析, 对基于CeBr₃探测器研究和设计具有一定的参考价值和指导意义。

关键词

CeBr₃探测器, γ 射线探测, Geant4, 探测效率

GEANT4 Simulation of Gamma Radiation Performance of CeBr₃ Detector

Shenggen Li, Yang Liu*

School of Nuclear Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing

Received: Mar. 29th, 2024; accepted: Apr. 10th, 2024; published: Jul. 30th, 2024

Abstract

Quantitative analysis of sandstone uranium resources is the main research direction in China. The existing technology for “direct uranium quantification” is limited by the detection crystal, which cannot extract the characteristic peaks of ^{234m}Pa. CeBr₃ crystal, a high performance inorganic scin-

*通讯作者。

文章引用: 李生根, 刘洋. CeBr₃探测器 γ 辐射性能的 GEANT4 模拟[J]. 核科学与技术, 2024, 12(3): 252-262.

DOI: 10.12677/nst.2024.123025

tillator material, has been widely used in nuclear well logging, environmental monitoring and nuclear medicine. This paper investigates the factors affecting the detection characteristics of the CeBr_3 detector by establishing its detection model using Geant4. The results show that CeBr_3 scintillators with square and circular cross sections have higher detection efficiencies than those with rectangular cross sections, with the circular cross-section having the best detection efficiency and maximum energy deposition. Furthermore, the detection efficiency of CeBr_3 scintillators decreases as the incident energy increases. Other things being equal, the choice of different reflective layer materials has no significant effect on detection efficiency. The analysis of the factors influencing the detector properties provides valuable guidance for the research and design of CeBr_3 -based detectors.

Keywords

CeBr_3 Detector, Gamma Ray Detection, Geant4, Detection Efficiency

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

砂岩型铀矿是当今世界重要的铀矿床类型之一, 世界铀资源的三分之一产于沉积砂岩中[1]。作为我国铀资源开发的主攻方向, 其资源量的准确评估对于我国天然铀产业高质量发展意义重大[2]。

自然 γ 测井技术是我国目前进行放射性矿产勘查的主要手段之一, 作为“间接铀定量”技术。它可解决铀含量测定中钍、钾的干扰问题, 但仍须利用铀镭平衡、射气逸出等参数修正校准铀含量[3] [4] [5]。在砂岩型铀矿勘探中, 尤其是地层铀镭、镭氢等平衡关系差异较大或者受到破坏时, 现有技术需要开展岩心取样分析加以修正, 勘探周期长、成本高[6] [7]。 $^{234\text{m}}\text{Pa}$ 是从 ^{234}Th 经 β 衰变产生的短寿命子体(半衰期 1.17 分), 属于 ^{238}U 第 2 代子体, 主要放出能量为 766 keV 和 1001 KeV 的 γ 射线。 ^{234}Th 作为 ^{238}U 第 1 代子体其半衰期为 24.1 日, 因此理论上经过约 241 日, ^{238}U 与 ^{234}Th 即可达到动态平衡状态。2 代子体中 ^{234}Pa 的半衰期为 6.75 小时, 而 $^{234\text{m}}\text{Pa}$ 的半衰期仅为 1.17 分钟, 因此, 在长时间的地质历史中, $^{234\text{m}}\text{Pa}$ 和 ^{238}U 可以被视为始终处于放射性平衡状态, 这意味着我们可以通过测量 $^{234\text{m}}\text{Pa}$ 来直接探测 ^{238}U [8] [9]。但是受探测晶体的限制, 提取 $^{234\text{m}}\text{Pa}$ 特征峰并用于直接测铀一直未被很好实现。

CeBr_3 闪烁体因其优异的性能引起了研究者的广泛关注, 它在高能物理、地质勘探、石油测井、核素识别等领域均有应用[10]。相较于传统的 $\text{NaI}(\text{Tl})$ 、 BGO 、 $\text{CsI}(\text{Tl})$ 、 $\text{CsI}(\text{Na})$ 和 CdWO_4 等无机闪烁晶体, CeBr_3 晶体具有密度高、能量分辨率高、时间分辨率高、响应速度快、发光效率高、衰减时间短等优点[11] [12] [13]。其能量分辨率和衰减时间与 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 晶体相当, 同时具有较优的时间分辨特性; 但 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 闪烁晶体受本身 ^{138}La 本底及康普顿散射的影响, 难以直接识别出 $^{234\text{m}}\text{Pa}$ 衰变释放出 1001keV 的 γ 射线特征[14] [15] [16]。因此新型高能量分辨率 CeBr_3 闪烁体探测器便成为了识别出 $^{234\text{m}}\text{Pa}$ 的最佳选择。表 1 为常见无机闪烁晶体的相关性能参数[17] [18]。

本文使用开源蒙特卡洛程序包 geant4 建立 CeBr_3 闪烁体探测器基本模型。进行了如下研究: 1) 入射 γ 源为 ^{137}Cs (@662keV) 时, 不同截面形状、不同入射能量对闪烁体探测效率和能量沉积的影响。2) 变化 γ 源入射能量时, 探测器分别使用氧化铝(Al_2O_3)、氧化镁粉末(MgO) 和 Teflon 作为反射层, 探究不同反射层的选择对探测器能量分辨率的影响。3) 模拟了 CeBr_3 闪烁体探测器对 ^{40}K 、 ^{232}Th 、 $^{234\text{m}}\text{Pa}$ 等放射性核素

的 γ 响应, 对其典型能量窗进行识别。此次模拟结果, 对 CeBr_3 闪烁体探测器几何构型的选择提供了理论参考。

Table 1. Comparison of performance parameters of several common inorganic scintillation crystal detectors

表 1. 几种常见的无机闪烁晶体探测器性能参数比较

闪烁体	光产额/光子 $\cdot\text{keV}^{-1}$	衰减时间/ ns^{-1}	是否易潮	密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	最佳能量分辨率(@662 keV)
CeBr_3	60	20	是	5.1	<4.0%
$\text{LaBr}_3(\text{Ce})$	63	16	是	5.08	<3.0%
$\text{NaI}(\text{Tl})$	38	250	是	3.67	<7%
BGO	8-10	300	否	7.13	<10%
$\text{CsI}(\text{Tl})$	54	1000	轻微	4.51	<12%
$\text{CsI}(\text{Na})$	41	630	是	4.51	—
CdWO_4	12-15	14000	否	7.90	<7%

2. 理论基础与模拟准备

Geant4 (GEometry ANd Tracking)是由欧洲核子中心(CERN)在 1994 年研发的一款工具, 它采用 C++ 作为基础编程语言, 并基于蒙特卡罗方法来模拟材料中粒子的传输过程。这款工具对所有用户都是开放的, 并且是开源的[19] [20]。它不仅能用于计算原子、分子以及离子等各种体系中核结构参数, 而且可以通过改变初始条件来研究其动力学行为及微观机制, 并可进行相关实验验证。Geant4 因其出色的通用性和可扩展性, 在涉及微观粒子与物质相互作用的多个领域都得到了广泛的应用[21]。

我们的研究基于 Geant4 构建基础模型。图 1 展示了 Geant4 的详细操作过程, 它由 Run、Event、Track、step 这几个部分组成的, 涵盖了粒子源、物理几何学、信息收集与统计等多个方面。Geant4 模拟的步骤如下: 首先粒子发生器生成随机射线粒子, 这些粒子被投射到预先构造的物理几何中, 随后这些射线粒子与物理几何材料发生相应的物理反应。最终, 我们可以获得所需的粒子相关数据。

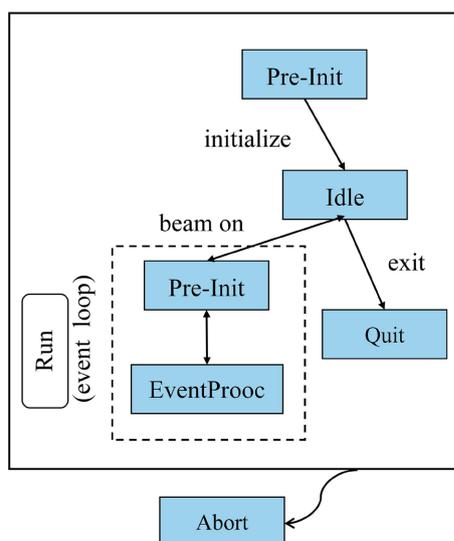


Figure 1. Geant4 operation process

图 1. Geant4 运行过程

2.1. 探测效率

文中使用探测效率来表示 CeBr_3 闪烁体探测器对入射粒子进行探测和检测的能力。探测效率指探测器探测到的粒子数与放射源发射的粒子数之比, 计算公式如(1)所示[22]:

$$e_{\text{绝对}} = \frac{N}{N_0} \quad (1)$$

式中, N 为 CeBr_3 闪烁体探测器探测到的粒子数; N_0 为放射源在探测时间内所发射的粒子总数。

2.2. 探测模型构建

利用 Geant4 工具包和 C++编程构建 CeBr_3 探测器几何模型[23] [24] [25]。 CeBr_3 探测器的 Geant4 模型如图 2 所示。 CeBr_3 探测器位于真空条件下, 其 γ 源为 ^{137}Cs (@662 keV), 这些 γ 光子从探测器轴线的初始位置射出, 并准确地击中探测器前端的中心位置。当射线粒子与探测器材料发生相互作用时, 它们会经历如康普顿散射、光电效应等多种物理变化, 这些变化会导致能量的沉积和闪烁光子的生成[21]。

Geant4 程序通过粒子对光电阴极的响应判断光子的记录情况, 并得到有关数据[26]。

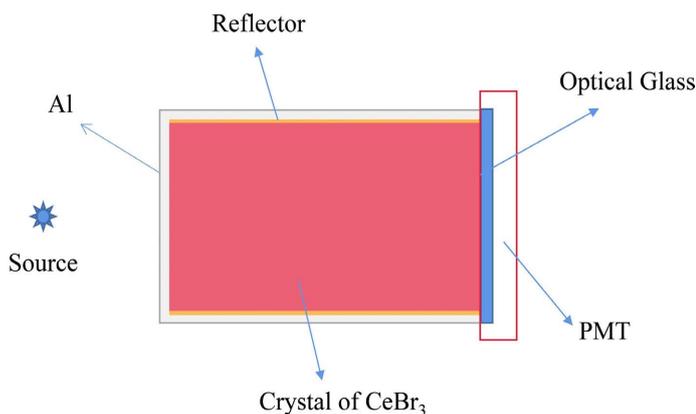


Figure 2. Geant4 model of CeBr_3 detector
图 2. CeBr_3 探测器的 Geant4 模型

针对该模型组件, 整体封装由最外侧 2 mm 厚度的铝质外壳保护壳, 在晶体和保护壳之间包覆一层 0.5 mm 的反射层, 晶体后端为厚度 2 mm 的 SiO_2 光学玻璃, 光电倍增管(PMT)光阴极与光学玻璃紧密耦合。

为了深入分析不同几何形态的 CeBr_3 晶体对探测效率的影响, 我们选取了三种截面: 圆形结构、方形结构以及矩形结构, 其中矩形的设计特点是短边长度为长边的一半。这三种不同截面形状的探测器结构 Geant4 模型如图 3 所示。

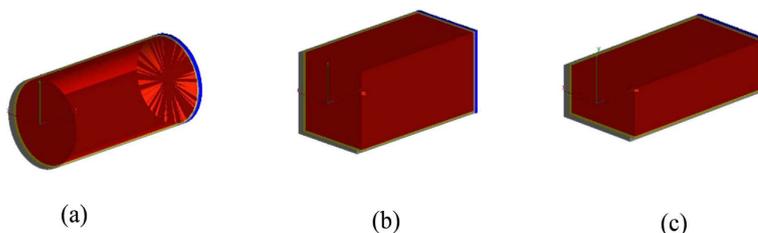


Figure 3. Geant4 configurations of detectors with different cross sections
图 3. 不同截面的探测器的 Geant4 构型

2.3. 参数设置

在探究粒子反应机制时, 重点关注了诸如电磁相互作用及光信号传输等基本物理现象, 这些过程可在 Geant4 软件包内特定的类模块中实现[21]。在构建模型时, 我们有选择性地运用了 Geant4 核心库中的物理过程模型, G4EmStandardPhysics 类用以实现电磁过程的标准处理[23]。同时结合 G4OpticalPhysics 类模拟光学事件的发生。在参数配置阶段, 设定了一项阈值条件, 即只有当单次事件触发的闪烁光子数目超过 10 个时, 方为有效计数, 此举旨在过滤掉微弱的噪声干扰。反射层与晶体之间的边界类型为 dielectric metal, 抛光类型为 ground back painted, CeBr₃ 闪烁体的密度为 5.23 g/cm³; 折射率为 1.9; 光产额率为 60 光子 MeV⁻¹; 光衰减时间 16ns, 光学玻璃窗的折射率为 1.47, 设置的轻质氧化镁反射率为 1。

3. 结果和讨论

3.1. 不同截面形状

本研究重点分析了不同厚度条件下闪烁体的性能及截面形态变化对探测效率的影响。设置了三种具有代表性的截面, 为圆形结构、方形结构以及矩形结构。模拟设置探测器参数时, 应保证三种不同截面的入射截面积相同。

以 ¹³⁷Cs(@662 keV) 为准直源, 共模拟了 5×10^5 个事件。设置闪烁体的横截面固定为 $38^2\pi \text{ mm}^2$, 闪烁体厚度变化范围为 0.15~5.25 英寸(在此范围内尺寸以 0.15 英寸为增量变化), CeBr₃ 晶体三种不同截面的绝对探测效率结果如图 4 所示, 能量沉积如图 5 所示。

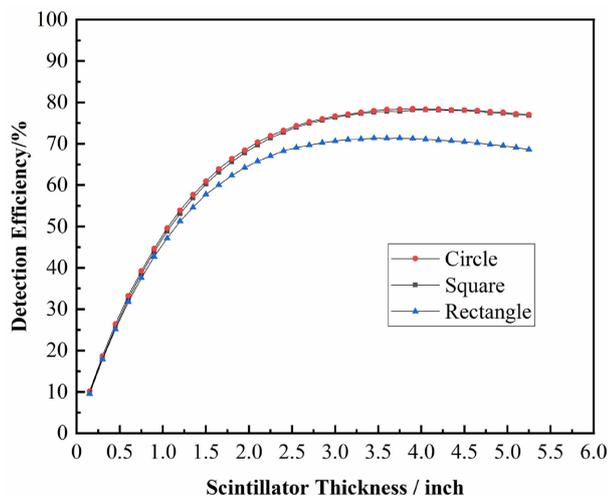


Figure 4. Detection efficiency of different sections and thicknesses
图 4. 不同截面不同厚度的探测效率

图 4 中显示三种形状截面晶体的绝对探测效率的变化。即随晶体厚度增加而增大, 当厚度增加到一定值时开始趋于稳定, 与文献[27]结果一致。这种变化是闪烁体内的光学特性和光学衰减效应共同作用的结果。随着闪烁体厚度的增加, 光子在闪烁体内传输的距离增加。从而使得更多的光子有机会被吸收并转化为光电子, 提高了探测效率。然而, 随着闪烁体厚度的增加, 光子在闪烁体内传输的过程中会受到光学衰减的影响(光学衰减是指光子在传输过程中因吸收和散射而逐渐减弱的现象), 当闪烁体长度较大时, 光子需要通过更长的距离才能到达光阴极, 从而使得记录的光子数目逐渐减少, 这就导致探测效率趋于稳定值。

观察图 4 可以看出, 圆形截面与正方形截面在探测效率曲线上近乎完全吻合, 且两者的探测效率均显著优于长方形截面的情况。究其原因在于, 在保持截面积不变的情况下, 长方形截面的晶体在横向与纵向维度存在较大的尺寸差异, 这导致 γ 光子在闪烁体较短的一轴方向传播时有局限性, 部分粒子无法充分地闪烁体相互作用而被有效检测, 从而造成整体探测效率下降。

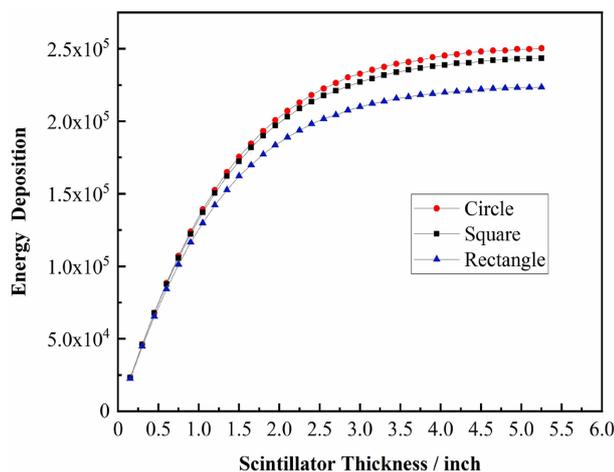


Figure 5. Energy deposition of different sections and thicknesses
图 5. 不同截面不同厚度的能量沉积

从图 5 可以看出能量沉积变化趋势与绝对探测效率相似。这种变化主要由有效截面、多次散射和相互作用以及能量沉积的饱和效应共同决定。随着探测器长度的增加, 入射粒子与探测器物质相互作用的有效横截面积和多次相互作用增加, 导致能量沉积相应增加。然而, 随着长度进一步增加, 能量沉积的饱和效应使其值趋于稳定, 其值将不再增大。

并且从图 5 可看出圆形截面相对于正方形截面来说, 在截面积相同时, 有更高的能量沉积。圆形截面闪烁体因其几何形状的对称性, 具有较好的辐射均匀性, 能够均匀地吸收入射粒子并产生闪烁光信号, 这将减少能量流失, 让更多的能量留在闪烁体中。因此, 若想要得到更好的探测效率, 可以考虑使用圆形截面的 CeBr_3 闪烁体晶体。

3.2. 不同入射能量

从以上结果可以看出, 圆形截面是闪烁体的最佳截面形状。因此, 本节使用圆形截面闪烁体模型, 以 ^{137}Cs (@662 keV) 为准直源, 氧化镁粉末 (MgO) 做反射层, 共模拟了 5×10^5 个事件。入射 γ 射线的能量范围为 0.1~4.5 MeV, 能量间隔为 0.1 MeV。模拟得到不同入射能量下的探测效率和能量沉积, 模拟结果如图 6 和图 7 所示。

基于图 6 所示数据分析可得, 针对较低能量范围内的 γ 射线, 探测效率随着能量增强呈现出上升态势; 然而, 当能量超过某一特定阈值 (大约 0.2 MeV) 之后, 这一趋势发生逆转, 探测效率随能量增加反而逐渐降低, 并最终达到一个稳定的数值区间。

这是因为在低能区域, 外部铅壳与反射层对 γ 射线的衰减作用尤为突出; 随着能量的升高, 衰减效应逐步减轻。与此同时, 能量增强使得闪烁体内发生光子转换事件的可能性增加, 从而导致探测效率呈现上升态势。当能量进入更高层次时, 因能量已超出闪烁体材料诱发荧光所需的临界值, 部分高能粒子具备足够的动能穿透闪烁体。同时, 随着入射能量的增长, 闪烁体内部的光学饱和效应亦逐渐加剧, 吸

收光子的数量经历快速增长后渐趋平衡, 从而使得探测效率过渡至平稳状态。模拟结果与文献[28]中有关高纯锗探测器探测 γ 射线全能峰效率随着能量呈单峰形变化关系的相关研究一致。

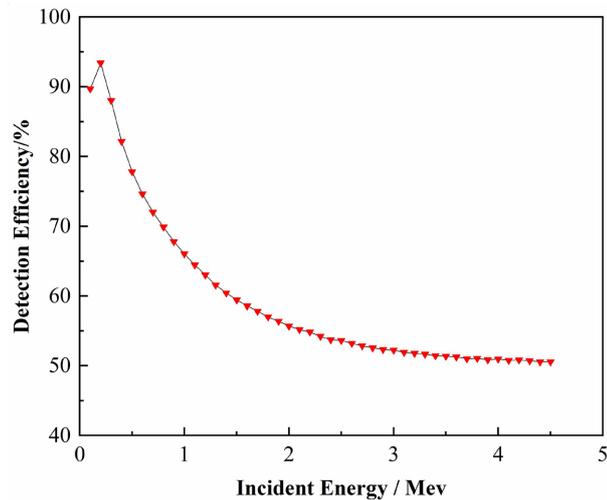


Figure 6. Detection efficiency of different incident energies
图 6. 不同入射能量的探测效率

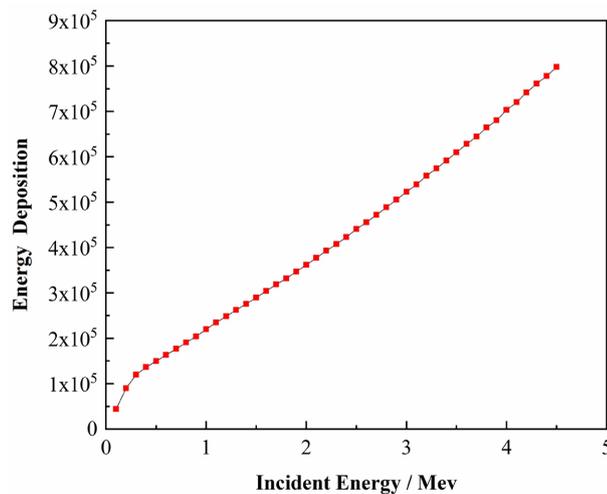


Figure 7. Energy deposition at different incident energies
图 7. 不同入射能量的能量沉积

从图 7 中可以看出, 随着入射能量的增加, 闪烁体内的能量沉积先以较快速度增加, 后增速放缓。造成这种现象的原因为: 初始阶段, 随着入射能量的增加, 入射粒子与闪烁体原子之间的相互作用增多, 导致更多的能量被传递给闪烁体, 因此能量沉积迅速增加。随着入射能量继续增加, 原子内部已被激发或电离, 更多的能量转移到了光子发射和其他损失过程中, 导致能量沉积的增加趋势减缓。

3.3. 不同反射层

本节使用圆形截面闪烁体模型, 分别以氧化铝(Al_2O_3)、氧化镁粉末(MgO)和 Teflon 作为反射层, 入射 γ 射线的能量范围为 0.1~4.5 Mev, 能量间隔为 0.1 Mev, 各模拟了 5×10^5 个事件。模拟结果如图 8 所示。

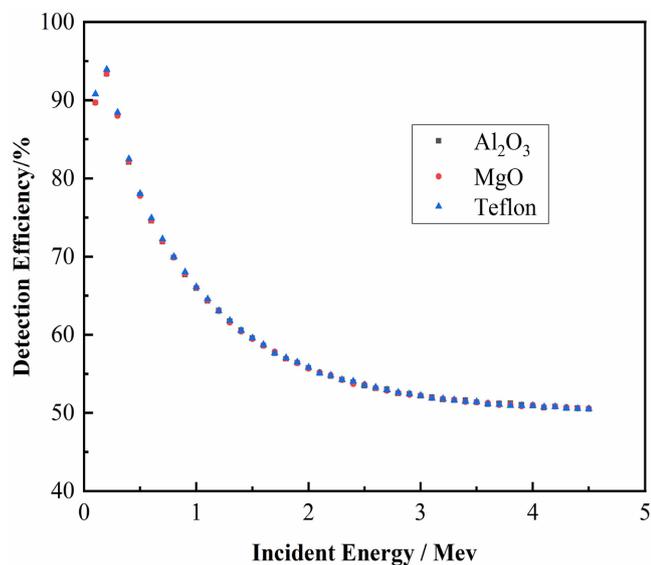


Figure 8. Detection efficiency of different reflectors

图 8. 不同反射层的探测效率

从图 8 可以看出, 其他条件一致, 仅改变反射层的材料时, 闪烁体探测效率并未产生较大差异。因此, 在选用闪烁体反射层材料时, 应综合考虑成本及使用环境等因素。

3.4. 放射性核素 γ 谱

为评估 CeBr_3 闪烁探测器对 $^{234\text{m}}\text{Pa}$ 、 ^{40}K 、 ^{232}Th 等核素的 γ 响应特性, 从而指导 CeBr_3 闪烁晶体探测器的设计和优化。本节使用圆形截面闪烁体模型, 模拟了 5×10^5 个事件, Geant4 程序记录闪烁体内的沉积能量, 频数分布区间隔设置 0.01。模拟结果如图 9~11 所示。从图中可以很明显的看出, ^{40}K 的 1.46 MeV 特征峰, ^{232}Th 的 2.626 MeV 特征峰, $^{234\text{m}}\text{Pa}$ 的 0.662 MeV 稳谱参考峰和 1.001 MeV 特征能峰。模拟结果与实际情况符合良好, 验证了 Geant4 程序模拟的闪烁体探测器在测试核素的伽马能谱时的准确性和可靠性。

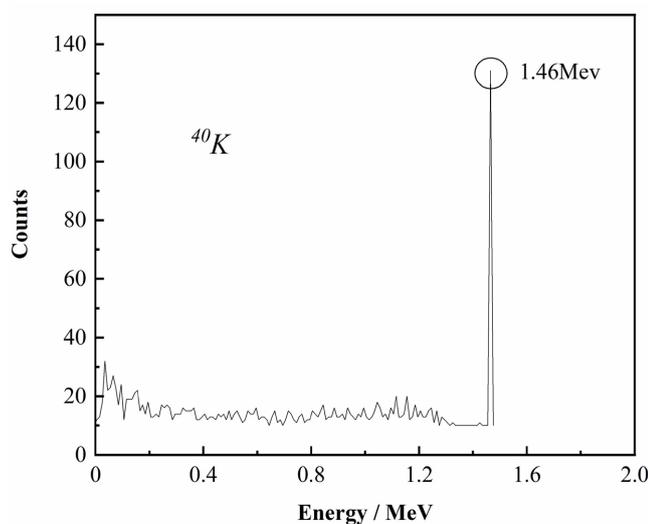


Figure 9. γ -simulated spectrum of ^{40}K

图 9. 核素 ^{40}K 的 γ 模拟谱

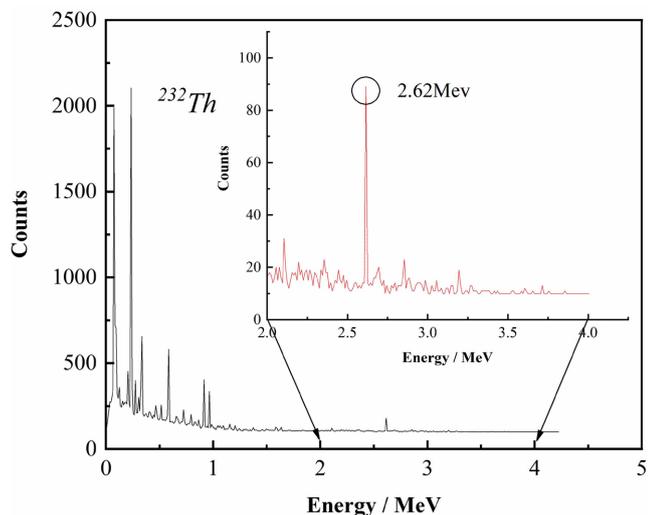


Figure 10. γ -simulated spectrum of ^{232}Th
 图 10. 核素 ^{232}Th 的 γ 模拟谱

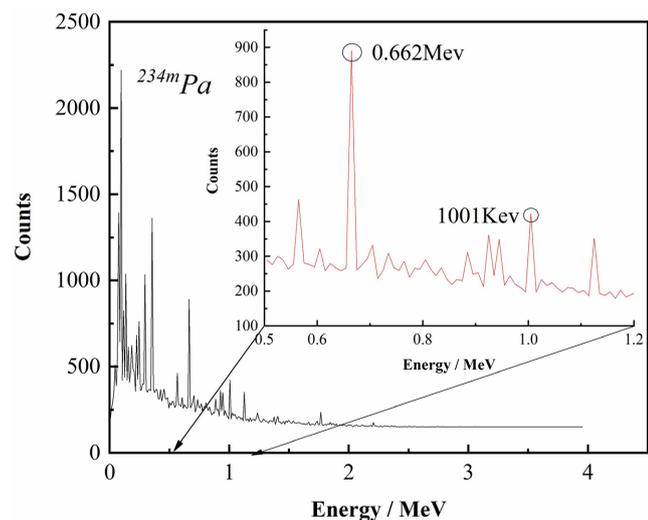


Figure 11. γ -simulated spectrum of $^{234\text{m}}\text{Pa}$
 图 11. 核素 $^{234\text{m}}\text{Pa}$ 的 γ 模拟谱

4. 结语

本研究借助 Geant4 模拟工具, 运用蒙特卡洛方法探讨了 CeBr_3 闪烁体探测效率及其能量沉积与晶体几何形状、厚度、反射层和入射能量的关系。研究表明, 在相同截面积条件下, 相较于长方形截面, 正方形和圆形截面的 CeBr_3 闪烁体表现出更高的探测效率, 其中圆形截面的探测效率最优, 同时伴有最大能量沉积。此外, 随着入射能量的增加, CeBr_3 闪烁体的探测效率呈现出下降趋势。当其他条件一致时, 选用不同的反射层材料, 对探测效率的并无明显影响。

因此, 在优化 CeBr_3 闪烁体探测器设计时, 选用较大直径的圆柱形晶体有望实现更优的探测性能和更高的能量捕获能力。通过运用 Geant4 程序仿真各类影响因素, 我们深化了对 CeBr_3 晶体特性的理解, 这为实际应用中的探测器设计提供了关键指导, 有助于合理选择晶体尺寸, 以避免因尺寸配置不当造成的精度损失, 进而实现资源的有效利用, 包括节省生产和研发成本。本研究仅模拟了与铀含量测量相关

的 ^{234m}Pa 、 ^{40}K 、 ^{232}Th 等单核素能谱, 后续可使用该探测器模型进行含铀矿体的直接定量分析。

基金项目

本研究得到了国家重点研发项目(2022YFB1902700)、国家教育部装备预研联合基金(8091B042203)、国家自然科学基金(11875129)、国家强脉冲辐射模拟与效应重点实验室基金(SKLIPR1810)、辐射应用创新中心基金(KFZC2020020402)、北京大学核物理与技术国家重点实验室基金(NPT2023KFY06)、中国铀业有限责任公司与华东理工大学核资源与环境国家重点实验室联合创新基金(2022NRE-LH-02)、中央高校基础研究基金(2023JG001)等支持。

参考文献

- [1] 王飞飞, 刘池洋, 邱欣卫, 等. 世界砂岩型铀矿探明资源的分布及特征[J]. 地质学报, 2017, 91(9): 2021-2046. <https://doi.org/10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2017.09.008>
- [2] 李钊. 铀矿勘查现状及找矿方向的思考[J]. 冶金与材料, 2023, 43(10): 120-122.
- [3] 汤彬, 吴永鹏, 张雄杰, 等. 高精度能谱测井与 ^{234m}Pa 特征 γ 射线的“直接铀定量”技术[J]. 核技术, 2012, 35(10): 745-750.
- [4] Czubek, J.A. (1972) Pulsed Neutron Method for Uranium Well Logging. *Geophysics*, **37**, 160-173. <https://doi.org/10.1190/1.1440244>
- [5] Givens, W.W. and Stromswold, D.C. (1989) Prompt Fission Neutron Logging for Uranium. *Nuclear Geophysics*, **3**, 299-307.
- [6] 吴永鹏, 汤彬, 程建平, 等. 利用 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 伽马谱仪直接测定铀矿体中铀含量的方法[J]. 物探与化探, 2012, 36(3): 414-417.
- [7] 尹旺明, 刘宏章, 汤彬, 等. 基于 γ 能谱特征峰测定铀矿石样品铀-镭平衡系数[J]. 原子能科学技术, 2010, 44(7): 769-772.
- [8] Ebaid, Y.Y. and Khater, A.E.M. (2017) The Re-Evaluation of the ^{234m}Pa 's 1001.03 keV Gamma Emission Absolute Intensity for the Precise Assessment of ^{238}U . *Journal of Environmental Radioactivity*, **170**, 203-208. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.01.018>
- [9] Yucel, H., Cetiner, M.A. and Demirel, H. (1998) Use of the 1001 keV peak of ^{234m}Pa Daughter of ^{238}U in Measurement of Uranium Concentration by HPGe Gamma-Ray Spectrometry. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research-Section A*, **413**, 74-82. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(98\)00562-2](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(98)00562-2)
- [10] Quaratif, G.A., Dorenbos, P., Vander, B.J., et al. (2013) Scintillation and Detection Characteristics of High Sensitivity CeBr_3 Gamma Ray Spectrometers. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, **729**, 596-604. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2013.08.005>
- [11] Sibczynskip, P., Broslawskia, A., Goiskaa, A., et al. (2017) Characterization of Some Modern Scintillators Recommended for Use on Large Fusion Facilities in Gamma-Ray Spectroscopy and Tomographic Measurements of Gamma-Emission Profiles. *Nukleonika*, **62**, 223-228. <https://doi.org/10.1515/nuka-2017-0032>
- [12] 武欢, 李海林, 何晔, 等. 溴化铯晶体的阴阳离子共掺杂生长方法研究[J]. 压电与声光, 2020, 42(2): 245-247.
- [13] Idoeta, R., Herranz, M., Alegría, N., et al. (2021) Possibilities of the Use of CeBr_3 Scintillation Detectors for the Measurement of the Content of Radionuclides in Samples for Environmental Monitoring. *Applied Radiation & Isotopes*, **176**, Article 109881. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2021.109881>
- [14] 周倩倩, 侯越云, 梁璐成. 一种新型 CeBr_3 闪烁体探测器性能研究[J]. 原子能科学技术, 2018, 52(2): 371-377.
- [15] Kaburagim, M., Shimazoe, K., Kato, M., et al. (2021) Gamma-Ray Spectroscopy with a CeBr_3 Scintillator under Intense γ -Ray Fields for Nuclear Decommissioning. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research-Section A*, **988**, Article 164900. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164900>
- [16] Kaburagim, M., Shimazoe, K., Otaka, Y., et al. (2020) A Cubic CeBr_3 Gamma-Ray Spectrometer Suitable for the Decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research-Section A*, **971**, Article 164118. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164118>
- [17] 张悦, 景泽坤, 郭亚昆, 等. 无机纳米闪烁体的研究进展[J]. 功能材料, 2023, 54(8): 8054-8062.
- [18] Gupta, S.K. and Mao, Y. (2020) Recent Advances, Challenges and Opportunities of Inorganic Nanoscintillators. *Frontiers in Physics*, **8**, Article 589. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.589>

-
- tiers of Optoelectronics*, **13**, 156-187. <https://doi.org/10.1007/s12200-020-1003-5>
- [19] Giani, S., *et al.* (1998) GEANT4—An Object-Oriented Toolkit for Simulation in HEP, CERN/LHCC 98-44.
- [20] Wellisch, J.P. (2001) Hadronic Shower Models in GEANT4—The Frameworks. *Computer Physics Communications*, **140**, 65-75. [https://doi.org/10.1016/S0010-4655\(01\)00256-9](https://doi.org/10.1016/S0010-4655(01)00256-9)
- [21] 陈志强, 陈晶晶, 舒双宝, 等. LaBr₃ (Ce) 探测器探测效率影响因素研究[J]. 核技术, 2022, 45(1): 58-64.
- [22] 袁航, 单伟, 赵梦薇, 等. 反射层对 NaI(Tl)闪烁体探测器探测效率的影响[J]. 科技视界, 2021(10): 90-92. <https://doi.org/10.19694/j.cnki.issn2095-2457.2021.10.28>
- [23] Agostinelli, S., *et al.* (2003) GEANT4—A Simulation Toolkit. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research-Section A*, **506**, 250-303.
- [24] Anil, K.G., Mazumdar, I. and Gothe, D.A. (2009) Efficiency Calibration and Simulation of a LaBr₃(Ce) Detector in Close-Geometry. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research-Section A*, **609**, 183-186. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2009.08.045>
- [25] Weisshaar, D., Wallace, M.S., Adrich, P., *et al.* (2008) LaBr₃: Ce Scintillators for In-Beam Gamma-Ray Spectroscopy with Fast Beams of Rare Isotopes. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research-Section A*, **594**, 56-60. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2008.06.008>
- [26] Blasi, N., Giaz, A., Boiano, C., *et al.* (2016) Position Sensitivity in Large Spectroscopic LaBr₃: Ce Crystals for Doppler Broadening Correction. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research-Section A*, **839**, 23-28. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.09.039>
- [27] 钟丁生, 蔡小杰, 张志峰, 等. LaBr₃ 晶体几何因素对发光效率及探测效率影响模拟研究[J]. 核电子学与探测技术, 2019, 39(6): 664-667.
- [28] 曾国强, 朱珠, 葛良全, 等. 水体 γ 放射性测量中高纯锗探测效率刻度[J]. 核技术, 2017, 40(12): 37-42. <https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.120402>