



核科学与工程

基于 Geant4 的 α 粒子能谱模拟研究及软件设计实现*

刘敏俊¹, 石睿¹, 杨广², 王博¹, 王洲¹, 曾雄¹, 闫成杰¹

(1. 四川轻化工大学 计算机科学与工程学院, 四川 宜宾 644005; 2. 成都理工大学 核技术与自动化工程学院, 成都 610059)

摘 要: 为进一步发展基于蒙特卡罗模拟方法的 α 粒子能谱探测参数优化技术, 利用 PyQt5 设计一款调用蒙特卡罗模拟程序包 Geant4 进行 α 粒子能谱模拟研究的软件。一方面, 建立了测量 α 粒子的钝化离子注入平面硅探测器 (Passivated Implanted Planar Silicon) 物理模型, 根据实际 α 粒子测量条件对模拟的物理过程、模型材料及粒子源几何形状、成分等参数进行校正, 结合 PyQt5 界面开发平台将粒子源参数、探测器参数修改等功能可视化。在多个探源距和不同真空压强条件下进行模拟实验, 得到该模型的探测效率, 并将获取的能量沉积成谱后, 通过 EMG-Landau 响应函数模型展宽。另一方面, 为验证该探测器模型的准确性, 将模拟结果与实测结果的探测效率进行对比, 实验结果表明, 两者探测效率误差均在 5% 之内, 且 EMG-Landau 响应函数模型展宽效果良好。本文研究结果验证了该 Geant4 模拟软件在 α 粒子能谱研究方面的可靠性, 该软件可直观修改 α 粒子能谱测量条件, 简化了模拟步骤, 提高了模拟效率, 为基于蒙特卡罗模拟方法的 α 粒子能谱探测参数优化技术提供了有力工具。

关键词: PyQt5; Geant4; 钝化离子注入平面硅探测器; 响应函数; 探测效率

中图分类号: TL814

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.230143

Research and software design of α particle energy spectrum simulation based on Geant4

Liu Minjun¹, Shi Rui¹, Yang Guang², Wang Bo¹, Wang Zhou¹, Zeng Xiong¹, Yan Chengjie¹

(1. School of Computer Science and Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Yibin 644005, China;

2. School of Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: To further develop the optimization technology of alpha particle energy spectrum detection parameters based on Monte Carlo simulation method, this paper uses PyQt5 to design a software that calls Monte Carlo simulation package Geant4 for alpha particle energy spectrum simulation research. On the one hand, a physical model of the Passivated Implanted Planar Silicon detector for measuring α particles is established, and the simulated physical process, model materials, particle source geometry, composition and other parameters are corrected according to the actual α particle measurement conditions, combined with the PyQt5 interface. The development platform visualizes functions such as particle source parameters and detector parameter modification. The detection efficiency of the model is obtained by performing simulation experiments under multiple detection distances and different vacuum pressure conditions, and after the acquired energy is deposited into a spectrum, it is broadened by the EMG-Landau (Exponentially Modified Gaussian and Landau) response function model. On the other hand, to verify the accuracy of the detector model, the detection efficiency of the simulation results and the measured results are compared. The experimental results show that the detection efficiency errors of both are within 5%, and the EMG-Landau response function model broadened works well. The research results of this paper verify the reliability of the Geant4 simulation software in the study of α -particle energy spectrum. The software can directly modify the measurement conditions of α -particle energy spectrum, simplify the simulation steps, and improve the simulation efficiency, thus provides a powerful tool for α -particle energy spectrum detection parameter optimization technology.

* 收稿日期: 2023-05-20; 修订日期: 2023-08-14

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42074218); 国家自然科学基金区域创新发展联合基金重点项目 (U19A2086); 四川轻化工大学研究生创新基金项目 (Y2022176)

联系方式: 刘敏俊, 2608467415@qq.com。

通信作者: 石睿, shirui@suse.edu.cn。

Key words: PyQt5, Geant4, Passivated Implanted Planar Silicon, response function, detection efficiency

α 粒子能谱测量技术是 α 核素测量的一种重要方法, 不同厚度、面积、角度和真空度等复杂样品条件对 α 粒子能谱测量均有较大影响, 因此探究不同测量条件和样品种类对 α 粒子能谱分析的影响规律成为提升 α 核素定量分析精度的重要基础, 传统以实验为主的研究方法测量前通常需要对样品进行化学分离, 耗时长、成本高^[1-2]。随着计算机技术发展及数值模拟技术的广泛应用, 基于蒙特卡罗模拟方法的 α 粒子能谱探测参数优化成为 α 粒子能谱测量技术研究的重要且便捷的手段, 可有效模拟各种测量条件和样品种类^[3]。其中 Geant4 是粒子模拟技术常用的一种蒙特卡罗模拟程序包, 提供了多种粒子、模型的几何描述类和一系列可视化接口等工具, 具有多物理过程模拟能力、几何模型灵活、开放源代码、丰富的工具箱等优势^[4-6]。目前 Geant4 在粒子模拟研究领域方面, 温小江等^[4]采用 Geant4 程序对现有的谱仪探测器阵列进行模拟, 结果表明, 新探测系统对 α 衰变粒子的探测效率可达到 88% 左右, 对能量在 1 MeV 的 γ 射线全能峰的探测效率约为 7%; Díaz-Francis J A 等^[5]使用 Geant4 模拟钝化离子注入平面硅探测器 (PIP) 的响应, 研究了影响模拟精度的不同因素, 将天然铀源的实验谱与模拟预测值进行了比较, 两者吻合较好; Moslehi A 等^[6]提出了一个基于 Geant4 仿真工具包的简单模型来确定影响聚碳酸酯检测器的检测效率的参数, 考虑了 ^{241}Am 源 α 粒子穿过不同气柱所获得的不同 α 能量, 得到其中蚀刻条件 (即体蚀刻和电化学蚀刻厚度) 等实验参数决定了效率; 宋海声等^[7]提出利用 Geant4 获取高纯锗探测器 (HPGe) 的全能峰效率曲线, 进行放射性样品测量中全能峰效率的模拟及修正的方法, 蒙特卡罗模拟结果与实验测量结果有很好的—致性, 相对误差在 5% 之内; Tang Wei 等^[8]根据 Geant4 模拟得到的净非弹性谱和俘获谱, 计算所测 γ 总谱中的非弹性与俘获比, 得到的总模拟谱与实测结果吻合较好; Khan A U 等^[9]在 Geant4 中使用 Fano 腔测试以评估 α 粒子传输算法, Geant4 内部放射性衰变数据与所研究的 α 发射放射性核素的医学内部辐射剂量 (MIRD) 和辐射剂量测量与风险评估 (RADAR) 数据库之间存在良好的一致性。这些研究都表明了 Geant4 在粒子模拟研究方面的可行性, 但 Geant4 本身不具备可视化操作功能, 不便于实际应用, 且目前相关软件开发较少, 限制了其进一步发展, 急需进一步研究和开发。因此, 利用 PyQt5 的强大数据处理能力和丰富的界面操作功能设计可视化软件^[10-11], 可直观地理解和分析模拟实验的结果。

本文基于 Geant4 进行 α 粒子能谱模拟研究, 并开发一款方便用户模拟实验和数据可视化的软件, 使用该软件来调用 Geant4 根据实际探测器参数对虚拟探测器腔室的几何结构、模拟物理过程以及放射源的形状材料进行精确建模, 并在不同真空度、探源距等条件下进行 α 能谱模拟实验, 将模拟与实际 α 能谱实验数据的探测效率进行对比, 使两者间的相对误差不超过 5%, 所得能量沉积谱使用指数 Gaussian-Landau 响应函数展宽 EMG-Landau 模型, 验证该 Geant4 模拟软件在 α 粒子能谱研究方面具有可行性, 为基于蒙特卡罗模拟方法的 α 粒子能谱探测参数优化技术提供有效的方法。

1 理论基础

放射源衰变产生的 α 粒子属于快重带电粒子, 与靶物质相互作用的方式主要为与靶原子核外电子的非弹性碰撞, 在与靶原子中的电子相互作用过程中, α 粒子的能量逐渐减小, 最终与靶原子中的电子发生电离和激发作用, 导致能量转移和损失^[12-13]。其中 ^{239}Pu 、 ^{241}Am 和 ^{238}Pu 三个标准源衰变产生的主要 α 粒子的能量 (占比) 分别为 5.1565 MeV (70.77%)、5.4856 MeV (84.80%)、5.49903 MeV (70.91%)^[14]。

1.1 α 粒子测量影响因素

影响 α 粒子测量因素主要包括物理过程和空气压强, 物理过程是指 α 粒子在物质中的相互作用过程, 如散射、电离等, 不同的物理过程会影响到 α 粒子的传输和能量沉积等特性; 空气压强的变化会导致入射粒子在探测器中的能量沉积情况发生变化, 影响入射粒子在空气中的范围和入射粒子在探测器中的传输行为, 如粒子的扩散、漂移等^[15]。

在 Geant4 中, 与 α 粒子相互作用的电磁物理过程可以通过调用 G4EmStandardPhysics() 来实现, 该物理过程包括电子、正电子等多种带电粒子与物质相互作用的过程, 并考虑了多种物理效应, 如电离、激发、散射等; 对于 α 粒子的衰变过程, 可以使用 G4RadioactiveDecayPhysics() 和 G4DecayPhysics() 物理过程模型实现。对于空气密度和压强之间的关系, Geant4 可以通过 G4Material 类中的函数 GetDensity() 返回空气的密度^[7], 单位是 g/cm^3 , 通过 G4Material 类中的 GetPressure() 函数获取空气的压强^[16]。当空气压强变化, 大气密度也会随之改变, 空气密度跟大

气压强的关系式为

$$\rho = pM/(RT) \quad (1)$$

式中: ρ 表示空气的密度, 单位为 kg/m^3 ; p 表示空气的压强, 单位为 Pa ; M 表示空气的平均摩尔质量, 单位为 kg/mol ; R 表示气体常数, 取值为 $8.31 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$; T 表示空气的温度, 单位为 K 。需要注意的是, 空气的平均摩尔质量随着空气中组分的变化而变化, 一般情况下可以取空气的平均分子量, 即 $28.97 \text{ g}/\text{mol}$ 。

1.2 能谱展宽

统计 Geant4 模拟得到的能量沉积, 在对 α 粒子能谱进行解谱时, 需利用探测器响应函数来描述能峰分布, 以拟合实验测量的谱数据, 其中 EMG-Landau 响应函数模型能够更精确的解析符合效应严重的 α 能谱, 因此使用该模型来进行 α 模拟能谱展宽^[2]。该响应函数模型为

$$f(x) = \sum_{i=1}^n A_i \left[\frac{\eta_1}{2\tau_1} \exp(1)\text{erfc}(1) + \frac{\eta_2}{2\tau_2} \exp(2)\text{erfc}(2) + \frac{\eta_3}{2\tau_3} \exp(3)\text{erfc}(3) + \eta_4 L(1) \right] \quad (2)$$

其中

$$\exp(j) = \exp\left(\frac{(x-\mu_i)}{\tau_j} + \frac{\sigma^2}{2\tau_j^2}\right) \quad (3)$$

$$\text{erfc}(j) = \text{erfc}\left[\frac{1}{\sqrt{2}}\left(\frac{x-\mu_i}{\sigma} + \frac{\sigma}{\tau_j}\right)\right] \quad (4)$$

$$L(1) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{x-\mu_i}{\sigma} + \exp\left(-\frac{x-\mu_i}{\sigma}\right)\right]^2\right\} \quad (5)$$

式中: A_i 为第 i 个峰的面积; n 为全能峰数量, σ 为高斯标准差; τ_j 为第 j 个指数拖尾参数 ($j=1,2,3$); η_k 为每个指数拖尾的权值 ($k=1,2,3,4$); x 为峰区能量或道址; μ_i 为第 i 个峰的特征能量或特征道址; $L(1)$ 是 Landau 函数。

1.3 探测效率

为了验证模拟结果探测效率的准确性, 分别采用两种方法对探测效率进行理论计算, 一种是蒙卡模拟的探测效率计算, 如式(6)所示

$$\eta_{\text{MC}} = \frac{Q}{E} \quad (6)$$

式中: η_{MC} 代表模拟的全能峰效率, Q 为沉积在探测器灵敏体积中的全部能量事件数, E 为给定能量的模拟事件总数^[4]。另一种是几何因子法, 由点源发出的射线是各向同性发射的, 如果没有受到散射和吸收的作用, 射线进入探测器灵敏体积的概率

$$G = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{H}{\sqrt{H^2 + R_D^2}}\right) \quad (7)$$

式中: H 为点源正对探测器中心的垂直距离, R_D 为探测器表面半径。 G 为几何因子, 完全由几何条件决定。几何因子计算示意图如图 1 所示。目前针对 α 面源的几何因子计算主要有式(8)的近似计算公式

$$G = \frac{1}{2} \left[\frac{R_D^2}{D(D+H)} \right] - \frac{3}{16} \frac{R_S^2 R_D^2 H}{D^5} + \frac{5}{32} \frac{R_S^4 R_D^2 H}{D^9} \left[H^2 - \frac{3}{4} R_D^2 \right] \quad (8)$$

式中: $D = \sqrt{H^2 + R_D^2}$; R_S 为源的有效半径。

将探测效率的几何因子计算值 G 与蒙卡模拟计算值进行对比来说明 α 谱仪探测效率理论计算值的可信度^[17]。因为几何因子法的探测效率是根据线性内插得到的, 所以误差会比蒙卡模拟法的探测效率的误差大, 蒙卡模拟得到的探测效率更准确一些, 从而将蒙特卡罗模拟值作为参考值, 当相对偏差都低于 5% 则表示可信度高。相对偏差的计算公式为

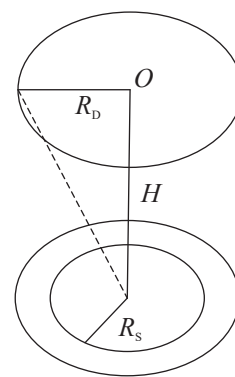


Fig. 1 Schematic diagram of geometry factor calculation
图 1 几何因子计算示意图

$$\varphi = \left| \frac{G - \eta_{MC}}{\eta_{MC}} \right| \% \quad (9)$$

2 实验设计与软件开发

本文整体研究方案如图2所示,步骤如下。

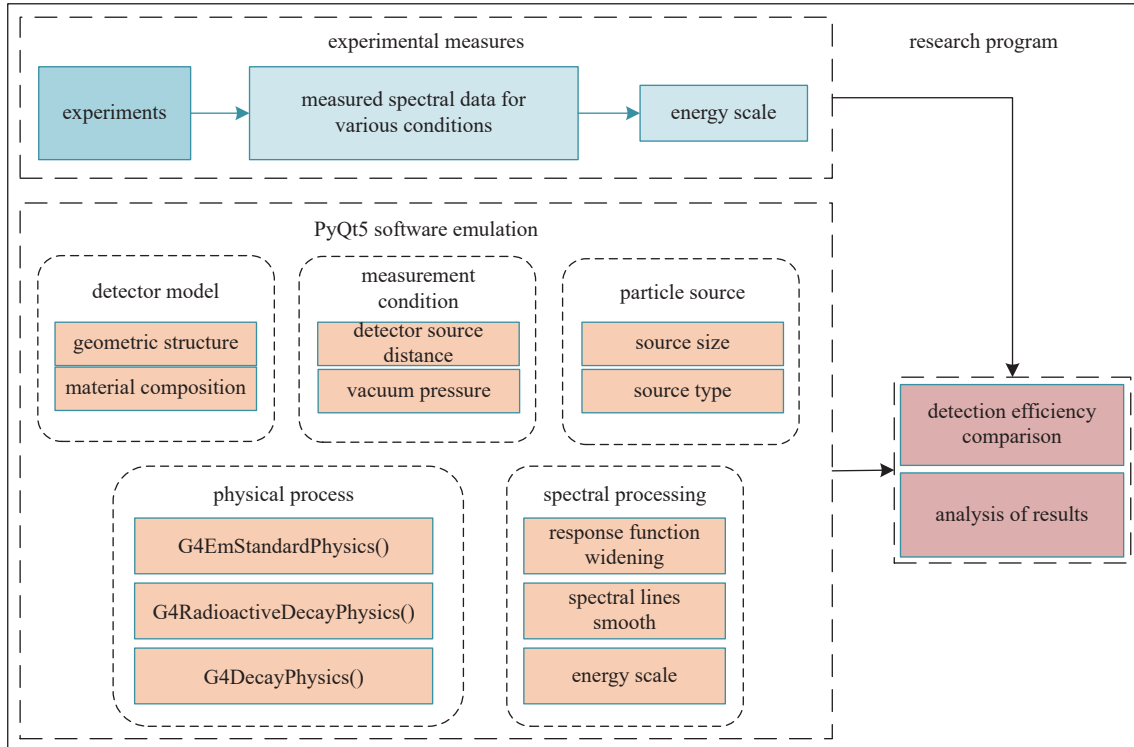


Fig. 2 Integral research scheme

图2 整体研究方案

(1)搭建蒙特卡罗模型:根据PIPS探测器腔室的几何结构和材料组成参数,使用Geant4的几何模块和物理材料模块搭建虚拟PIPS腔室几何模型、粒子源模块定义粒子源并设置模拟物理过程。

(2)模拟软件设计:使用PyQt5设计软件调用Geant4建立上述PIPS腔室模型并进行模拟实验,实现对Geant4粒子模拟的自动化控制。

(3)设置模拟条件:模拟 ^{238}Pu 标准源在500.0Pa压强下5个不同探源距的 α 能谱,并模拟 ^{238}Pu 标准源在探源距6.8 mm下266.6 Pa、400 Pa、533.3 Pa和666.6 Pa的 α 能谱。

(4)数据分析:将能量沉积谱使用响应函数法进行展宽,分析展宽效果,并使用同等条件下的实测能谱数据进行探测效率对比分析。

2.1 实验仪器参数

实验采用的探测器是ORTEC公司的ULTRA-AS系列深层离子注入硅探测器(PIPS),相较于传统的 α 能谱探测器具有高灵敏度、高分辨率等优点,其面积为 600 mm^2 ,半径为13.82 mm,死层厚度为5 nm,灵敏层有效厚度为 $350\text{ }\mu\text{m}$,所用的 ^{238}Pu 标准面源的有效半径为10 mm。图3为PIPS- α 谱仪的腔室实物图,整体所用的材料如表1所示。

2.2 Geant4建模

根据上述ORTEC公司提供的谱仪相关参数,使用Geant4来创建PIPS探测器腔室的物理模型。图4(a)、(b)分别为PIPS探测器腔室模型和PIPS探头模型。

探测器模型由探顶部、探头、卡槽、托盘和物品盘五部分组成,其中每个卡槽间隔为1 mm,最大探源距50 mm,整个探测器腔室由真空覆盖,探头内部分为死层、硅层、橡胶层、黄铜层和聚乙烯层5部分,硅层设置为灵敏层,用于统计能量沉积,外部由不锈钢皮包裹^[7]。设置上述定义的物理过程来模拟 α 放射源的电离激发过程和 α 粒子与探测器材料的相互作用,并对该模型进行参数设置,包括放射源类型、腔室压强、探源距等。

表 1 PIPS 探测器腔室部件、尺寸和材料

Table 1 Components, dimensions and materials of PIPS detector chamber

part	material	density/(g/cm ³)	inner radius/mm	outer radius/mm	half height/mm
probe top	stainless steel	8.06	0	8	3.655
probe	stainless steel	8.06	0	13.82	6.175
tray	aluminum	2.7	34	25.82	1
sample tray	stainless steel	8.06	0	12	0.25
slot stick	aluminum	2.7	34	1.15	1
dead layer	silicon	2.33	0	13.82	2.5×10^{-6}
silicon layer	silicon	2.33	0	13.82	0.175
rubber layer	rubber	0.92	0	13.82	0.25
brass layer	brass	8.5	0	13.82	0.5
polyethylene layer	polyethylene	0.94	0	13.82	2

2.3 Geant4 模拟软件开发

为解决上述 Geant4 模型实验操作过程不直观且无法直接修改实验参数等问题, 使用 PyQt5 开发一款 α 粒子模拟软件, 实现探测器、粒子源信息的可视化编辑和模拟实验的可交互操作。图 5 为该软件的功能框图, 设计了 Geant4 模拟模块和能谱数据分析模块, 通过界面控件实现实验参数的输入、编辑和保存等功能。

该软件调用 Geant4 模拟粒子的技术路线如图 6 所示。在 PyQt5 中, 不同界面组件之间通过信号与槽机制来交互和传输数据, 信号与槽机制可实现多个类之间的数据传输, 使软件具有强大的交互性和扩展性^[18]。设置要模拟的探测器条件和粒子源类型、数量, 分别生成 detectorconstruction.cc 文件和 mac 文件, 通过 subprocess.run() 调用 shell 命令 make 来重构 PIPS 探测器腔室模型, 调用可执行文件运行 mac 文件的粒子源信息, 将能量沉积保存为 csv 文件, 该能量沉积使用对数能量区间法进行成谱, 对数能量区间法适用于宽能量范围内的粒子, 更加准确地反映不同能量范围内的能量沉积情况, 最后使用响应函数展宽, 进行实验和模拟能

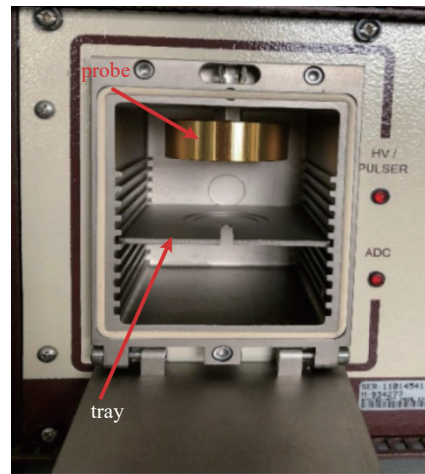
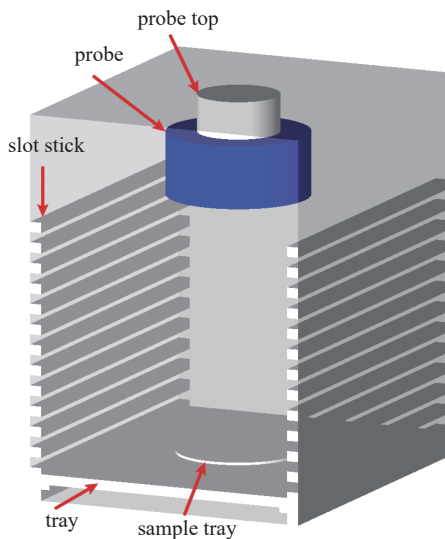
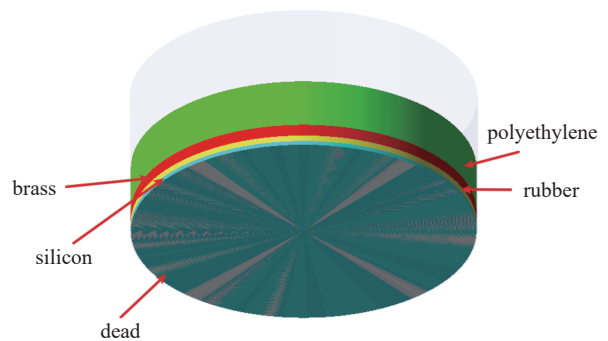


Fig. 3 Photo of PIPS- α spectrometer chamber

图 3 PIPS- α 谱仪腔室实物图



(a) detector chamber model



(b) PIPS detector model

Fig. 4 Physical model of the PIPS detector

图 4 PIPS 探测器物理模型

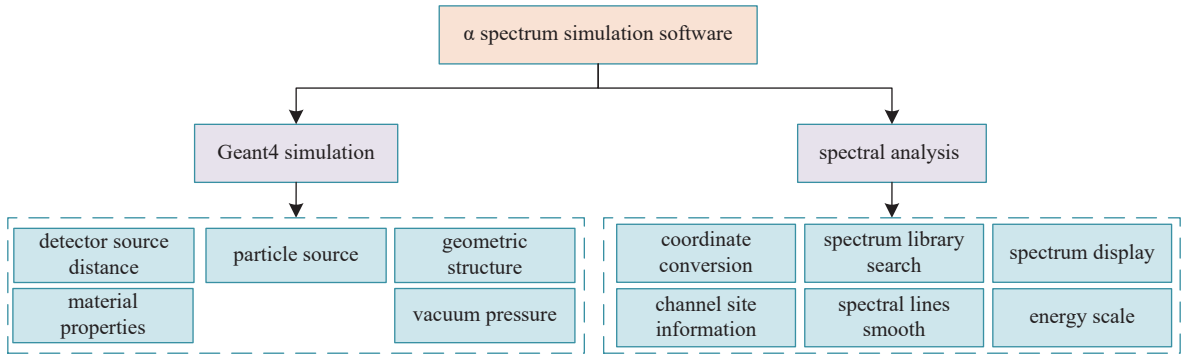


Fig. 5 Diagram of the software function

图 5 整体软件功能框图

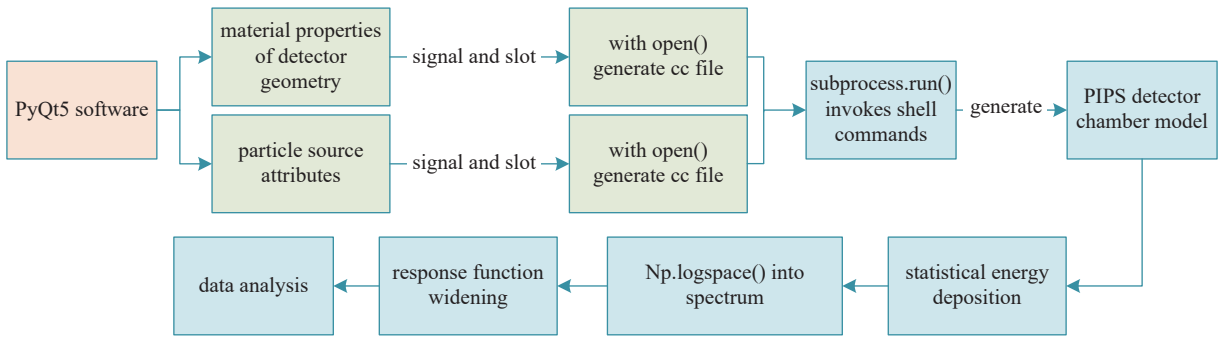


Fig. 6 Technology line of simulation by the software

图 6 软件模拟粒子技术路线

谱数据分析。

在主页面中,包含各个功能的入口、能谱数据绘图、坐标转换和道址信息等,图 7 为软件主页面图。

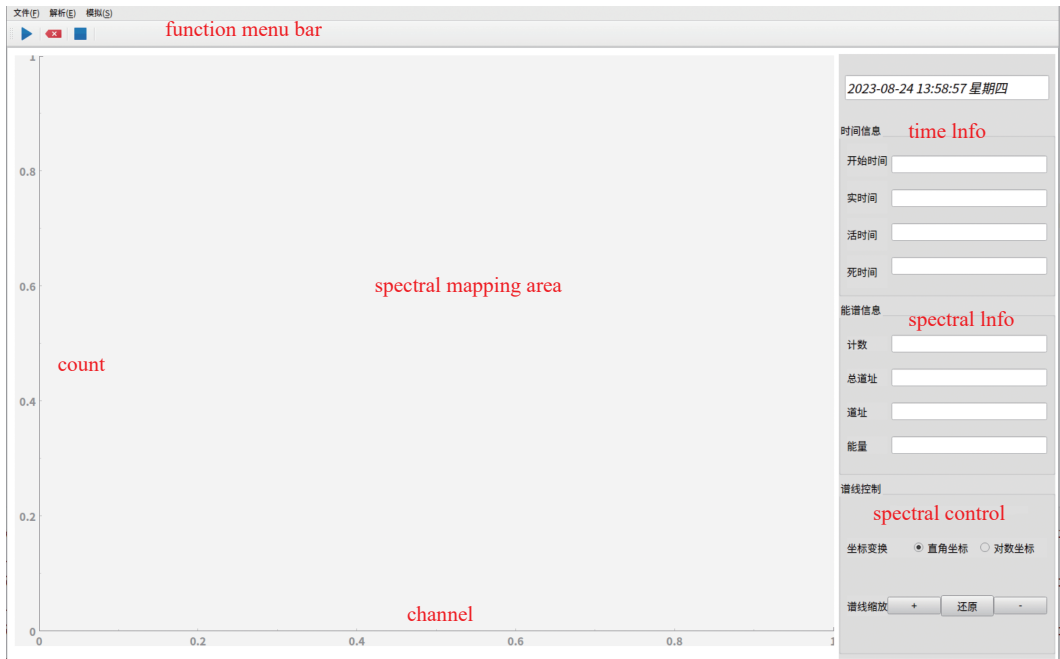


Fig. 7 Software main page

图 7 软件主页面

该软件实现了重心法平滑、最小二乘法光滑和指数导数平滑法(EMD),刻度方法包含线性和非线性刻度两种,界面如图 8(a)所示,且通过蒙特卡罗模拟界面可方便地修改探测器的属性、真空压强和放射源的属性,此外,还可打开 XML 文件,展示多个核素的能量占比大小,如图 8(b)所示。

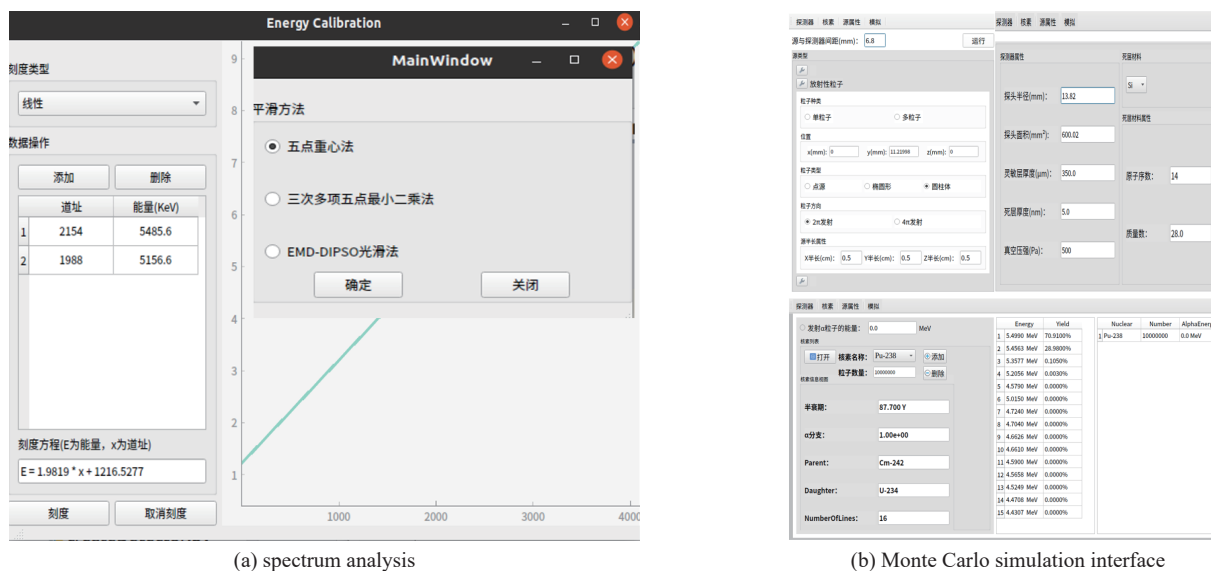


Fig. 8 Functional interface
图 8 功能界面

3 结果分析与讨论

3.1 探测效率数据分析

通过本文软件设置真空压强为 500 Pa, 在 5 个不同探源距条件下, 以面源的形式、 2π 的角度模拟 ^{238}Pu 粒子 10 次, 得到模拟结果探测效率的取值范围, 取其平均值作为模拟结果的探测效率, 求得模拟结果与实验结果的探测效率相对偏差, 如表 2 所示。从表 2 中分析得出, 5 个探源距下的相对偏差都在 5% 的误差范围内, 符合程度较好, 说明该软件可正确调用 Geant4 软件执行计算。

表 2 ^{238}Pu 标准源探测效率实测值与 Geant4 模拟值的对比

Table 2 Comparison between measured value and Geant4 simulation value of detection efficiency of ^{238}Pu standard source

probing distance/mm	measured detection efficiency/%	analog detection efficiency/%	analog detection efficiency range/%	relative bias/%
2.8	39.55	38.62	38.42~38.81	2.41
6.8	27.18	27.37	27.04~27.65	0.69
10.8	18.63	18.43	18.35~18.54	1.08
14.8	13.07	13.28	13.25~13.31	1.58
18.8	9.47	9.34	9.27~9.41	1.39

通过上述对比结果分析得出, 本文通过谱仪的实际参数建立的 PIPS 模型是准确的, 实验和模拟的探测效率符合程度良好, 存在的误差主要源于实验环境因素, 如温度、湿度、背景辐射等, 而这些因素在本文 Geant4 建模时没有考虑到; 同时, 建立的 PIPS 物理模型可能与探测器在实际尺寸、材料组成等方面存在出入, 对模拟结果造成一定影响^[19-20]。

3.2 模拟能谱数据展宽分析

使用本文软件进行 α 粒子模拟实验, 将得到的能量沉积谱使用响应函数进行展宽, 为突出重点, 只展示有效峰附近的数据对比。对于 ^{238}Pu 而言, 其主要的 α 能量 (占比) 为 5.4563 MeV (28.98%) 和 5.49903 MeV (70.91%)。由于这两个能量峰之间的能量间隔较大, 展宽后的能量沉积谱中应该是分离的。而对于 ^{239}Pu , 存在 3 个主要的能量 (占比) 为 5.1055 MeV (11.94%)、5.1443 MeV (17.11%) 和 5.1565 MeV (70.77%), 其中后两个能量的间隔较小。在实际情况下, 使用 PIPS 探测器进行测量时, 这两个能量峰可能会由于能量分辨率的限制而发生重叠, 难以分辨出独立的峰, 实验结果表明展宽后的全能峰效果良好。图 9 红色实线表示在 500 Pa 的真空压强下, 距离探头 6.8 mm 以面源的形式模拟 ^{238}Pu 、 ^{239}Pu 的未展宽模拟数据, 黑色实线表示响应函数展宽处理后的数据。

设置探源距为 6.8 mm, 通过模拟 ^{238}Pu 面源在 266.6、400、533.3 和 666.6 Pa 4 种真空压强下的 α 能谱, 展宽效果如图 10 所示。实验结果表明在不同压强条件下, 该软件模拟能谱展宽效果均良好。

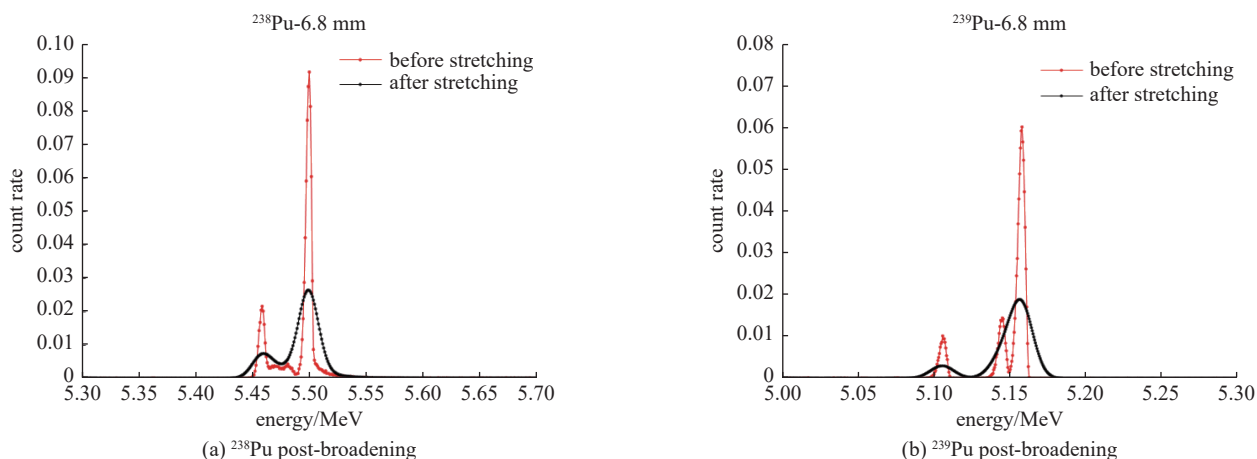


Fig. 9 Diagram of response function simulated energy spectrum broadening effect

图 9 响应函数模拟能谱展宽效果图

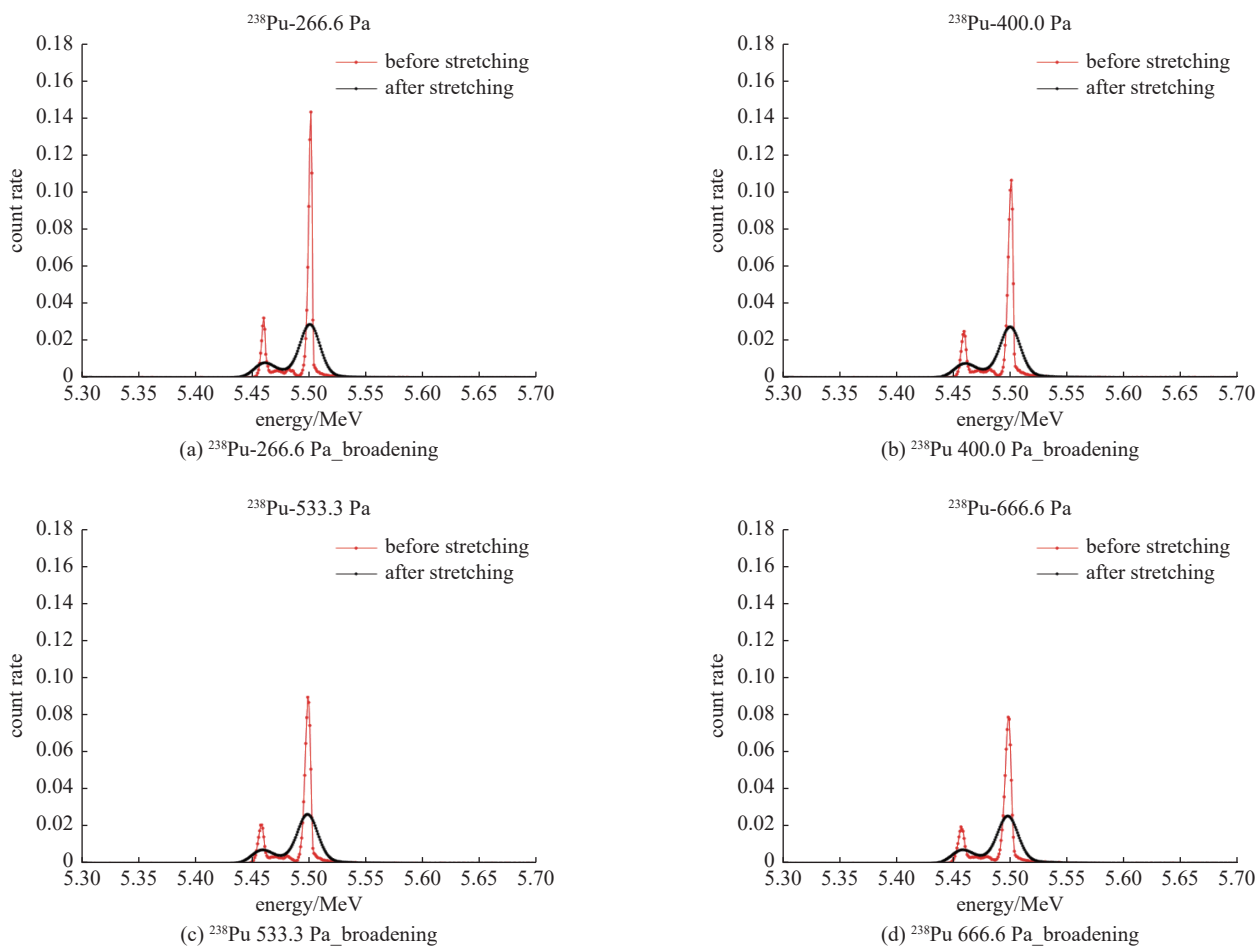


Fig. 10 Geant4 simulation stretching diagram of ^{238}Pu under four atmospheres

图 10 ^{238}Pu 四个大气压强下的 Geant4 模拟展宽图

4 结 论

为进一步发展基于蒙特卡罗模拟方法的 α 粒子能谱探测参数优化技术, 本文基于蒙特卡罗程序 Geant4, 对 PIPS 半导体 Si 探测器的几何结构和物理过程精准建模, 采用 PyQt5 作为 GUI 编程库, 开发了一款可视化编辑探测器、粒子源信息和可交互操作模拟实验的软件, 将获得的能量沉积成谱, 使用响应函数进行展宽, 分析了在不同真空度下的模拟能谱展宽效果, 以及多个探源距下模拟数据与实验测试数据的探测效率误差。通过实验对比结果表明, 所得模拟结果探测效率与实际条件下的 α 能谱测量误差低于 5%, 且 EMG-Landau 响应函数模型展宽效果良好, 验证了本文设计的 Geant4 模拟软件在 α 粒子能谱研究具有可行性。同时该软件不仅可以用于研究不同探源

距、真空度的 α 能谱测量, 还可以研究不同放射源类型、大小的 α 粒子对能量沉积分布和统计误差的影响, 模拟速度快, 准确度高, 为基于蒙特卡罗模拟方法的 α 粒子能谱探测参数优化技术提供了实用的工具, 并为相关研究的发展提供了有益的途径, 具有较广泛的应用价值。

参考文献:

- [1] 许阳阳, 虞先国, 石睿, 等. PIPS- α 谱仪探测效率蒙特卡罗模拟及其影响因素[J]. *强激光与粒子束*, 2017, 29(10): 155-160. (Xu Yangyang, Tou Xianguo, Shi Rui, et al. Monte Carlo simulation of detection efficiency of PIPS- α spectrometer and its influencing factors[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2017, 29(10): 155-160)
- [2] Rui Shi, Xianguo Tuo, Jian Bo Yang, et al. A peak shape model with high-energy tailing for high-resolution alpha-particle spectra[J]. *European Physical Journal A*, 2019, 55(8): 138-144.
- [3] 刘江平, 陈强, 王志新, 等. 10 MeV 工业辐照电子加速器 GEANT4 计算和工艺界面软件开发[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2022, 40(06): 62-69. (Liu Jiangping, Chen Qiang, Wang Zhixin, et al. Computational and process interface software development for 10 MeV industrial irradiation electron accelerator GEANT4[J]. *Journal of Radiation Research and Radiation Technology*, 2022, 40(06): 62-69)
- [4] 温小江, 张志远, 周厚兵, 等. 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(04): 423-429. (Wen Xiaojiang, Zhang Zhiyuan, Zhou Houbing, et al. GEANT4 simulation of the focal plane detection array of gas-filled recoil nuclear spectrometer[J]. *Review of Atomic Nuclear Physics*, 2021, 38(04): 423-429)
- [5] Díaz-Francés J A, Cortés-Giraldo M A, Jiménez-Ramos M C, et al. Simulation of the response of a PIPS detector using GEANT4 code[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2017, 875: 21-26.
- [6] Moslehi A, Baradaran S, Taheri M. GEANT4 modeling of alpha particles detection efficiency for polycarbonate SSNTD[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2022, 1033: 166714.
- [7] 宋海声, 庞荣妮, 蔡啸. 基于 MC 模拟研究锗死层对高纯锗探测效率的影响[J/OL]. *激光与光电子学进展*: 1-10 [2023-04-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.tn.20230207.1629.068.html>. (Song Haisheng, Pang Rongni, Cai Xiao. MC simulation-based study of the effect of germanium dead layer on the detection efficiency of high-purity germanium [J/OL]. *Advances in Lasers and Optoelectronics*: 1-10 [2023-04-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.tn.20230207.1629.068.html>.)
- [8] Wei Tang, Jin-Gang Liang, Yi Ge, et al. A method for neutron-induced gamma spectra decomposition analysis based on Geant4 simulation[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2022, 33(12): 38-50.
- [9] Khan A U, DeWerd L A. Evaluation of the GEANT4 transport algorithm and radioactive decay data for alpha particle dosimetry[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2021, 176: 109849.
- [10] 陈章诺, 郭玉辉, 詹泰鑫, 等. 新型 LEAF 装置控制软件设计[J]. *核电子学与探测技术*, 2020, 40(01): 60-64. (Chen Zhangnuo, Guo Yuhui, Zhan Taixin, et al. Design of control software for a new LEAF device[J]. *Nuclear Electronics and Detection Technology*, 2020, 40(01): 60-64)
- [11] 赵志远, 宋昭, 王晓山, 等. 基于 PyQt5 的地震动参数计算软件设计[J]. *华北地震科学*, 2022, 40(4): 7-11. (Zhao Zhiyuan, Song Zhao, Wang Xiaoshan, et al. Design of calculation software for ground motion parameters based on PyQt5[J]. *North China Earthquake Science*, 2022, 40(4): 7-11)
- [12] Mendoza E, Cano-Ott D, Romojaro P, et al. Neutron production induced by α -decay with Geant4[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2020, 960: 163659.
- [13] Incerti S, Gault N, Habchi C, et al. A comparison of cellular irradiation techniques with alpha particles using the Geant4 Monte Carlo simulation toolkit[J]. *Radiation Protection Dosimetry*, 2006, 122(1-4): 327-329.
- [14] Pöllänen R. Performance of an in-situ alpha spectrometer[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2016, 109: 193-197.
- [15] Shi R, Tuo X, Cheng Y, et al. Applications of non-negative iterative deconvolution method in the analysis of alpha-particle spectra[J]. *The European Physical Journal Plus*, 2020, 135(2): 225.
- [16] Tian Feng, Geng Changran, Tang Xiaobin, et al. Proton range monitoring based on picosecond detection using a Cherenkov radiation detector: A Monte Carlo study[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2022, 180.
- [17] Shao Jiang, Zhu Keyong, Liu Xiaochuan, et al. A general Monte Carlo method for polarized radiative transfer in multi-dimensional graded-index media[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2022, 278.
- [18] Hao J, Ho T K. Machine learning made easy: a review of Scikit-learn package in python programming language[J]. *Journal of Educational and Behavioral Statistics*, 2019, 44(3): 348-361.
- [19] 张罡, 何小中, 杜洋, 等. 基于 Geant4 的回旋加速器束流动力学计算[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34(07): 10-15. (Zhang Gang, He Xiaozhong, Du Yang, et al. Cyclotron beam dynamics calculation based on Geant4[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34(07): 10-15)
- [20] Lee P, Kang N W. Comparison study of MCNP6 and GEANT4 for neutron transportation and detection in ^3He Long Counter[J]. *Journal of the Physical Society of Japan*, 2023, 92(2): 024201.