

溴化镭探测器 γ 能谱的 MC 模拟及特性研究

陈 亮 魏义祥

(清华大学工程物理系 粒子技术与辐射成像教育部重点实验室 北京 100084)

摘要 本文使用通用蒙特卡罗模拟软件包 Geant4, 结合实验数据对溴化镭探测器的 γ 能谱进行了模拟计算和特性研究, 论证了便携式核素识别仪中使用溴化镭探测器的可行性, 在实验条件有限的情况下为能谱分析算法的开发提供了可靠的能谱参考数据。

关键词 蒙特卡罗模拟, 溴化镭探测器, 便携式核素识别仪, γ 能谱分析

中图分类号 TL812⁺.1, TL817⁺.2

IAEA 针对特殊核材料(SNM)的探查、定位与鉴别, 提出一种便携式核素识别仪(Radionuclide Identification Device, RID)的具体指标, 要求在特定条件下和时间内识别 30 keV–3 MeV 能量范围内 4 类、27 种核素^[1], 对宽能量范围内高涨落、低计数的快速核素识别方法提出了很高要求。

1 概述

便携式核素识别仪主要用碘化钠(NaI)闪烁体探测器和碲锌镉(CZT)半导体探测器。前者可满足 IAEA 的能量范围要求, 但能量分辨率较差, 在 100–200 keV 能区重峰严重, 无法满足 IAEA 关于铀丰度分析的要求; 作为新型半导体探测器, 后者在低能段能量分辨率显著高于前者, 可进行铀丰度分析^[2,3], 但探测效率低, 无法实现短时间内快速识别, 也无法满足宽能区测量的要求。

溴化镭探测器是近年来出现的新型闪烁体探测器, 其能量分辨率接近于 CZT 探测器, 又因其大体积而有高探测效率, 是上述应用的最佳选择。为研究溴化镭探测器的实验特性和能谱响应, 我们用蒙特卡罗法(MC)模拟溴化镭探测器对不同核素的 γ 能谱, 以进行特殊核材料和短寿命核素的能谱解析方法研究, 并满足不同实验条件(如探测器大小、形状、屏蔽条件等)下能谱解析算法研究的需要。

我们用 Geant4 蒙特卡罗模拟软件包计算了一个溴化镭探测器对 27 种单一核素和 6 种组合核素的 γ 能谱, 这一工作的建模与条件(如源强、屏蔽材料等)都按照 IAEA 的检测要求设置。为得到溴化镭探测器的分辨率曲线并与实验数据对比, 用相同尺寸的溴化镭探测器作了实验。

2 系统建模

IAEA 要求探测器参考点的当量剂量率高于本底 0.5 $\mu\text{Sv/h}$ ($\pm 30\%$)。点源的活度关系式为:

$$A = \frac{r^2 X}{\Gamma} = \frac{r^2 Da}{33.85\Gamma} \quad (1)$$

式中, A 是源的活度, r 是源和探测器前表面的距离, X 是照射量率, Γ 是照射量率常数^[4], $Da=0.5 \mu\text{Sv/h}$ 。铀、钚等由不同核素组成, 需分别计算各核素的活度。以高纯铀(HEU)为例, 其 ^{235}U 丰度为 90%, ^{238}U 丰度为 10%。当量剂量率应是各放射性核素的线性叠加, 即 HEU 的当量剂量率为

$$Da = \frac{33.85A_5\Gamma_5}{r^2} + \frac{33.85A_8\Gamma_8}{r^2} \quad (2)$$

式中的下标 5 和 8 分别表示 ^{235}U 和 ^{238}U 。根据活度的计算公式 $A=\lambda N$ (其中 A 为活度, λ 为放射性核素的衰变常数, N 为放射性原子核个数)可得到:

$$\frac{A_5}{A_8} = \frac{\lambda_5 N_5}{\lambda_8 N_8} = \frac{N_5 T_8}{N_8 T_5} \quad (3)$$

其中, T 为半衰期, $N_5/N_8=9:1$, 由式(2)和(3)可以求出 ^{235}U 和 ^{238}U 的活度。

在 Da 一定的条件下, r 越大, 在 IAEA 规定的测量时间所需衰变次数就越大, 所需模拟计算时间也越长。本文以 $r=30 \text{ mm}$ 为例计算活度, 根据规定的测量时间得到所需模拟计算的总粒子数。

所用探测器为 Saint-Gobain 公司产品, 结构如图 1, 晶体为 $\Phi 38.1 \text{ mm} \times 38.1 \text{ mm}$ 圆柱体, 外包 0.5 mm 铝壳, 根据 IAEA 最新的要求, 过滤层选择 5 mm 钢板或 10 mm 铅板。

国家自然科学基金(10675073)资助

第一作者: 陈 亮, 男, 1982 年出生, 2004 年毕业于清华大学, 现为清华大学工程物理系博士研究生, 专业: 核科学与技术

通讯作者: 魏义祥

收稿日期: 2008-06-11, 修回日期: 2008-09-23

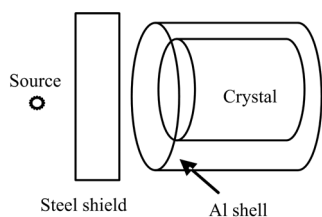


图1 探测器几何模型示意图
Fig.1 Geometry model of the LaBr₃ detector.

3 探测器能谱模拟计算

MC 模拟中的物理过程主要是电磁相互作用和放射性衰变。其电磁相互作用包括康普顿散射、电子对效应、韧致辐射和电离作用。源的定义可有多种方法,最简单者是用 Geant4 数据库里的数据作源,只需定义一个离子,并指定其原子序数和质量数即可。定义了放射性衰变物理过程后,程序就按照相应核素的衰变方式给出粒子。同样也可按不同能量 γ 射线的分支比定义核素放出的所有 γ 射线作为源。模拟过程跟踪各个粒子,按照不同电磁相互作用计算其在探测器中沉积的能量。同时,程序也可按需记录相互作用的时间、位置等其它信息。

3.1 溴化镧探测器能量响应

MC 模拟是对光子在物质中输运时发生的各种相互作用以一定概率抽样,计算粒子在探测器中沉积的能量。每个 γ 光子在溴化镧闪烁晶体中产生的光子数、光电倍增管的倍增系数以及第一打拿极收集到的电子数都是随机的,电子学系统的噪声也是随机的,MC 法不能计算这些随机效应,故需实验结合模拟的方法。我们用上述溴化镧探测器组件和 Canberra 公司的多道系统 DAS2000,对 γ 能谱高斯峰进行刻度,半高宽 $FWHM = aE^2 + bE + c$, 其中, E 为能量, a, b, c 为系数。高斯标准差 $\sigma = FWHM/2.355$ 。刻度曲线如图 2 所示。

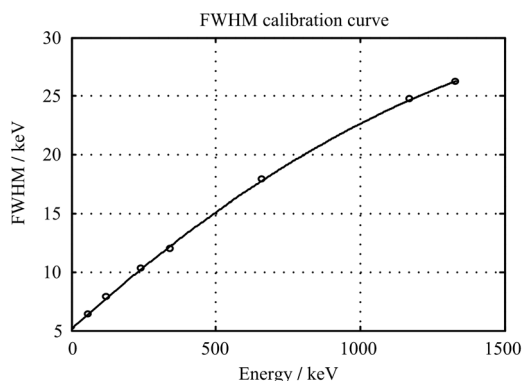


图2 溴化镧谱仪系统峰半高宽刻度曲线
Fig.2 FWHM calibration curve of the LaBr₃ spectroscopy system.

由 MC 模拟得到每个 γ 光子在探测器中沉积的能量,以该能量为均值, σ^2 为方差,按照高斯分布进行抽样,就可得到整个谱仪系统对每个光子产生的响应能量 E_s ,对大量入射光子的 E_s 值进行分类统计便得到 γ 能谱。MC 模拟计算得到的能谱见图 3。图 3 的实测能谱都已减除探测器的自生本底谱。图 3 表明,模拟与实测 γ 能谱的主要特征处(如全能峰、康普顿坪及边缘等)符合很好; ^{241}Am 的低能部分受电子学噪声影响,与实测数据有所差别; ^{60}Co 的模拟 200 keV 处的反散射峰,这是由于 Geant4 软件包本身模型所限。

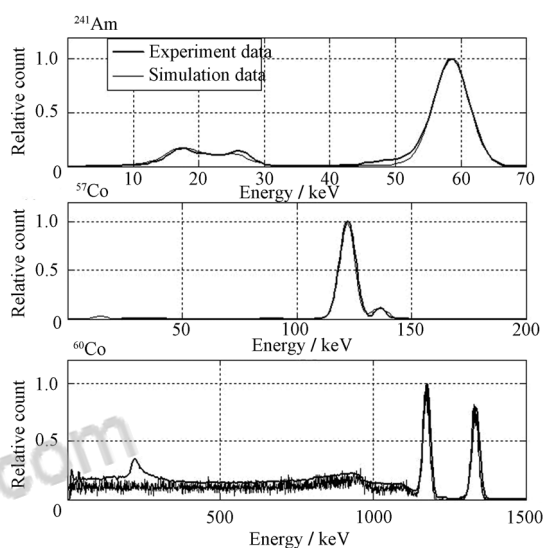


图3 溴化镧探测器实验数据和模拟数据谱
Fig.3 Experimental and simulated spectra with the LaBr₃ detector.

3.2 溴化镧探测器自生本底谱

溴化镧探测器最大的特点在于其晶体含有少量的 ^{138}La 与 ^{227}Ac ,使其本底谱和环境中的自然本底不同。其自生本底谱主要来自 ^{138}La 的 789 keV 和 1436 keV 两个 γ 跃迁,低能 X 射线主要来自 ^{138}La 衰变子核 ^{138}Ba 。能谱处理程序须针对这个特点作改进。模拟自生本底谱时,我们将 ^{138}La 随机分布在溴化镧晶体内部,其单位体积的放射性活度为 1.62 Bq/cm^3 ^[5],考虑晶体体积很容易算出相应测量时间内 ^{138}La 衰变的总次数。模拟计算的溴化镧探测器自生本底谱和实测结果如图 4 所示。模拟计算是测量 1 h 的结果,实测时间也是 1 h。由图 4 可见,溴化镧自生本底能谱的模拟数据在几个主要的全能峰处与实验数据符合较好。在低能部分,由于有环境本底(天然放射性、宇宙射线等)的影响,模拟数据和实验数据有较大偏差。实测数据中高能部分来自 ^{227}Ac 以及环境本底,由于计数很少,对能谱数据影响不大,因此在模拟计算时没有考虑。

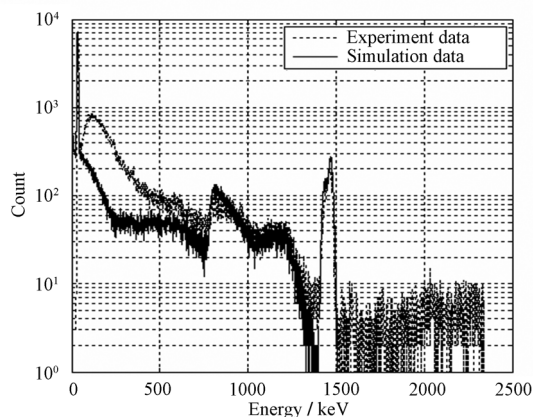


图 4 溴化镧探测器自生本底谱模拟数据与实验数据对比结果

Fig.4 Experimental and simulated background spectra of the LaBr_3 detector.

4 模拟计算结果分析

按照 IAEA 对便携式 RID 的测试标准, 我们模

拟了溴化镧探测器的 27 种单一核素的能谱和 6 种组合核素的能谱, 其中几种典型的能谱如图 5 所示, 左侧为 MC 模拟结果, 右侧为文献[6]中给出的氯化镧(LaCl_3)探测器的实验结果。

核素的当量剂量率都为 $0.5 \mu\text{Sv/h}$, 测量时间 120 s, 源与探测器间由 5 mm 钢板屏蔽。我们将模拟计算的结果和文献[6]中的实验结果进行对比, 能谱主要特征——全能峰位、全能峰形状、康普顿坪的形状等都和实验数据吻合得很好。由图 5 左上的 HEU 能谱可见, 90–200 keV 范围内峰的分辨率明显好于 NaI 探测器, 因此可对这个范围内的分属于 ^{235}U 和 ^{238}U 的峰进行拟合, 利用峰的相对面积并结合探测器在这个能区内的相对探测效率求出 ^{235}U 的丰度。在规定的条件和时间内, 核素的各种特征峰都已经较明显高于本底数据, 我们用对称零面积法对模拟能谱进行寻峰, 各核素的特征峰都能准确找到。

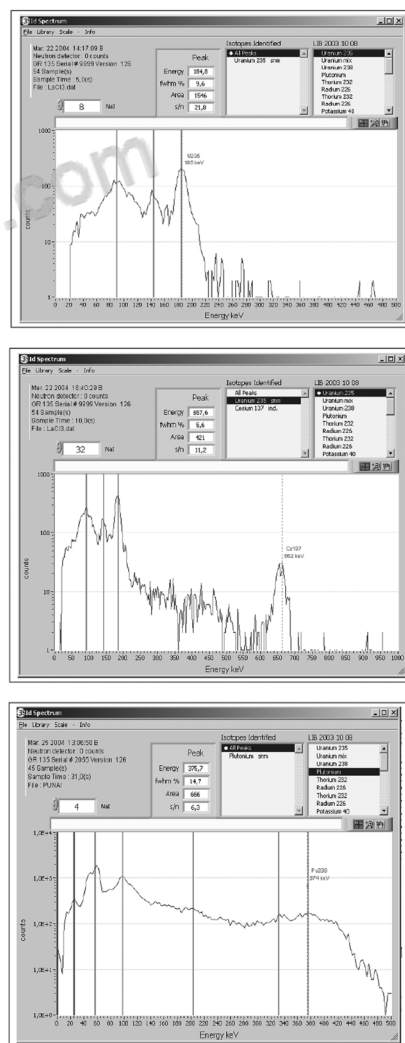
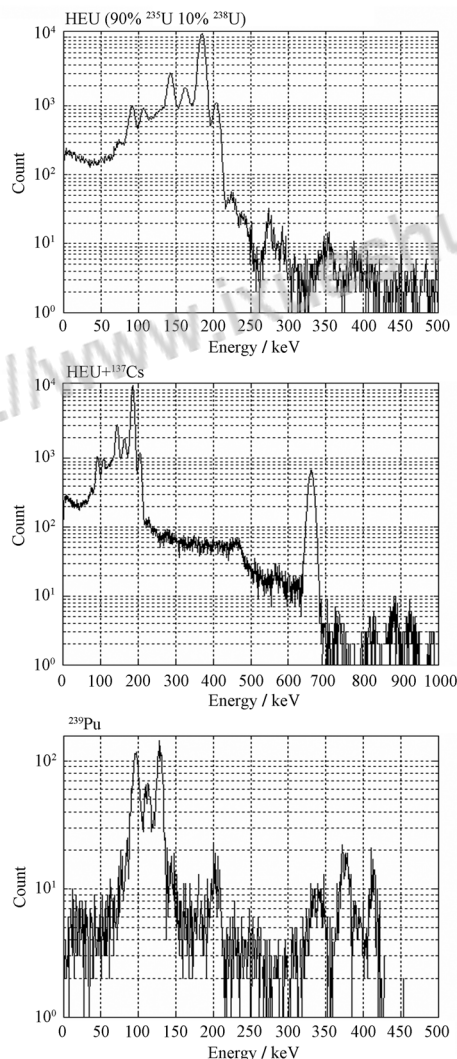


图 5 溴化镧探测器 MC 模拟计算典型能谱(左侧)和文献[6]给出的实测能谱(右侧)

Fig.5 Typical M-C simulated γ -ray spectra (left) of the LaBr_3 detector and the measured spectra (right) in Ref.[6].

5 总结

Geant4 软件包的面向对象编程方式给模拟计算带来了很大的方便。通过改变物理模型和参数, 不断对比实验数据, 得到了和实验结果较为接近的模拟数据。我们计算了 IAEA 要求的 27 个核素的 γ 能谱数据, 在实验条件不足的情况下, 这些数据可以作为研究探测器特性以及处理能谱、核素识别的重要参考。从实验结果和模拟数据可以看到, 在低放射性水平的条件下, 由于溴化镧探测器体积较大, 探测效率较高, 因此可以满足较短测量时间和能量范围的要求, 而在 100–300 keV 的能区内, 其分辨率明显好于 NaI 探测器, 因此为铀丰度的分析提供了条件。文献[2,3]中给出了用 CZT 探测器分析铀丰度的方法, ORTEC 公司也已经开发了专门的软件, 其方法能否直接用于溴化镧探测器还要进一步研究。从以上的模拟数据和实验数据的对比看, 模拟计算可以作为实验的重要补充并提供可靠的参考数据。

参考文献

- 1 IAEA Nuclear Series No.1. ISBN 92_0_100206_8, ISSN 1816-937, 2006
- 2 Wayne D R, Ray Gunnink. Nucl Chem Div, Lawrence Livermore National Laboratory, 1994
- 3 Patricia Mortreau, Reinhard Berndt. Nucl Instr Meth Phys Res, 2006, **A556**: 219–227
- 4 中国计量测试学会辐射专业委员会. 辐射剂量学常用数据. 北京: 中国计量出版社, 1987. 204–218
Chinese Society For Measurment. The common used data of nuclear radiation dose. Beijing: China Dose Publication, 1987. 204–218
- 5 Kernan W J. Member IEEE Trans Nucl Sci, 2006, **53**(1): 395–400
- 6 GR-135 Tests with SNM sources at IAEA, Vienna and Seibersdorf, 2004: 22–26

Monte Carlo simulation of gamma-ray spectra using a LaBr3 detector

CHEN Liang WEI Yixiang

(Key Laboratory of Particle and Radiation Imaging (Tsinghua University), Ministry of Education,
Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Lanthanum bromide detector is a new kind of scintillation detector appeared recent years. Due to the better energy resolution and detection effective, it is developed rapidly and used widely. This paper calculates and researches the characteristic of γ spectrum of the lanthanum bromide detector. The calculation is based on Geant4, the general purpose Monte Carlo program package, and compared with the experiment data. It demonstrates that the lanthanum bromide detector can be used in portable γ spectrometer. The calculation also provides reliable data under limited experiment for the development of spectral analysis algorithm.

Key words Monte Carlo simulation, Lanthanum bromide detector, Portable radionuclide identification device, γ spectrum analysis

CLC TL812⁺.1, TL817⁺.2



知网查重限时 **7折** 最高可优惠 **120元**

本科定稿，硕博定稿，查重结果与学校一致

立即检测

免费论文查重: <http://www.paperyy.com>

3亿免费文献下载: <http://www.ixueshu.com>

超值论文自动降重: http://www.paperyy.com/reduce_repetition

PPT免费模版下载: <http://ppt.ixueshu.com>
