



Simulation of Factors Affecting the Detection Efficiency of the Full Energy Peak of Lanthanum Bromide Detector

Guangming Dai*, Zhiquan Zhou, Quan Yuan, Guanghui Liao, Dashun Yan

College of Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu, China

Email: *759578262@qq.com

How to cite this paper: Dai, G.M., Zhou, Z.Q., Yuan, Q., Liao, G.H. and Yan, D.S. (2022) Simulation of Factors Affecting the Detection Efficiency of the Full Energy Peak of Lanthanum Bromide Detector. *Open Access Library Journal*, 9: e9208. <https://doi.org/10.4236/oalib.1109208>

Received: August 11, 2022

Accepted: August 28, 2022

Published: August 31, 2022

Copyright © 2022 by author(s) and Open Access Library 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

Abstract

Monte Carlo software MCNP and Geant4 were used to study the factors affecting the detection efficiency of the lanthanum bromide detector, mainly including the thickness of the detector Al shell and the size of the crystal. The results of the two softwares were compared. The results show that only the thickness of the front Al shell increases the detection efficiency of the full energy peak, and the side Al shell has little effect on the detection efficiency of the full energy peak; The increase of the radius length of the lanthanum bromide crystal will also increase the detection efficiency of the full energy peak. Comparing the results of MCNP and Geant4 simulation, it is found that the relative error of the two data is within 1%.

Subject Areas

Nuclear Physics

Keywords

Monte Carlo Simulation, Full Energy Peak Detection Efficiency, Influencing Factors

1. 前言

溴化镧探测器由于具有光产额高、能量分辨率好、温度系数绝对值小、衰减时间短、非线性响应小等优点，在辐射测量领域得到了广泛的应用[1] [2] [3]。蒙特卡罗软件作为一款通用粒子输运模拟软件，由于其具有灵活的几何处理能力以及元素和介质材料数据齐全等特点广泛应用于核辐射探测方面的模拟[4]。钟丁生等人利用蒙特卡罗软件 MCNP 对溴化镧探测器几何因素对发

光效率和能谱的探测效率的影响进行分析[5]。杨体波等人利用 MCNP 软件对溴化镧探测效率的影响因素进行了模拟,还进行了无源全能峰探测效率刻度,并与理论计算结果和实测结果进行了对比[6]。本文利用 MCNP 和 Geant4 分别对溴化镧探测器的探测效率的影响因素进行分析,通过建立相同模型,对比二者的测量结果误差,验证两个软件的准确性。

2. 理论基础及模型建立

2.1. 理论基础

全能峰探测效率 ε_p 定义为 γ 谱全能峰下包含的计数与放射源在相同时间内发射的 γ 射线计数的比值[6],如公式 1 所示:

$$\varepsilon_p = \frac{\text{全能峰的计数}}{\text{放射源发出的}\gamma\text{射线数}} \quad (1)$$

利用 MCNP 软件进行模拟时,通过输出文件读出归一化的概率即可得到全能峰探测效率。利用 Geant4 软件进行模拟时,通过 root 统计在溴化镧闪烁体晶体里面的能量沉积得到全能峰计数,然后用全能峰计数除以模拟时总的粒子数(放射源发出的 γ 射线数)就可以得到全能峰探测效率。

2.2. 模型建立

在 MCNP 和 Geant4 中构建的探测器模型如图 1~3 所示。以探测器 Al 壳左前端圆心为原点(0, 0, 0),点源位置设置为(-5, 0, 0),源距离探测器为 5 cm(源距也可以设置成其他的距离,源距比较近的时候,探测效率会增加;比较远时,探测效率会减小,因为 γ 射线在空气中也会发生衰减,设置为 5 cm 只是为了控制变量,在研究探测器其他参数对全能峰探测效率影响时,源距都是保持不变的)。模拟能量为 0.662 MeV 的 ^{137}Cs 源,溴化镧晶体直径为 3.18 cm,晶体长度为 10.16 cm,晶体外面包裹一层 MgO 反射层,其厚度为 0.05 cm,最外层为 Al 壳,其前端厚度为 0.1 cm,侧端厚度为 0.25 cm,右侧前端为 SiO_2 光导,厚度为 0.2 cm。在利用 MCNP 软件模拟时,计数卡采用 F8 脉冲计数卡,将能量划分为 1024 道来记录 γ 射线的能量分布。利用 Geant4 软件进行模拟时,通过使用 root 来统计我们想要的信息,模拟运输的粒子数都设置为 5×10^7 。



Figure 1. Lanthanum bromide detector
图 1. 溴化镧探测器

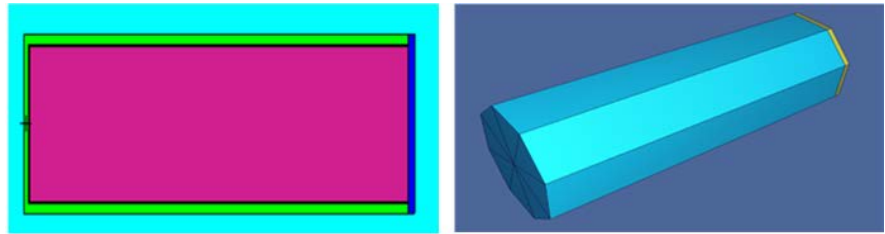


Figure 2. Model of lanthanum bromide detector in MCNP
图 2. 溴化镧探测器在 MCNP 中的模型

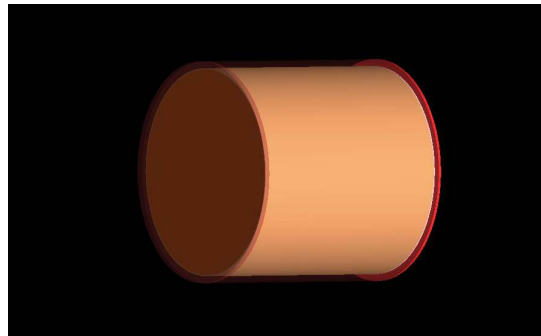


Figure 3. Model of lanthanum bromide detector in Geant4
图 3. 溴化镧探测器在 Geant4 中的模型

3. 全能峰探测效率影响因素

3.1. 前端 Al 壳厚度的影响

研究前端 Al 壳厚度对全能峰探测效率的影响时，将放射源设置为 ^{137}Cs 源，源距离探测器的距离设置为 5 cm，MgO 反射层厚度设置为 0.05 cm，侧端 Al 壳厚度设置为 0.25 cm，模拟时保持其他条件不变只改变前端 Al 壳的厚度(0.05 cm, 0.10 cm, 0.15 cm, 0.20 cm, 0.25 cm, 0.30 cm, 0.35 cm, 0.40 cm)，结果如表 1 和图 4 所示。

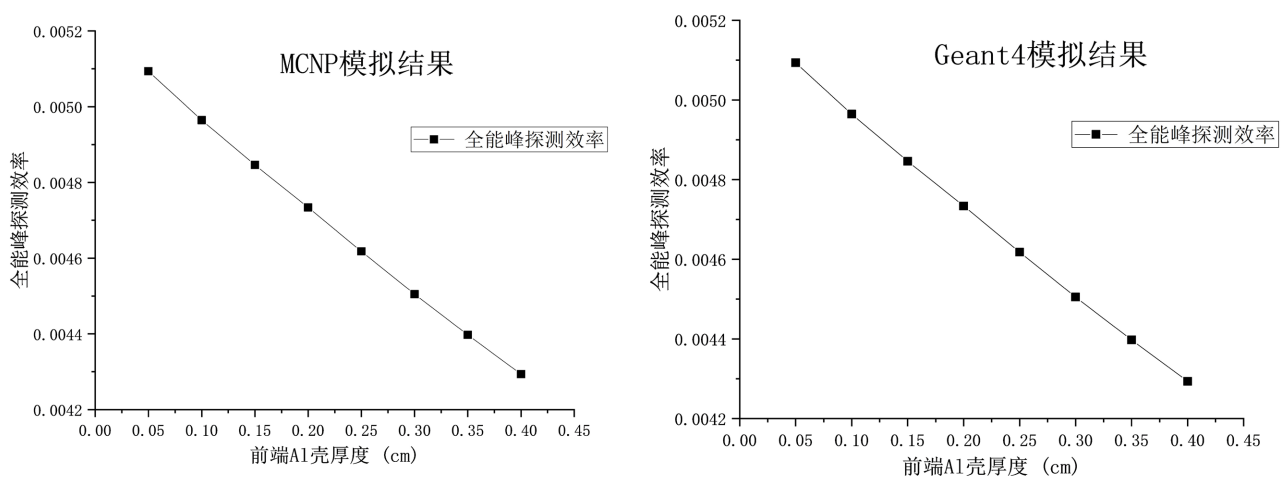


Figure 4. Shows the influence of Al shell thickness of MCNP and Geant4 simulation front-end on the detection efficiency of full energy peak

图 4. 左右分别为 MCNP 和 Geant4 模拟前端 Al 壳厚度对全能峰探测效率的影响

Table 1. Effect of front Al shell thickness on detection efficiency of full energy peak**表 1.** 前端 Al 壳厚度对全能峰探测效率的影响

前端 Al 壳厚度(cm)	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4
MCNP 结果	0.005086	0.004963	0.004846	0.004724	0.004612	0.0045	0.00439	0.004287
G4 结果	0.005094	0.00495	0.004846	0.004734	0.004618	0.004505	0.004398	0.004294
误差	-0.15%	0.26%	0.00%	-0.22%	-0.14%	-0.10%	-0.16%	-0.16%

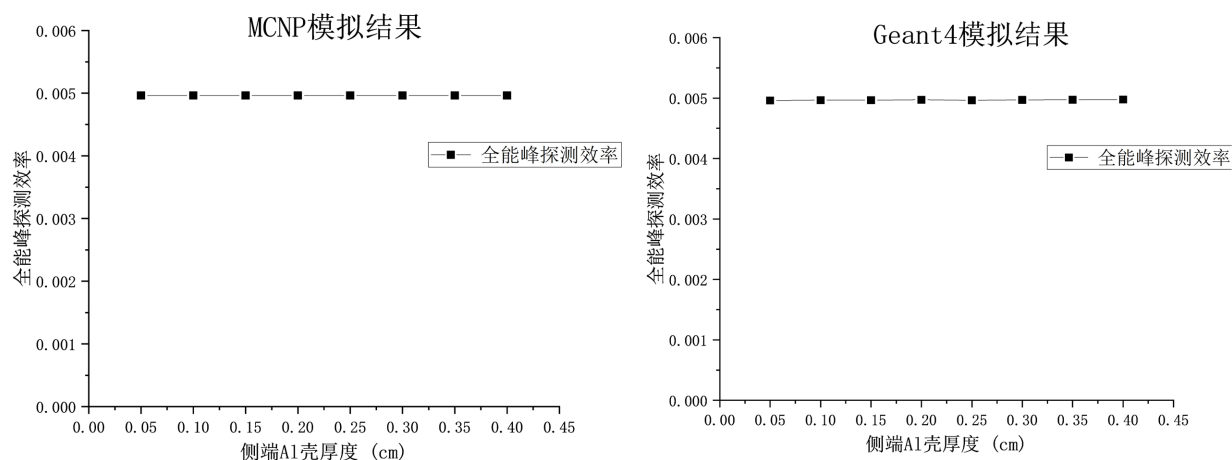
由表 1 和图 4 可知, MCNP 和 Genat4 模拟的结果非常接近, 两者结果之间的误差保持在 1%以内。前端 Al 壳的厚度会影响全能峰探测效率; 并且随着前端 Al 壳厚度的增加导致全能峰探测效率降低, 这是因为随着 Al 壳厚度增加, γ 射线在 Al 壳中发生了反应沉积了更多的能量, 使得到达溴化镧晶体表面 γ 射线就更少, 被溴化镧晶体探测到的 γ 射线就更少, 所以随着前端 Al 厚度的增加全能峰探测效率减小。

3.2. 侧端 Al 壳厚度的影响

模拟侧端 Al 壳厚度对全能峰探测效率的影响时, 将放射源设置为 ^{137}Cs 源, 源距离探测器的距离设置为 5 cm, MgO 反射层厚度设置为 0.05 cm, 前端 Al 壳厚度设置为 0.1 cm, 模拟时保持其他条件不变只改变侧端 Al 壳的厚度(0.05 cm, 0.10 cm, 0.15 cm, 0.20 cm, 0.25 cm, 0.30 cm, 0.35 cm, 0.40 cm), 结果如表 2 和图 5 所示。

Table 2. Effect of side Al shell thickness on detection efficiency of full energy peak**表 2.** 侧端 Al 壳厚度对全能峰探测效率的影响

侧端 Al 壳厚度(cm)	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4
MCNP 结果	0.004963	0.004963	0.004963	0.004963	0.004963	0.004963	0.004963	0.004963
G4 结果	0.00496	0.004966	0.004967	0.004972	0.004964	0.00497	0.004973	0.004975
误差	0.06%	-0.06%	-0.07%	-0.17%	-0.03%	-0.14%	-0.21%	-0.25%

**Figure 5.** Shows the influence of the thickness of Al shell at the simulated side end of MCNP and Geant4 on the detection efficiency of full energy peak**图 5.** 左右分别为 MCNP 和 Geant4 模拟侧端 Al 壳厚度对全能峰探测效率的影响

由表 2 和图 5 可以看出, MCNP 和 Geant4 的模拟结果非常符合, 两者结果的误差在 1% 以内。当前端 Al 壳、MgO 反射层等其他参数保持一定时, 只改变侧端 Al 壳的厚度对全能峰探测效率影响不大, 这是因为放射源位置设置在溴化镧探测器正前端, γ 射线主要通过探测器正前端进去溴化镧晶体, 所以侧端的 Al 壳厚度对于溴化镧探测器的全能峰探测效率影响不大。

3.3. MgO 反射层对全能峰探测效率的影响

模拟 MgO 反射层对全能峰探测效率的影响时, 将放射源设置为 ^{137}Cs 源, 源距离探测器的距离设置为 5 cm, 前端 Al 壳厚度设置为 0.1 cm, 侧端 Al 壳厚度设置为 0.25 cm, 模拟了 MgO 反射层的前端厚度分别为 0.01 cm、0.03 cm、0.05 cm、0.07 cm、0.1 cm、0.15 cm、0.2 cm、0.4 cm 的情况, 模拟结果如表 3 和图 6 所示。

Table 3. Effect of thickness of MgO reflection layer on detection efficiency of full energy peak

表 3. MgO 反射层厚度对全能峰探测效率的影响

MgO 厚度(cm)	0.01	0.03	0.05	0.07	0.1	0.15	0.2	0.4
MCNP 结果	0.005077	0.005022	0.004963	0.00491	0.004829	0.004694	0.004564	0.004963
G4 结果	0.005091	0.005031	0.004965	0.004907	0.004836	0.004699	0.004567	0.004975
误差	-0.27%	-0.18%	-0.03%	0.06%	-0.14%	-0.11%	-0.07%	-0.25%

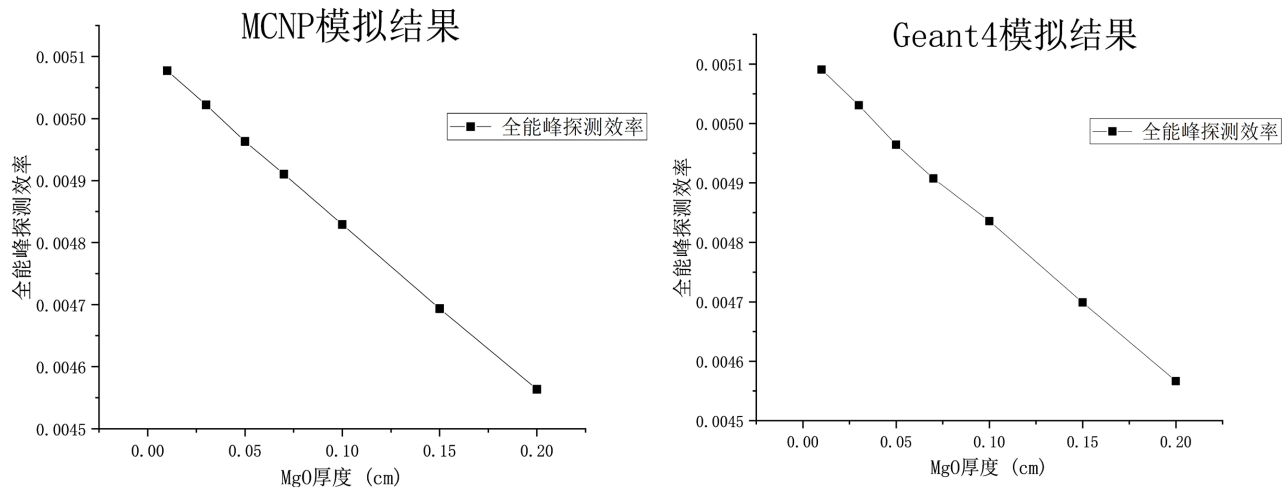


Figure 6. Shows the influence of the thickness of the simulated MgO reflection layer of MCNP and Geant4 on the detection efficiency of the full energy peak

图 6. 左右分别为 MCNP 和 Geant4 模拟 MgO 反射层厚度对全能峰探测效率的影响

从表 3 和图 6 中可以看出, MCNP 和 Geant4 的模拟结果也非常符合, 两者的结果之间的误差, 一直保持在 1% 以内。而且随着 MgO 反射层的厚度的增加, 全能峰探测效率随之下降, 其趋势呈一条直线, 在保证 MgO 反射层起到反射目的的情况下, 为了提高探测器的探测效率, 可以适当减小 MgO 反射层的厚度, 所以 MgO 反射层的厚度一般取 0.05 cm。

3.4. 晶体尺寸对全能峰探测效率的影响

溴化镧晶体尺寸大小对全能峰探测效率的影响主要包括两部分：晶体长度的影响和晶体半径的影响，将放射源设置为 ^{137}Cs 源，源距离探测器的距离设置为 5 cm，前端 Al 壳厚度设置为 0.1 cm，侧端 Al 壳厚度设置为 0.25 cm，MgO 反射层厚度设置为 0.05 cm，分别模拟了不同晶体长度为 2.54 cm、5.08 cm、7.62 cm、10.16 cm，不同晶体半径为 1.59 cm、3.81 cm、4.77 cm、6.36 cm、7.95 cm、9.54 cm、11.13 cm 的情况，模拟结果如图 7 所示。

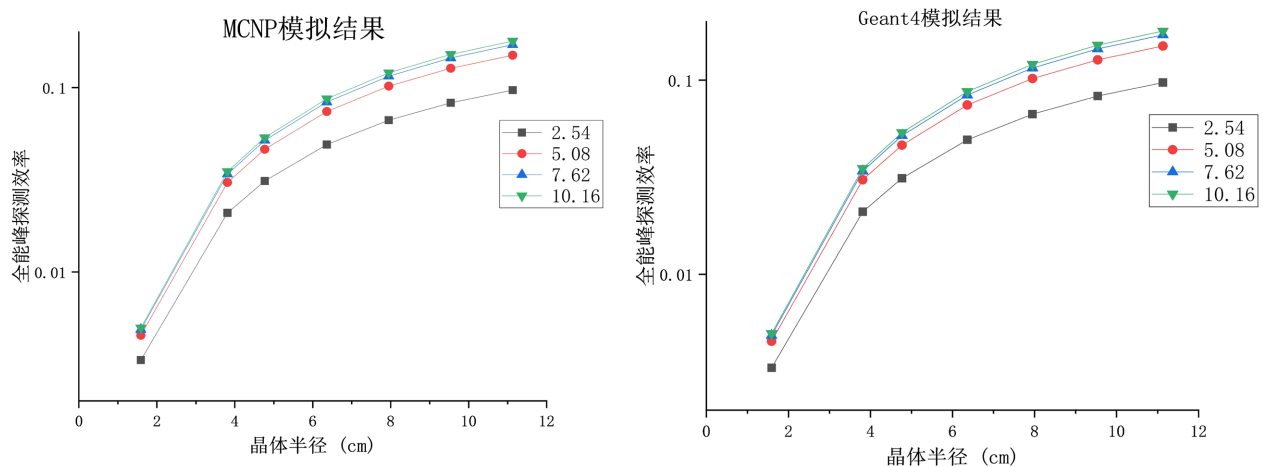


Figure 7. Shows the influence of MCNP and Geant4 simulated lanthanum bromide crystal size on the detection efficiency of full energy peak

图 7. 左右分别为 MCNP 和 Geant4 模拟溴化镧晶体尺寸对全能峰探测效率的影响

从图 7 可以看出 MCNP 和 Geant4 模拟结果几乎一致，在放射源设置为 ^{137}Cs 源，源距离探测器的距离设置为 5 cm 的情况下，随着晶体半径的不断增大，全能峰探测效率也逐渐增加，但是半径较小时的增加速率大于半径较大时的增加速率。这是因为当晶体半径较小时，点源相对探头的立体角较小，几何效率较低；随着晶体半径的增加，点源相对探头的立体角增加，几何效率逐渐增加，从而全能峰探测效率也随之增加；当半径增加到某个数值后，再增加半径，由于其立体角的变化很小，此时全能峰探测效率的变化也较小。同时也可以看到，当晶体半径一定时，随着晶体长度的增加，全能峰探测效率也会增加。晶体长度的增加会使得 γ 射线与晶体发生反应的概率增加，更容易使其能量全部沉积于晶体中，进而提高全能峰探测效率。从图中可以发现增加溴化镧晶体半径比增加晶体长度对探测效率的提升更加显著，所以我们想要提高溴化镧探测器的全能峰探测效率时，应尽量增加晶体半径大小以提高探测效率。

4. 结语

运用 MCNP5 软件和 Geant4 软件研究了溴化镧探测器 Al 壳厚度、MgO 反射层厚度、晶体长度和晶体半径对全能峰探测效率的影响(溴化镧探测器主要由 Al、MgO、溴化镧晶体构成，本文主要模拟的是构成探测器材料的尺寸

对全能峰探测效率的影响, 通过这个模拟可以根据实际情况选择材料的尺寸), 模拟结果表明: 当其他参数保持一定时, 随着前端 Al 壳厚度的增加, 会使全能峰探测效率降低; 随着侧端 Al 壳厚度的增加, 全能峰探测效率几乎不变; 随着 MgO 厚度的增加也会导致全能峰探测效率降低; 随着溴化镧晶体半径和长度的增加, 全能峰探测效率都会增加, 但是随着晶体半径和晶体长度的尺寸越来越大, 全能峰探测效率增加的越来越慢。通过 MCNP 软件和 Geant4 软件的模拟结果表明, 两者的结果非常符合, 误差保持在 1% 以内。

Conflicts of Interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

- [1] 曹勤剑, 夏三强, 刘立业, 肖运实, 汪屿, 李华. 溴化镧探测器的晶体表征与全能峰探测效率计算[J]. 辐射防护, 2016, 36(6): 364-367+416.
- [2] Favalli, A., Mehner, H.-C. and Simonelli, F. (2007) Wide Energy Range Efficiency Calibration for a Lanthanum Bromide Scintillation Detector. *Radiation Measurements*, **43**, 506-509. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2007.11.062>
- [3] Shi, R., Tuo, X.-G., Li, H.-L., Xu, Y.-Y., Shi, F.-R., Yang, J.-B. and Luo, Y. (2018) Unfolding Analysis of $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ Gamma Spectrum with a Detector Response Matrix Constructing Algorithm Based on Energy Resolution Calibration. *Nuclear Science and Techniques*, **29**, 10-18. <https://doi.org/10.1007/s41365-017-0340-6>
- [4] 彭礼韬. MCNP 和 Geant4 在伽马测井领域的应用对比研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2021. <https://doi.org/10.27140/d.cnki.ghbbu.2021.001582>
- [5] 钟丁生, 蔡小杰, 张志峰, 钟经华, 颜瑜成. LaBr_3 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.
- [6] 杨体波, 王敏, 代光明, 曹彧, 廖光辉, 范新洋. 溴化镧探测器探测效率刻度及影响因素分析[J]. 核技术, 2021, 44(10): 25-31.

Appendix (Abstract and Keywords in Chinese)

溴化镧探测器全能峰探测效率影响因素模拟

摘要: 用蒙特卡罗软件 MCNP 和 Geant4 研究了溴化镧探测器的探测效率的影响因素, 主要包括探测器 Al 壳厚度、晶体尺寸大小, 并将两个软件的结果进行对比。结果表明: 只有前端 Al 壳厚度增加会增加全能峰探测效率, 侧端 Al 壳对全能峰探测效率影响不大; 溴化镧晶体的半径长度增加, 也会增加全能峰探测效率。MCNP 和 Geant4 模拟的结果对比发现, 两者的数据相对误差在 1% 以内。

关键词: 蒙特卡罗模拟, 全能峰探测效率, 影响因素