

散射中子对 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子能谱精度的影响研究

王梓任, 蒋小菲*

贵州大学大数据与信息工程学院, 贵州 贵阳

收稿日期: 2026年8月1日; 录用日期: 2026年8月25日; 发布日期: 2026年9月1日

摘要

在辐射场进行中子能谱测量实验时, 实验室环境散射会对中子能谱精度造成影响。本文采用多球谱仪测量 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子能谱。首先通过蒙特卡洛方法模拟并计算实验环境中空气和实验室大厅墙面对测量 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子能谱的影响。仿真结果显示: 空气散射率随着中子源与聚乙烯的距离增加而增加; 地面散射是实验室大厅影响探测器计数的主要因素, 并且聚乙烯球的尺寸越小, 散射对其影响越大。其次本文分析了多个聚乙烯球同时测量时存在的球间散射所带来的影响。结果表明球间散射对较小尺寸和较大尺寸聚乙烯球造成的误差较大。最后本文完成了 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子实验, 并依据仿真得到的散射影响结果修正实验计数, 求解了中子能谱。实验结果表明: 扣除散射影响之后的 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子能谱更接近标准能谱; 相比于原始能谱, 其均方根误差RMSE降低了3.75%。

关键词

中子能谱, 环境散射, 蒙特卡洛, 球间散射, $^{241}\text{Am-Be}$

Study on the Influence of Scattered Neutron on the Accuracy of $^{241}\text{Am-Be}$ Neutron Spectrum

Ziren Wang, Xiaofei Jiang*

College of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang Guizhou

Received: August 1, 2026; accepted: August 25, 2026; published: September 1, 2026

Abstract

In the experiment of neutron spectrum measurement in radiation field, the laboratory environment scattering will affect the accuracy of neutron spectrum. In this paper, the neutron spectrum of

*通讯作者。

文章引用: 王梓任, 蒋小菲. 散射中子对 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子能谱精度的影响研究[J]. 现代物理, 2026, 16(5): 111-122.
DOI: 10.12677/mp.2026.165013

$^{241}\text{Am-Be}$ is measured by a Bonner sphere spectrometer. Firstly, Monte Carlo method is used to simulate and calculate the influence of air and the wall of the neutron laboratory on the measurement of $^{241}\text{Am-Be}$ neutron spectrum. The simulation results show that the air scattering rate increases with the increase of the distance between the neutron source and Bonner sphere. Floor scattering is the main factor affecting the detector count in the laboratory, and the smaller the size of the Bonner sphere, the greater the impact of scattering on it. Secondly, the influence of the inter-sphere scattering when Bonner spheres are measured at the same time is analyzed. The results show that the error caused by the inter-sphere scattering is larger for the smaller and larger Bonner spheres. Finally, we complete the $^{241}\text{Am-Be}$ neutron experiment. The neutron experimental counts are modified according to the scattering effect results obtained by Geant4 simulation, and then the neutron energy spectrum is calculated. The experimental results show that the neutron energy spectrum of $^{241}\text{Am-Be}$ is closer to the standard energy spectrum after deducting the scattering effect. Compared with the original energy spectrum, the root mean square error is reduced by 3.75%.

Keywords

Neutron Energy Spectrum, Environmental Scattering, Monte Carlo, Inter-Sphere Scattering, $^{241}\text{Am-Be}$

Copyright © 2026 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

中子能谱测量在核辐射探测和防护中具有重要意义。常见的中子能谱测量设备包括多球谱仪、飞行时间中子能谱仪、有机闪烁体测量法和多线圈活化法等。中子能谱测量理论上应该在足够大的非辐射场进行,但是实际的测量实验中,这很难实现,所以中子能谱的测量一般都在有限空间内的辐射场进行[1]。在辐射场中进行实验时,中子会与实验室的各种物质发生散射,例如,空气、墙壁、地面、天花板以及其他实验设备。中子与这些物质发生散射后可能会被能谱测量装置探测到,从而影响实际的中子能谱测量精度。散射中子对能谱测量造成的影响可以采用实验方法和蒙特卡洛(MC)方法来进行校准。国际标准化组织(ISO)[2]推荐了以下4种实验方法来分析中子散射问题,半经验法,简约拟合法,广义拟合法和影锥法。影锥法对所选的测量位置有很高的要求,并且需要一组附加设备影锥来完成实验[3]。半经验法,简约拟合法,广义拟合法这些方法都是通过改变中子源与探测器距离获得大量实验数据从而使实现散射分析。这些实验方法实验装置复杂、实验难度大且实验结果依赖于数据测量的精度[4]。

蒙特卡洛方法是通过搭建与实际实验一致的仿真环境,模拟计算中子与其他物质发生的反应来获取实验数据[5][6]。该方法可以处理复杂几何和材料结构的系统,并可同时计算多个未知量,在辐射领域具有广泛应用。因此,如果采用MC方法模拟实验室散射产生的影响并由此校准中子实验计数,那中子能谱的解谱精度将会提高。

$^{241}\text{Am-Be}$ 中子源具有寿命长、防护简单、中子发射稳定、尺寸适中等特点,在辐照处理和工业探测等领域有广泛的应用[7][8]。同时,多球谱仪[9]具有各向同性、测量范围宽以及操作简单的优点,它在中子能谱测量中应用最为广泛。

因此,本文使用多球谱仪测量 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子源的中子能谱,并采用MC方法模拟研究实验室散射对 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子能谱精度的影响。

2. 蒙特卡洛模拟

2.1. 实验设置

本次研究采用的多球谱仪由 8 个高密度聚乙烯球组成, 热中子探测器采用英国 Centronic 公司生产的 SP9 ^3He 正比计数器, SP9 内置在聚乙烯球中心。八个聚乙烯的直径分别为 4 英寸、5 英寸、6 英寸、7 英寸、8 英寸、9 英寸、10 英寸和 12 英寸, 平均密度约为 0.96 g/cm^3 。SP9 的直径(球形部分)为 33 mm, 总长 134 mm, 管内充有 2 个大气压的 ^3He 气体, 由不锈钢材料制成管壁包裹, 在 800~900 V 电压下工作。

本次实验所在实验室大厅的长宽高分别为 6 m、5 m、4 m。其中, 有一面墙壁为铅屏蔽墙, 其余三面墙壁、地板和天花板均由水泥构成。相对于多次对单个聚乙烯球测量, 多个聚乙烯球同时测量只需一次就能完成实验, 减少了多次测量带来的不确定性并提高了实验效率。因此, 我们将 8 个聚乙烯球以 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子源为圆心, 从小到大依次摆放。每个聚乙烯的球心(SP9 所在位置)到中子源的距离相等, 并且 SP9 与中子源的几何中心保持在同一水平面上。

2.2. 实验环境模拟

Geant4 [10] [11]在核物理、医学和空间科学等领域应用广泛, 本文选用 Geant4 完成蒙特卡洛仿真。建立与实验室环境高度一致的 MC 模型, 可以计算环境变量对中子能谱的影响, 从而提高中子能谱的测量精度。本文实验室主体结构的建造材料为普通混凝土, 铅屏蔽墙由纯铅砌成, 室内填充空气。水泥墙和天花板厚度为 50 cm, 铅屏蔽墙厚度为 1.5 m。实验室在一楼, 所以将地板厚度设置为 1.5 m 厚度的水泥板。我们根据实际的实验环境构建了与之大小一致的模拟环境, 如图 1 所示。为简化模拟程序, 忽略了聚乙烯球支撑结构, 电线以及实验室存在的等其他较小设备, 主要考虑四面墙壁(水泥墙和铅屏蔽墙)、地板、天花板以及空气。

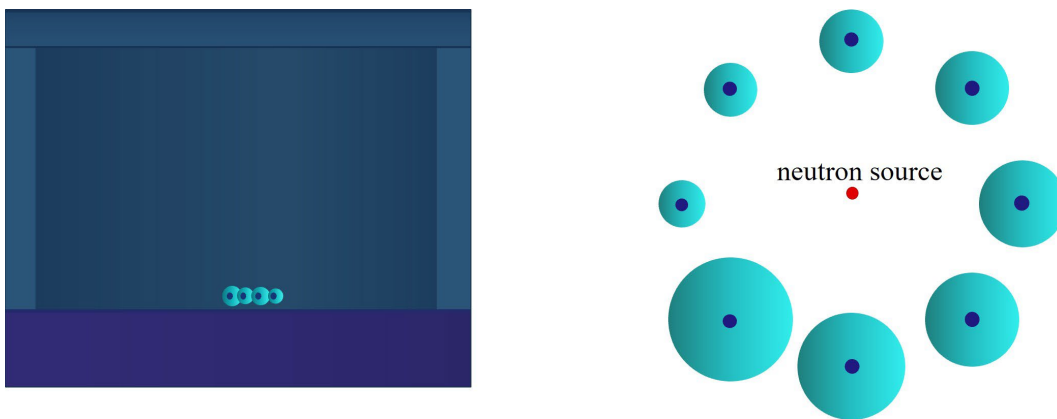


Figure 1. Geant4 simulation model

图 1. Geant4 仿真模型

多球谱仪与实验室所用模拟材料参数如表 1 所示[12]。

Table 1. The density and atomic ratio of materials in the lab system resulting data of standard experiment

表 1. 实验室中材料的密度及原子比

材料	密度(g/cm^3)	原子比
混凝土	2.50	$\text{H:O:Na:Mg:Al:Si:S:K:Ca:Fe} = 1.2:51.8:0.5:0.8:6.2:28.7:0.5:1.4:6.5:2.4$

续表

空气	1.20×10^{-3}	C:N:O:Ar = 0.01:75.53:23.18:1.28
聚乙烯	0.96	C:H = 1:2
不锈钢	8	Fe:Cr:Ni = 74:18:8
^3He 气体	3.32	$^3\text{He} = 100$
铅	11.35	Pb = 100

3. 模拟计算与结果分析

本次实验在辐射场进行, 那么实验室中的墙壁, 天花板, 地面都是必须考虑的散射物体, 而实验室中其他实验设备, 由于其体积较小, 摆放位置不固定, 所以在本次模拟中可以忽略不计。空气是实验室中不可缺少的元素, 也应该加入考散射分析中, 并且由于本次实验是多球同时测量, 所以存在的球间散射也需要进行考虑分析。

3.1. 室内空气散射

在室内条件下中子与空气的散射与空气密度和空气成分有关[13]。模拟环境中的空气为干燥空气, 密度与成分分配比如表 1 所示。在存在空气介质情况下, 我们仿真得到八个聚乙烯球的计数, 然后再与理想情况下的计数比较, 就可以计算得出空气的散射影响。

当空气存在时, 聚乙烯球探测到从中子源发射的中子可以分为三个部分: 直射中子(Φ_0)、内散射中子(Φ_{in})和外散射中子(Φ_{out}), 如图 2 所示。其中, 直射中子(Φ_0)是聚乙烯球探测到的没有与空气发生散射的中子; 内散射中子(Φ_{in})是与空气发生散射之后被聚乙烯球探测到的中子; 外散射中子(Φ_{out})是直射中子与空气发生散射之后偏离聚乙烯球的中子。

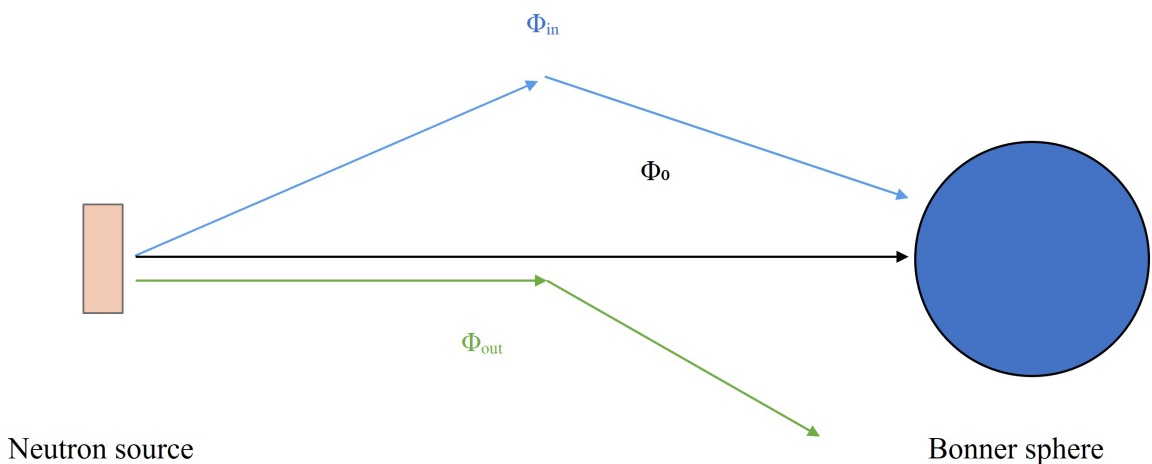


Figure 2. Three types of neutrons in air scattering
图 2. 空气散射中的三种中子

因此, 在没有空气的理想情况下, 多球谱仪探测到的中子均为直射中子。在存在空气介质情况下, 多球谱仪探测到的中子如式 1 所示。我们定义空气散射率为有无空气介质情况下聚乙烯球计数的差值与理想情况下聚乙烯球计数的比值, 如式(2)所示。

$$\Phi_{air} = \Phi_0 - \Phi_{out} + \Phi_{in} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{(\Phi_{air} - \Phi_0)}{\Phi_0} = \frac{(\Phi_{in} - \Phi_{out})}{\Phi_0} \quad (2)$$

由上式可知, 当 $\eta > 0$ 时, 内散射大于外散射, 空气散射会增加聚乙烯球计数; 当 $\eta < 0$ 时, 外散射大于内散射, 空气散射会减少聚乙烯球计数。

我们测量了多球谱仪与中子源在多个不同距离下的计数, 研究探测器与中子源的距离与空气散射的影响。我们选取的 SP9 与中子源距离分别为 40 cm、60 cm、80 cm、100 cm, 测量结果计算得出不同距离下的空气散射率结果图 3 所示。仿真结果表明: 聚乙烯球的空气散射率都大于 0, 这说明空气内散射是影响聚乙烯球计数是主要因素。并且中子源与聚乙烯球的距离越远, 中子与空气的接触路径越长, 空气散射概率增加。同时随着聚乙烯球尺寸的增加, 每个聚乙烯球的空气散射率逐渐减小。

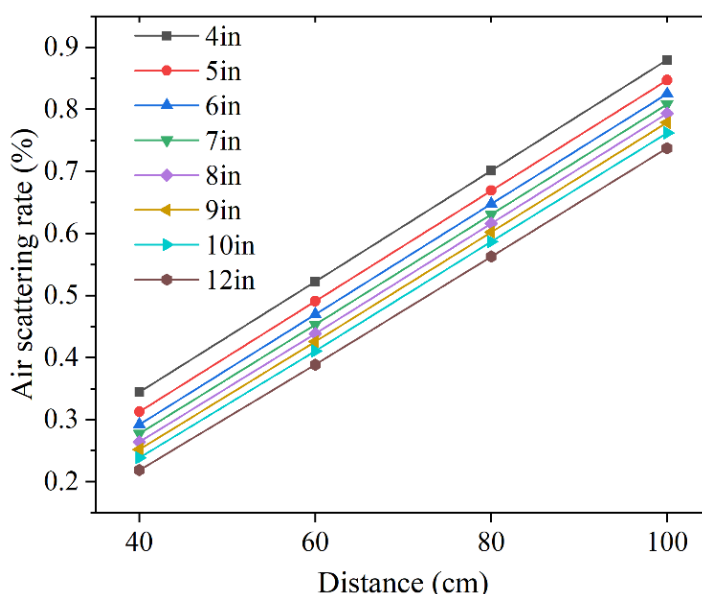


Figure 3. Scattering of polyethylene balls at different distances
图 3. 不同距离下聚乙烯球的散射率

3.2. 实验室大厅散射

在中子实验室大厅内, 对多球谱仪测量精度造成主要影响的是实验室的地面、天花板以及墙壁[5][14]。中子源放置在实验室大厅的中心, 如图 4 所示, 其距离地面的距离最近, 距离墙壁与天花板的距离较远。我们通过 Geant4 追踪中子运行轨迹, 可以计算得到中子与实验室内不同物质反应后被聚乙烯球探测到的对应的中子数目。当中子经过多个物体散射之后被聚乙烯球探测到, 为简便计算, 我们只考虑中子进入聚乙烯球之前的最后一个物体类别。

中子源与聚乙烯球越远, 探测到的直射中子概率就越小, 从而中子与室内物质散射的概率就会增加, 散射中子对聚乙烯球的影响也越大。因此, 我们只分析了在中子源与 SP9 的距离为 40 cm 时, 实验室大厅各个物质散射对聚乙烯球的计数影响。图 5 展示了聚乙烯球中探测到的中子成分, 包括中子源的直射中子和实验室物质的散射中子。从图 5 可知: 地面散射是实验室散射的主要成分, 远大于墙壁和天花板散射。随着聚乙烯球的尺寸变大, 实验室散射引起的中子计数占总中子计数的比例越来越小。因此, 地面散射是影响聚乙烯球计数的主要因素, 且实验室大厅散射对聚乙烯球计数的影响随着球的尺寸增加而减弱。由于中子源距离天花板和墙壁较远, 墙壁和天花板的散射贡献在总散射中占比极小。因此, 在后

续的散射修正模型中, 为简化计算, 本文忽略了墙壁和天花板的微弱贡献, 主要保留了占绝对主导地位的地面散射。

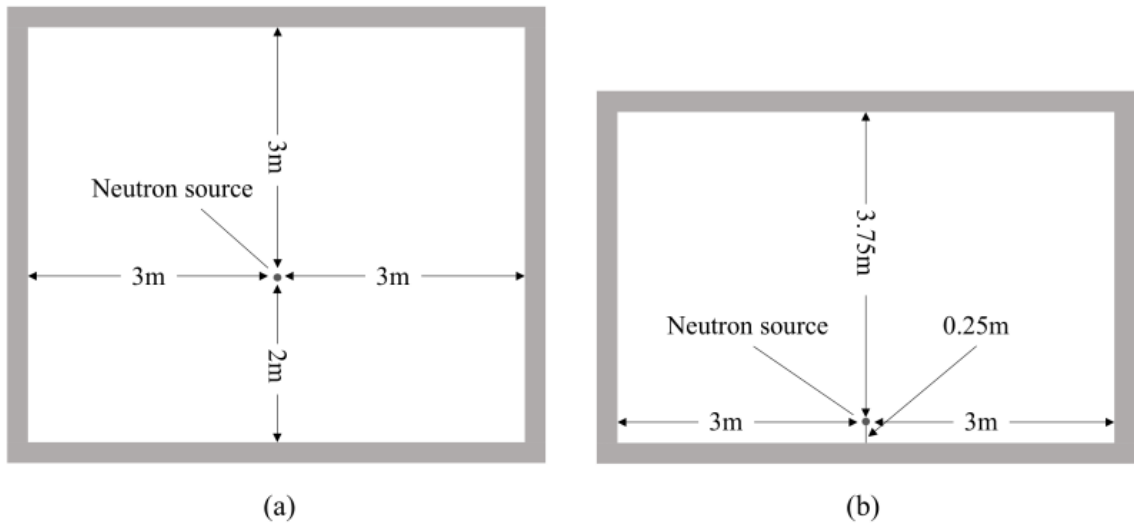


Figure 4. The left picture (a) is a top-down view of the lab, and the right picture (b) is a side view
图 4. 左图(a)为实验室水平面视图, 右图(b)为垂直面视图

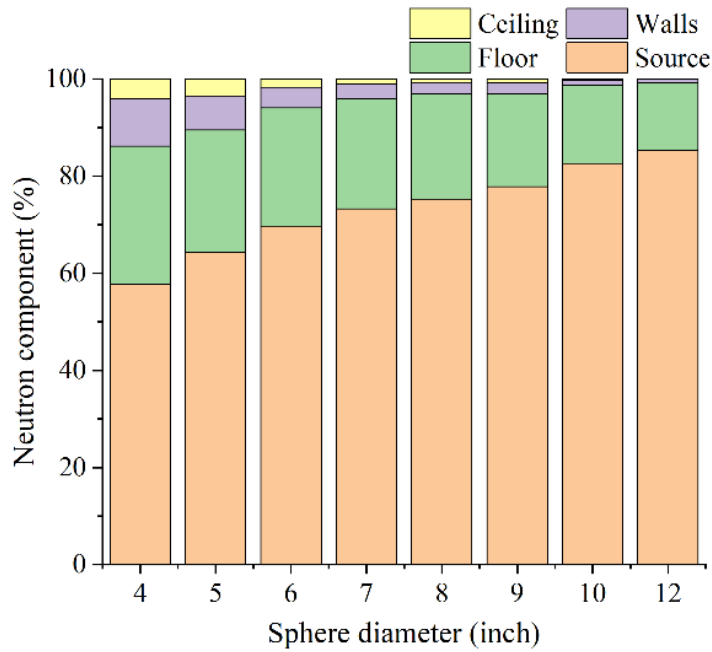


Figure 5. Fraction of neutrons detected in polyethylene spheres
图 5. 聚乙烯球中探测到的中子份额

3.3. 球间散射

当中子源与 SP9 距离较近时, 八个球聚乙烯球围绕中子源同时测量, 相邻两个聚乙烯球之间的间隔会很近。当中子经过第一个聚乙烯球时, 可能不会被聚乙烯球完全慢化吸收, 将从第一个球逸出。此时, 逸出的中子很大可能会继续进入相邻的聚乙烯球。由于逸出中子的方向具有不确定性, 逸出的中子也具

有进入其他非相邻聚乙烯球的可能性。这些散射逸出的中子会对聚乙烯球的计数造成误差。多球同时测量情况下, 中子在聚乙烯球之间的散射称为球间散射[15]。

为了研究球间散射对聚乙烯球计数影响, 我们计算了中子源与 SP9 距离在距离为 40 cm 时, 有无球间散射情况下八个聚乙烯球的计数结果。无散射情况下的计数是我们通过仿真单个聚乙烯得到的, 而有散射计数是同时仿真多个球得到。图 6 为有无球间散射情况下 8 个聚乙烯球的归一化计数, 结果显示球间散射对 4 英寸球计数造成误差最大, 其次是 5 英寸球和 12 英寸球。球间散射对尺寸较小(4 英寸、5 英寸)和较大(12 英寸)聚乙烯球造成较大误差, 其物理原因主要由聚乙烯球的中子响应特性及其几何尺寸决定。结合图 7 的中子响应函数可知, 小尺寸聚乙烯球对低能中子更为敏感。当中子在相邻聚乙烯球体中发生散射逸出时, 经历了额外的慢化过程, 导致逸出中子的能量降低, 这恰好落入了小尺寸球体的高响应截面区间, 从而导致小尺寸球体产生显著的正向计数误差。相反, 12 英寸大尺寸聚乙烯球虽然主要用于探测高能中子, 但由于其物理截面最大, 捕获相邻球体逸出杂散中子的几何概率显著增加, 因此也受到了较为明显的球间散射影响。中间尺寸的球体由于其响应区间和几何截面的中庸特性, 受球间能谱漂移的影响相对较弱。

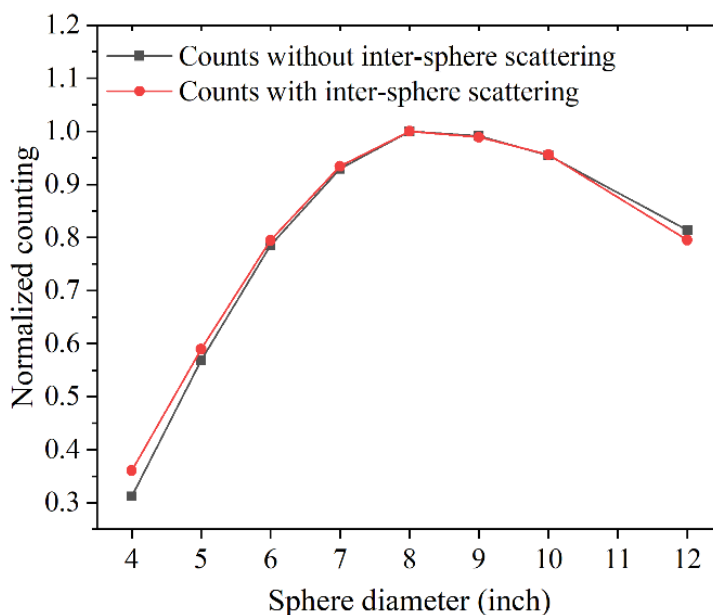


Figure 6. Normalized counts of polyethylene spheres with or without inter-sphere scattering

图 6. 有无球间散射情况下聚乙烯球的归一化计数

4. 中子解谱

多球谱仪并不能直接测量中子能谱, 而是一种间接测量中子能谱的方法, 具体的数学原理如公式(3)所示:

$$N_i = \int \Phi(E) R_i(E) dE, c \quad (3)$$

其中 m 代表的不同直径的聚乙烯球的数量, N_i 代表了第 i 个球的计数结果, $\Phi(E)$ 为待求中子能谱, $R_i(E)$ 为第 i 个球的中子响应函数。在计算得到中子响应函数之后, 再根据多球谱仪实际计数测量结果, 便可求解中子能谱。

在实际运算中, 常常将能量划分为若干个能量组, 则可将式(3)写成离散形式,

$$N_i = \sum_{j=1}^n R_{ij} \Phi_j, i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (4)$$

R_{ij} 是一个 $m \times n$ 的响应函数矩阵, Φ_j 是离散化后的待测中子能谱, 它们与中子计数 N_i 构成了有 m 个线性方程和 n 个未知数组成的线性方程组。多球谱仪的聚乙烯球的数目有限, 而中子能谱的离散值数据一般在几十到几百个, 这意味着 $m < n$, 所以该方程属于欠定方程, 有非唯一解, 需要通过解谱算法来获取最优解。

4.1. 中子响应函数

中子响应函数是求解中子能谱的关键, 它反映了聚乙烯球对不同单一中子能量的探测率, 不同尺寸聚乙烯球的响应函数不同, 以便测量不同范围的中子能谱。多球谱仪的中子响应定义为在单一中子能量的辐照条件下, 聚乙烯球体探测到的中子计数与入射中子注量的比值, 它是入射中子能量的函数[16]。如公式(5)所示:

$$RE = \frac{N}{\Phi(E)} \quad (5)$$

我们在 10^{-9} 至 15 MeV 的能量区间选取多个单能中子点, 展示不同尺寸的聚乙烯对不同能量中子的探测率。Geant4 获取的中子响应函数如图 7 所示, 小尺寸聚乙烯球的响应函数曲线在低能区率先达到峰值, 并且聚乙烯球尺寸越大, 其响应函数曲线的峰值所在能量区间越高。中子响应函数表明聚乙烯球尺寸越小, 越容易探测到能量较低的中子; 聚乙烯球尺寸越大, 越容易探测到能量越高的中子。

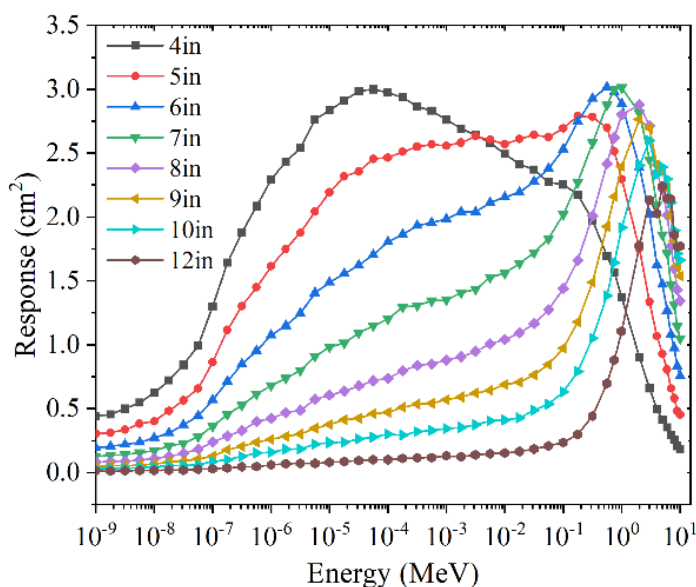


Figure 7. Neutron response function of the ball spectrometer

图 7. 球谱仪的中子响应函数

4.2. 实验结果及修正

本次实验使用的 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子源由中国原子能科学研究院 1978 年生产, 编号为 0078AB473395, 活度为 2.0×10^8 Bq。如图 8 所示, 在中子源与 SP9 距离为 40 cm 用时, 我们实验测得了八个聚乙烯球的中子计数。



Figure 8. Multi-ball spectrometer experiment site

图 8. 多球谱仪实验现场

通过以上实验室环境散射分析结论, 我们对实验测得中子计数进行修正, 主要扣除了空气散射、地面散射和球间散射对实验计数产生的影响。修正计数等于原始计数减去散射计数, 其计算公式如式 6 所示:

$$I_{ex} = I_o - I_o(A\alpha + B\beta + Cr), \quad A = \frac{\alpha}{\alpha + \beta + r}, \quad B = \frac{\beta}{\alpha + \beta + r}, \quad C = \frac{r}{\alpha + \beta + r}, \quad (6)$$

其中, I_o 是原始计数, α 是空气散射率, β 是占据主导地位的地面散射率(忽略了极小份额的墙壁与天花板散射), r 是球间散射率, A、B、C 为分别为其中一种散射率占总散射率的比值。Geant4 模拟计算所得散射率及实验计数的修正结果如表 2 所示。需要指出的是, 表 2 中所使用的 40 cm 距离下的各项散射率(如空气散射率), 并非由图 3 的多距离趋势线内插得出, 而是专门针对实际实验距离(中子源与 SP9 距离为 40 cm)重新进行的独立 Geant4 精准模拟所提取的对应数值。

Table 2. Raw experimental data and scattering-corrected data

表 2. 实验原始数据与散射修正数据

球直径	原始数据	空气散射率	地面散射率	球间散射	修正数据
4	534	0.34%	29.72%	12.42%	404
5	1077	0.31%	26.30%	7.55%	841
6	1161	0.29%	23.22%	5.38%	933
7	1717	0.28%	21.07%	4.74%	1410
8	1768	0.26%	19.81%	4.21%	1469
9	2367	0.25%	18.13%	3.96%	2002
10	1959	0.24%	14.80%	4.34%	1718
12	662	0.22%	12.87%	1.99%	588

4.3. 解谱算法与结果

本文使用较为广泛的 Gravel 算法来进行解谱[17], 该算法基于非线性最小二乘法属于迭代计算。它是在 SAND-II 算法的基础上进行了修改创新演变而来。在迭代的过程中, 不是直接对 Φ_j 进行迭代, 而是将其进行对数变换, 对 $\ln \Phi_j$ 进行迭代, 这样做有效地避免解谱结果中出现负值的情况。

对公式(4)做变换, 可以得到公式(7)。

$$N_i = \sum_{j=1}^n \left\{ R_{ij} \exp(\ln \Phi_j) \right\} \quad (7)$$

对其进行泰勒展开, 忽略高次项。

$$\ln N_i - \ln N_i^{(k)} + \sum_{j=1}^m w_{ij}^{(k)} (\ln \Phi_j - \ln \Phi_j^{(k)}) + \dots \quad (8)$$

$$w_{ij}^k = \frac{R_{ij} \exp(\ln \Phi_j)}{N_i^{(k)}} \cdot \frac{N_i^2}{\sigma_i^2} \quad (9)$$

$$N_i^{(k)} = \sum_{j=1}^n \left\{ R_{ij} \exp(\ln \Phi_j^{(k)}) \right\} \quad (10)$$

汇总之后, Gravel 算法的迭代表达式可以写为式(10)。

$$\Phi_j^{k+1} = \Phi_j^k \exp \left(\frac{\sum_{i=1}^m \left(\ln N_i - \ln \sum_{j=1}^n \left[R_{ij} \exp(\ln \Phi_j^{(k)}) \right] \right) w_{ij}^k}{\sum_{i=1}^m \frac{w_{ij}^k}{\sigma_i^2}} \right) \quad (11)$$

其中, k 为迭代次数, Φ_j^{k+1} 为第 $k+1$ 次迭代后的中子谱通量。 σ_i 为第 i 个计数的测量误差值, $\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{N_i}}$, 若 N_i 的数值为 0, 则 σ_i 取 1。

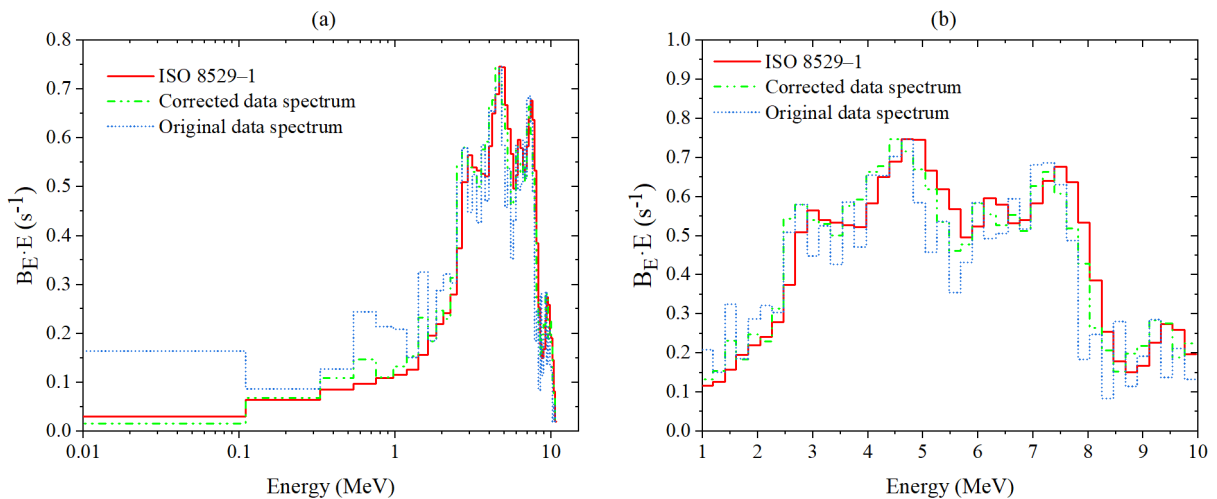


Figure 9. Comparison of spectral results between original data and calibration data, the left (a) shows the neutron spectrum in logarithmic coordinates, and the right (b) shows the neutron spectrum expansion in linear coordinates from 1 to 10 MeV

图 9. 原始数据与修正数据的谱结果对比: 左图(a)为对数坐标下的中子能谱; 右图(b)为 1~10 MeV 区间线性坐标下展开的中子能谱

基于上述原理, 我们利用 MATLAB 实现 Gravel 算法, 对聚乙烯球的原始实验数据和散射修正后的数据进行解谱。同时我们采用 ISO 8529-1 [18]的中子谱作为标准谱, 对两种数据的解谱效果进行对比。

解谱对比结果如图 9 所示, 红色谱为 ISO 标准谱, 蓝色虚线谱为原始数据谱, 绿色虚线谱为修正数据谱。左图为中子能谱在对数域的展示, 为了更好地对比解谱效果, 我们将 1~10 MeV 的中子能谱在线性域展开。从图中可以看出, 在修正原始实验数据之后获得能谱比原始数据更加贴近标准谱, 显示我们在修正环境散射因素影响之后得到的中子谱更加精准。

为了准确评估中子能谱展开效果, 我们选择采用均方误差(RMSE)来度量中子能谱与标准中子能谱之间的差异。RMSE 值越小, 表明解谱效果越好。具体的计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\Phi - \Phi_{ref})^2} \quad (12)$$

其中, n 为能量点个数, Φ 为求解的中子能谱结果, Φ_{ref} 为 ISO 8529-1 所提供的标准中子能谱。我们计算得到原始数据中子谱的 RMSE 为 9.76%, 修正数据中子谱的 RMSE 为 6.01%, 校准后中子谱的 RMSE 低于原始数据中子谱, 减少了 3.75%。结果表明校准后的实验数据更加符合标准中子能谱, 验证我们的散射校准提高了中子能谱的测量精度。

5. 结论

本文通过 Geant4 模拟中子实验环境, 分析了空气、实验室墙壁及球间散射对多球谱仪测量 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子源的计数影响。模拟结果显示: 空气散射与中子源聚到聚乙烯球的距离有关, 距离越远, 空气散射影响越大。实验室大厅散射中, 实验室地面是主要的散射来源。球间散射对大尺寸和较小尺寸的聚乙烯球计数影响较大。然后我们基于模拟结果对实际实验数据进行修正, 扣除环境散射对聚乙烯球计数的影响, 并且使用 Gravel 算法求解中子能谱。修正原始实验数据之后的中子能谱更加接近 ISO 标准中子谱, 其 RMSE 减少了 3.75%。实验结果证明: 实验室环境散射影响分析必不可少, 扣除实验室散射中子的影响可以提高中子能谱的测量精度。

基金项目

本研究得到国家自然科学基金(项目编号: 12205062)资助。

参考文献

- [1] 徐子虚, 曲国峰, 王艺舟, 等. 加速器中子源大厅内散射中子分布的模拟[J]. 原子能科学技术, 2020, 54(7): 1308-1317.
- [2] ISO (2000) ISO 8529-2, Reference Neutron Radiation-Part 2: Calibration Fundamentals Related to the Basic Quantities Characterizing the Radiation Field. ISO.
- [3] Obeid, M.H., Ismail, A., Bitar, A., Alahmad, M. and Shweikani, R. (2021) Measurement of the Scattered Neutrons Using the Shadow Cone Methodology in a Neutron Calibration Bunker. *Applied Radiation and Isotopes*, **177**, Article ID: 109916. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2021.109916>
- [4] Asgari, A., Hosseini, S.A., Choopan Dastjerdi, M.H. and Mokhtari, J. (2024) Determination of the Neutron Scattering Contribution in a Neutron Calibration Field Based on MNSR. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **1061**, Article ID: 169154. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2024.169154>
- [5] 左应红, 朱金辉, 陶应龙, 等. 密闭实验大厅内散射中子注量的模拟研究[J]. 强激光与粒子束, 2017, 29(11): 136-141.
- [6] Li, C., Zhou, H., Liu, H., Sun, T., Fan, H., Yang, J., et al. (2023) Neutron Spectrometry of D_2O -Moderated ^{252}Cf with Bonner Sphere Spectrometer. *Applied Radiation and Isotopes*, **197**, Article ID: 110824. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2023.110824>
- [7] 孙博文, 代文翰, 张辉, 等. $^{241}\text{Am-Be}$ 强中子源刻度多球中子谱仪[J]. 核电子学与探测技术, 2022, 42(6): 1063-1067.

-
- [8] 李永明, 陈金象, 张国辉, 等. 混合压片型 $^{241}\text{AmO}_2\text{-Be}$ 中子源物理特性研究[J]. 原子能科学技术, 2013, 47(1): 1-6.
- [9] Bramblett, R.L., Ewing, R.I. and Bonner, T.W. (1960) A New Type of Neutron Spectrometer. *Nuclear Instruments and Methods*, **9**, 1-12. [https://doi.org/10.1016/0029-554x\(60\)90043-4](https://doi.org/10.1016/0029-554x(60)90043-4)
- [10] Agostinelli, S., Allison, J., Amako, K., Apostolakis, J., Araujo, H., Arce, P., *et al.* (2003) Geant4—A Simulation Toolkit. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **506**, 250-303. [https://doi.org/10.1016/s0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/s0168-9002(03)01368-8)
- [11] Allison, J., Amako, K., Apostolakis, J., *et al.* (2016) Recent Developments in Geant4. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **835**, 186-225.
- [12] Liu, H., Sun, T., Li, C., Wang, D., Guan, X. and Zhou, H. (2024) Design and Testing of an Irradiation Room with Low Room-Scattering for Neutron Calibration. *Applied Radiation and Isotopes*, **211**, Article ID: 111402. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2024.111402>
- [13] Al Qaaod, A.A., Reginatto, M., Zbořil, M. and Zimbal, A. (2024) The Contribution of the Air and Room Scattered Neutrons in the PTB Calibration Facility. *Radiation Physics and Chemistry*, **217**, Article ID: 111490. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2023.111490>
- [14] 张颂, 魏彪, 刘易鑫, 等. $^{241}\text{Am-Be}$ 中子参考辐射的蒙特卡罗模拟研究[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(5): 117-123.
- [15] 黄悦, 屈国普, 邹涛, 等. 在线式多球中子谱仪球球干扰模拟研究[J]. 核电子学与探测技术, 2015, 35(12): 1216-1220.
- [16] Hu, Z.M., Zheng, Y.H., Fan, T.S., Cui, Z.Q., Chen, J., Zhang, H., *et al.* (2020) Experimental Evaluation of the Geant4-Calculated Response Functions of a Bonner Sphere Spectrometer on Monoenergetic Neutron Sources. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **965**, Article ID: 163836. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.163836>
- [17] Wang, G., Han, R., Liu, J., Ouyang, X., He, J. and Yan, J. (2017) Comparison and Research on the GRAVEL and PRIP Algorithms of Neutron Energy Spectrum Unfolding. *Radiation Detection Technology and Methods*, **1**, Article No. 11. <https://doi.org/10.1007/s41605-017-0011-5>
- [18] ISO (2021) ISO 8529-1, Neutron Reference Radiations Fields-Part 1: Characteristics and Methods of Production. ISO.