

工程探索

天然放射性 γ 能谱实验研究

宋国锋 谢 宁 蔡 俊 王中平 张增明
(中国科学技术大学物理学院, 安徽 合肥 230026)

摘 要 本文提出一种基于天然放射性核素的 γ 能谱实验教学方案, 以替代传统人工放射源 (如 ^{137}Cs 、 ^{60}Co)。实验采用氧化镥中的 ^{176}Lu 和氯化钾中的 ^{40}K 作为天然 γ 射线源, 分析表明实验使用的材料的放射性活度远低于国家标准规定的豁免放射源活度上限值, 无辐射安全风险。使用 NaI(Tl) 闪烁体能谱仪采集能谱, 分析了 ^{176}Lu (88keV、202keV、307keV) 和 ^{40}K (1461keV) 的能谱特征, 完成多峰能量定标 (线性相关系数 > 0.999), 实验进一步测量分析了环境放射性本底能谱和铜片对 γ 射线的吸收特性, 线性衰减系数测量准确 (相对标准不确定度 $< 5\%$), 与理论值吻合。研究结果表明, 天然放射性材料可有效支持 γ 能谱实验教学、拓展传统 γ 能谱实验的内容, 也为无放射源资质的院校降低实验开设门槛、提供安全、经济的实验方案。

关键词 天然放射性; γ 能谱实验; ^{176}Lu ; ^{40}K ; γ 射线的吸收

EXPERIMENTAL STUDY OF GAMMA-RAY SPECTRA USING NATURAL RADIOACTIVITY

SONG Guofeng XIE Ning CAI Jun WANG Zhongping ZHANG Zengming

(School of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026)

Abstract This paper proposes an experimental teaching scheme of gamma energy spectrum based on natural radionuclides to replace traditional artificial radioactive sources (such as ^{137}Cs , ^{60}Co). The experiment utilized ^{176}Lu in lutetium oxide and ^{40}K in potassium chloride as natural gamma-ray sources. Analysis indicated that the radioactive activity of the materials used in the experiment was far below the upper limit for exempted radioactive source activities stipulated by national standards, and there was no radiation safety risk. Energy spectra were collected using a NaI (Tl) scintillation spectrometer. The energy spectrum characteristics of ^{176}Lu (88keV, 202keV, 307keV) and ^{40}K (1461keV) were analyzed, and multi-peak energy calibration was completed (linear correlation coefficient > 0.999). The experiment further measured and analyzed the environmental radioactive background energy spectrum and the absorption characteristics of copper sheets for gamma rays. The linear attenuation coefficient was measured accurately (relative standard uncertainty $< 5\%$). The research results show that natural radioactive materials can effectively support the teaching of gamma energy spectrum experiments, expand the content of traditional gamma energy spectrum experiments, lower

收稿日期: 2025-07-27

通信作者: 宋国锋, sgf@ustc.edu.cn。

引文格式: 宋国锋, 谢宁, 蔡俊, 等. 天然放射性 γ 能谱实验研究[J]. 物理与工程, 2025, 35(6): 240-245.

Cite this article: SONG G F, XIE N, CAI J, et al. Experimental study of Gamma-ray spectra using natural radioactivity[J]. Physics and Engineering, 2025, 35(6): 240-245. (in Chinese)

the threshold for setting up experiments for colleges and institutions without radioactive source qualifications, and provide safe and economical experimental solutions.

Key words natural radioactivity; Gamma-ray spectrum experiment; ^{176}Lu ; ^{40}K ; absorption of gamma rays

γ 能谱实验是近代物理实验教学的重要内容之一^[1,2],对帮助学生理解 γ 射线与物质的相互作用原理、探测器的工作原理及数据分析处理方法具有不可替代的作用。传统的 γ 能谱实验中的 γ 射线源通常为 ^{137}Cs 和 ^{60}Co 等人工放射源,这些放射源通过人工核反应产生,使用过程中存在辐射安全风险,因而其生产、运输、使用和退役均受到严格监管,以防止核事故和辐射泄漏,且对使用和存储场所、放射源操作和管理人员均需要资质认证以确保安全^[3]。这限制了该实验在无放射源的高校或研究单位的开设和推广。

除了人工放射源之外,天然放射性核素也无处不在,有些是自地球形成以来就存在的原始放射性核素,由于其半衰期长(约10亿年及以上),至今仍未完全衰变,例如 ^{238}U 、 ^{232}Th 和 ^{40}K 等以及它们的多个衰变子体。天然放射性核素广泛存在于环境中的土壤、岩石和日常材料中,为替代人工源提供了可行路径。相比于传统的放射源,天然放射性材料辐射剂量低、无安全风险、易于获取,国家审管部门对其使用无特殊限制,因此利用天然放射性进行实验可以降低学生对辐射的恐惧感、减少放射源的购买和管理成本、降低实验的门槛。国内外已有研究利用天然放射性进行实验教学,例如文献[4]利用环境中本底 γ 能谱进行能谱仪的能量刻度,文献[5]利用含钾材料中的 ^{40}K 设计了教学实验。本研究选取多种不同的天然放射性材料,设计了丰富且完整的实验项目,包含各种定性和定量的数据分析,同时为了验证实验效果,利用标准放射源进行了实验来对比验证。

本研究选取 ^{176}Lu 和 ^{40}K 作为天然 γ 射线源,这两种核素衰变时发出 γ 射线,且含Lu和K的物质生产生活中应用广泛、易于获得。例如:氧化镨(Lu_2O_3)是陶瓷工业中的添加剂,含Lu闪烁晶体(如LSO、LYSO)广泛用于核医学中的PET(正电子发射断层扫描)系统^[6]。 ^{176}Lu 的天然丰度为2.59%,半衰期为 3.78×10^{10} 年,衰变时发射3个能量分别88keV、202keV和307keV的 γ 射线。钾元素在自然界和生物体内分布广泛,氯化钾

(KCl)是世界上使用量最大的钾肥,也是医学上电解质平衡调节药物。 ^{40}K 天然丰度为0.0117%,半衰期为 1.28×10^9 年,衰变时发射1461keV的 γ 射线^[7]。

本研究采用工业上常用的氧化镨和氯化钾进行 γ 能谱实验。首先对实验样品的辐射安全性进行了分析,然后使用NaI(Tl)闪烁体能谱仪进行了一系列实验,对实验结果进行了分析,并且与 ^{137}Cs 和 ^{60}Co 放射源的实验结果进行了对比,以验证实验效果。

1 实验材料的辐射安全性分析

实验使用了100g Lu_2O_3 和1000g KCl。为保障实验安全性,需要分析实验样品的放射性活度。放射性核素原子数 N 随时间 t 衰变遵循以下公式^[8]

$$N = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 e^{-t/\tau} \quad (1)$$

其中, λ 为衰变常数, τ 为粒子寿命,核素半衰期 $T_{1/2}$ 和衰变常数之间的关系为 $\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$ 。放射性活度 A 为单位时间内发生衰变的原子核个数

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \frac{m}{M_r} N_A \quad (2)$$

其中, M_r 为放射性核素的相对原子质量, m 为材料样品中放射性核素的总质量,阿伏伽德罗常数 $N_A = 6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ 。

Lu元素的相对原子质量为175.0,氧元素相对原子质量为16.0,100g Lu_2O_3 含Lu元素质量为87.94g,其中 ^{176}Lu 占2.59%,即2.28g,代入式(2)可得放射性活度为 $4.56 \times 10^3 \text{ Bq}$ 。

K元素的相对原子量为39.1,氯元素的相对原子量为35.5,100g KCl含K元素质量为52.4g,其中 ^{40}K 占0.0117%,即0.061g,代入式(2)可得放射性活度为 $1.67 \times 10^4 \text{ Bq}$ 。

^{176}Lu 和 ^{40}K 豁免活度均为 10^6 Bq ^[3],实验中使用的样品中的放射性活度远低于这一限值,可以放心使用。

2 实验内容和结果分析

本实验使用 2×2 英寸的 NaI(Tl) 闪烁体 γ 谱仪进行 γ 能谱测量, 多道脉冲幅度分析器道数设为 2048 道。实验的内容包括识别能谱特征结构、能谱特征峰的拟合寻峰、能量定标、能谱仪的能量分辨率分析和物质对 γ 射线的吸收特性测量等。同时也使用 ^{137}Cs (662keV, 半衰期为 30.17 年) 和 ^{60}Co (1173keV, 1333keV, 半衰期为 5.27 年) 放射源进行了对比实验以作对比验证。

2.1 能谱测量和能谱特征分析

实验中由于样品的放射性活度较低, 因此需尽可能将 Lu_2O_3 和 KCl 靠近 γ 能谱仪探头, 以提高探测到的 γ 射线计数率。实验中首先需采集一定时长的本底能谱, 计算得到多道每一道的本底计数率, 然后放置待测射线源样品到能谱仪探头附近, 采集一定时长的 γ 能谱, 扣除掉本底能谱即可得到目标核素的 γ 能谱。图 1(a) 为 ^{176}Lu 能谱, 图中可见两个较高的峰, 分别是 202 和 307keV 的全能峰, 较高能处有个明显的峰为 202keV 和 307keV 的射线同时被探测到时的 509keV 的叠加峰, 低能处的两个峰分别是 88keV 的全能峰(由于叠加在高能 γ 射线的康普顿平台上而不明显)和 Lu 的特征 X 射线峰; 图 1(b) 为 ^{40}K 的 γ 能谱, 最明显的峰为 1461keV 的全能峰, 左侧为康普顿平台, 有一个不明显的峰为背散射峰。图 1(c)、(d) 分别为 ^{137}Cs 和 ^{60}Co 的 γ 能谱。

2.2 能量刻度和能量分辨率

能谱仪对入射的 γ 射线的能量和它产生的脉冲幅度(即多道多道测得能谱的道数)之间为线性关系, 这是利用能谱仪进行射线能量分析与判断未知放射性核素的重要依据。通常在实验上利用多个已知能量的峰位对能量作图, 这条曲线即能量刻度曲线, 典型的能量刻度曲线是一条直线

$$E(x_p) = Gx_p + E_0 \quad (3)$$

其中, x_p 为峰位, E_0 为直线的截距, G 为斜率(能谱每道对应的能量, 又称为增益)。本实验可使用 ^{176}Lu 能谱中 202keV、307keV、509keV 和 ^{40}K 能谱中的 1461keV 的进行能量刻度。

能量刻度首先需要寻峰, 即分析能谱数据得到特征峰的峰位, 单能的 γ 射线全能峰近似为高斯分布, 在精度要求不高的情况下可直接用高斯

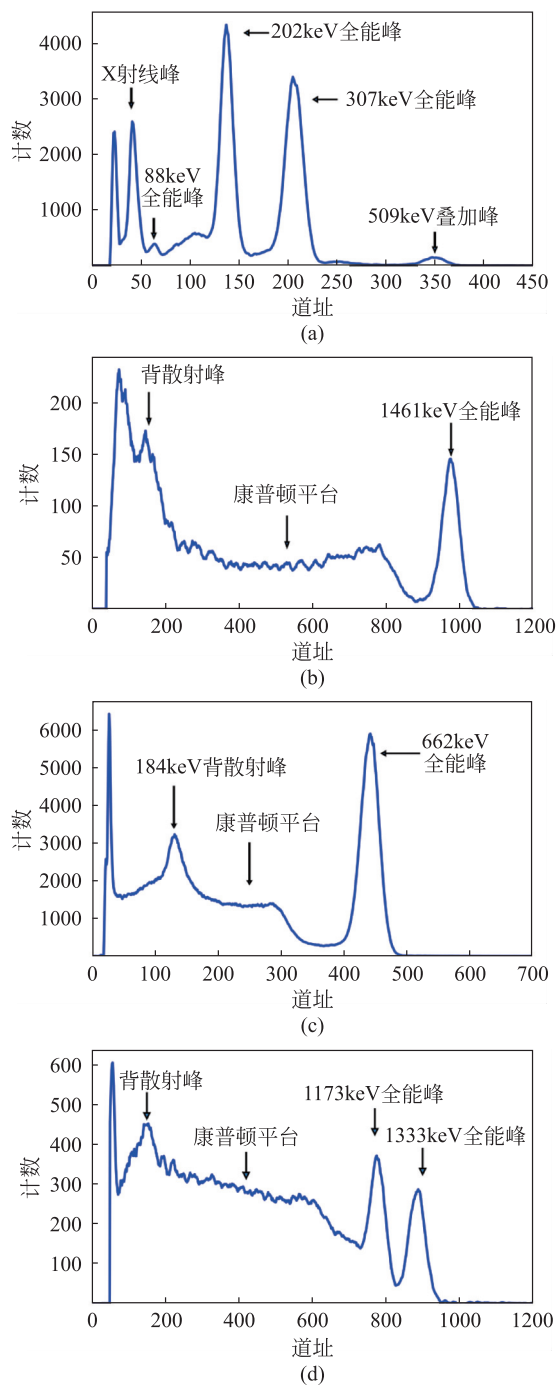


图 1 ^{176}Lu 、 ^{40}K 、 ^{137}Cs 和 ^{60}Co 能谱图

(a) ^{176}Lu ; (b) ^{40}K ; (c) ^{137}Cs ; (d) ^{60}Co

函数拟合得到峰位等信息。然而实际的实验观测通常是混合 γ 谱, 即某一个 γ 射线能量的全能峰叠加在其他更高能量的 γ 射线的康普顿平台上, 例如图 1(a) ^{176}Lu 的 γ 能谱即为多个 γ 射线的混合谱。为了使寻峰更准确, 本实验使用高斯函数加一次多项式函数来拟合各特征峰^[9], 拟合的函数为

$$f(x) = h \exp\left(-\frac{(x - x_p)^2}{2\sigma^2}\right) + ax + b \quad (4)$$

其中, h 是峰高, x_p 是峰的中心道址, σ 是标准差。图 2 为 ^{176}Lu 能谱 202keV 全能峰和 307keV 全能峰拟合结果。其他能谱和特征峰的峰位用同样的方法可得峰位道址。

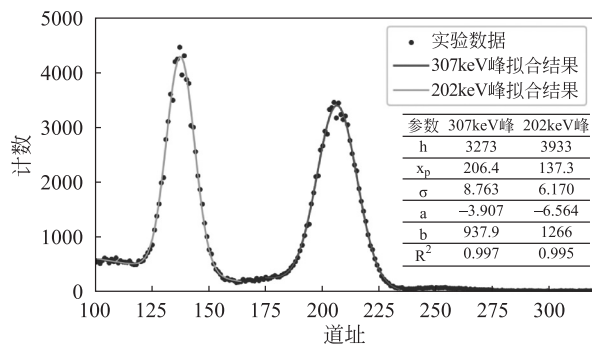


图 2 ^{176}Lu 能谱 202keV 全能峰和 307keV 全能峰拟合结果

使用 ^{176}Lu 能谱中 202keV、307keV、507keV 和 ^{40}K 能谱中的 1461keV 的峰进行能量刻度, 图 3 显示了刻度结果, 由图可见能量和道址的线性关系良好, 为检验刻度准确性, 图中同时显示了 ^{137}Cs 和 ^{60}Co 的特征峰数据, 与拟合得到的直线吻合, 说明能量刻度准确可信。

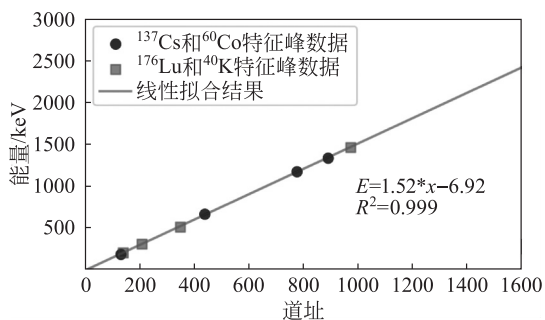


图 3 使用 ^{176}Lu 和 ^{40}K 能谱特征峰进行能量刻度结果, 图中同时显示了 ^{137}Cs 和 ^{60}Co 的特征峰数据, 与拟合得到的直线吻合

γ 能谱仪最重要的性能之一为能量分辨率, 即能谱仪分辨不同能量的 γ 射线的能力, 通常用全能峰分布曲线高度一半处的宽度 (半高全宽, FWHM) 对应的能量 ΔE 来表示能量分辨, 通常近似等于脉冲幅度分辨率, 即能量分辨率为

$$\eta = \frac{\Delta E}{E} = \frac{G \times \text{FWHM}}{E} = \frac{\Delta V}{V} \quad (5)$$

根据对全能峰的拟合结果可得全能峰的峰位

和高斯分布的标准差 σ , 对于高斯分布 $\text{FWHM} = 2.355\sigma$, 由此可计算得到 γ 能谱仪的能量分辨率: 对 202keV 和 307keV 的 γ 射线能量分辨率为 10.9%, 10.2%, 对 662keV 的 γ 射线能量分辨率为 7.8%。能谱仪对不同能量 E 的 γ 射线的能量分辨率 $\eta \propto \frac{1}{\sqrt{E}}$ [8], 实验结果与理论吻合。

2.3 未知核素识别

利用能量刻度后的 γ 能谱仪可测量环境、矿物或建筑材料中的放射性核素。实验采集实验室环境中的天然放射性本底能谱, 图 4 为实验室内的本底能谱 (能量已刻度), 采集时间为 1 小时, 图中可见 3 个明显的峰, 能量分别约 600keV、1460keV 和 2600keV。查阅文献报道的实验室所在的安徽省天然辐射来源 [10] 可知, 环境中的 γ 主要来自 ^{40}K (1461keV) 和铀系 (^{214}Bi , 609keV) 和钍系 (^{208}Tl , 583keV、2614keV) 元素。因此可以确定: 1500keV 附近的峰为 ^{40}K 1461keV γ 的全能峰, 2600keV 附近的峰为 ^{208}Tl 2614keV γ 的全能峰, 600keV 附近的峰为 ^{208}Tl 583keV 和 ^{214}Bi 609keV γ 全能峰。

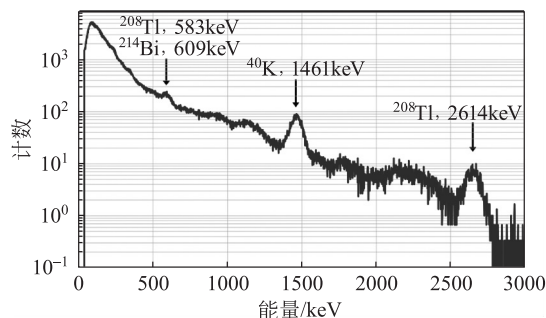


图 4 实验室环境下采集的本底 γ 能谱

2.4 γ 射线衰减系数测量

γ 射线穿过物质时与物质发生相互作用导致出射的射线强度减弱, 称为 γ 射线的吸收。 γ 射线强度在物质中的衰减服从指数规律

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (6)$$

其中, I_0 和 I 分别是射线穿过吸收物质前后的 γ 射线强度, x 为吸收材料的厚度, μ 是该材料对 γ 射线的线性衰减系数。 μ 反映了物质吸收 γ 射线的能力的大小, 与吸收物质的原子序数和密度以及 γ 射线的能量有关。在一定的实验条件下, 射线穿过吸收物质前后的强度可用对应能谱的全能峰总计数 N_0 和 N 来表示

$$N = N_0 e^{-\mu x} \quad (7)$$

实验测量铜对 ^{176}Lu 的 γ 射线的衰减系数,在射线源和能谱仪探头之间垂直插入不同厚度的紫铜片(1.2mm厚的铜片,通过改变铜片数量来改变总铜片厚度),分别采集10分钟能谱,结果见图5(a),由图可见,随着铜片厚度增加,能谱计数逐渐减小。统计全能峰计数时,选取以峰位道址 x_p 为中心左右各扩展15%对称的区间计算能谱面积,即选取区间为 $[0.85x_p, 1.15x_p]$,例如以2.2节中的方法拟合得到307keV的 γ 全能峰峰位为206道,区间选为 $[175, 237]$ 。同时,为了使得到的结果为高斯峰的净面积,还扣除了相应区间的本底面积(即拟合得到的结果中的线性部分面积),如图5(b)所示。根据计算结果可绘出 γ 射线的吸收曲线,并拟合出衰减系数,见图6(a),为了对比结果,图中同时给出了 ^{137}Cs 662keV γ 射线的吸收曲线,拟合得到铜片对202keV、307keV和662keV的 γ 射线线性衰减系数为 $1.40(2)\text{cm}^{-1}$, $1.06(2)\text{cm}^{-1}$, $0.64(1)\text{cm}^{-1}$,相对标准不确定度均低于5%。通过NIST数据库^[11]可以查到不同能量的 γ 射线在铜片中的衰减系数理论曲线(紫铜片密度取 $8.9\text{g}/\text{cm}^3$),实验值与理论值吻合良好,相对误差小于5%,见图6(b)。

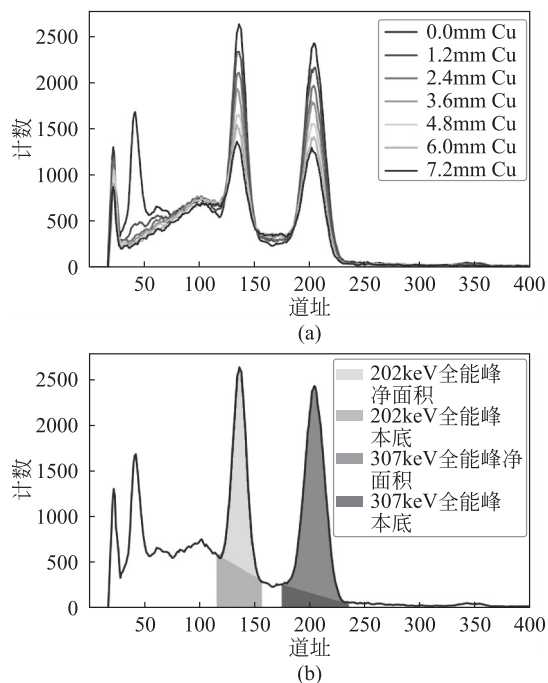


图5 ^{176}Lu 的 γ 射线能谱和全能峰面积计算方法图
(a) 不同厚度铜片吸收情况下的 γ 能谱; (b) γ 射线全能峰面积计算示意图(以铜片厚度为0时的能谱为例)

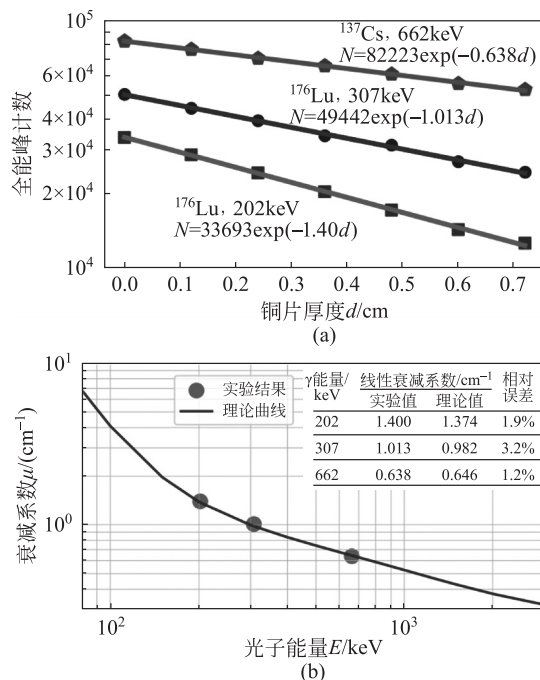


图6 γ 射线在铜片中的吸收曲线和衰减系数
(a) 不同能量的 γ 射线在铜片中的吸收曲线和线性衰减系数拟合; (b) 不同能量的 γ 射线在铜吸收体中的衰减系数实验值和理论值,理论曲线数据来自NIST数据库^[11]

3 结语

本研究针对传统 γ 能谱实验中使用放射源(如 ^{137}Cs 、 ^{60}Co)存在的辐射安全风险及监管严格问题,提出了一种创新的实验教学方案,即利用天然放射性核素 ^{176}Lu 和 ^{40}K 进行 γ 能谱实验。通过详细的分析与实验验证,证明了天然放射性材料在 γ 能谱实验中的可行性和优势。

从辐射安全性的角度出发,本研究对所选用的氧化镧和氯化钾样品进行了严格的放射性活度计算,结果显示其实验样品的放射性活度远低于国家标准规定的豁免源活度上限值(10^6Bq),因此无需特殊审批或防护措施,大大降低了实验的辐射安全风险。在实验方法和内容上,本研究采用了NaI(Tl)闪烁体能谱仪进行 γ 能谱测量,且对比分析了 ^{176}Lu 和 ^{40}K 与标准源(^{137}Cs 和 ^{60}Co)的实验结果。实验结果表明 ^{176}Lu 和 ^{40}K 的 γ 能谱特征清晰,能量定标线性相关系数 >0.999 ,与标准源实验结果高度一致,实验还测量了环境中的放射性本底并分析本底来源,分析了能谱仪的能量

分辨率,测量了 γ 射线在铜片中的吸收特性并计算了线性衰减系数,测量精度高,不确定度低,实验结果符合理论预期。

值得一提的是,实验可选择的天然放射性材料不限于本实验所使用的 Lu_2O_3 和 KCl ,亦可使用其他易获得的材料,其他含镭材料如硅酸镭、氯化镭和镭单质等,其他含钾材料如硝酸钾、硫酸钾和磷酸二氢钾等,这为天然放射性材料的选择提供了更大的灵活性。

此外,该实验可扩展的内容多,能够适应不同专业和院校的教学需求,例如:非核与粒子物理相关专业的学生,可进行基础的能谱测量、能谱特征分析和谱仪能量刻度,能谱寻峰的方法也可以适当简化;核与粒子物理相关专业的学生可以通过测量分析不同物质对不同能量的 γ 射线的吸收特性,还可以进一步结合物理仿真进行 γ 能谱精确解谱方面的训练;也可以设置一些研究性课题供学生自主研究,例如研究如何利用 γ 射线进行材料检测或探伤、利用 γ 能谱仪测量校园环境中的放射性分布特性等。

综上所述,天然放射性核素不仅可替代人工放射源完成基础 γ 能谱教学,还能拓展实验内容,引导学生关注和理解环境放射性,深化学生对 γ 射线与物质相互作用原理的理解;通过丰富的实验内容锻炼了学生的动手能力、数据分析能力和理论结合实践的能力,促进创新型人才培养;天然放射性材料的使用,可解除 γ 能谱实验对存在辐射安全风险、监管严格的放射源的依赖。利用天然放射性进行 γ 能谱实验为近代物理实验教学提供了安全、经济且易推广的新方案,可为实验教学改革提供参考。

参 考 文 献

- [1] 张增明,赵伟,王中平,等.大学物理实验第三册[M].北京:高等教育出版社,2024:116-121.
ZHANG Z M, ZHAO W, WANG Z P, et al. College physics experiment volume 3[M]. Beijing: Higher Education Press, 2024: 116-121. (in Chinese)
- [2] 吴先球,黄佐华,燕安,等.近代物理实验教程[M].3版.北京:科学出版社,2023:85-90,102-105.
WU X Q, HUANG Z H, YAN A, et al. Modern physics experiment tutorial[M]. 3th ed. Beijing: Science Press, 2023:85-90,102-105. (in Chinese)
- [3] 核工业标准化研究所. GB 18871—2002, 电离辐射防护与辐射源安全基本标准[S]. 北京:中国标准出版社,2002.
Institute of Nuclear Industry Standardization. GB 18871—2002, Basic standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources[S]. Beijing: Standards Press of China, 2002.
- [4] ALBÉRI M, BALDONCINI M, BOTTARDI C, et al. Training Future Engineers to Be Ghostbusters: Hunting for the Spectral Environmental Radioactivity[J]. Education Sciences, 2019, 9(1).
- [5] 于华伟,首祥云,郭俊鑫,等.无放射源伽马能谱测量实验设计[J].大学物理,2014,33(3):5.
YU H W, SHOU X Y, GUO J X, et al. The experiment design of gamma spectrum measurement without radiation source[J]. College Physics, 2014, 33(3):5. (in Chinese)
- [6] 秦来顺,任国浩.硅酸镭闪烁晶体的研究进展与发展方向[J].人工晶体学报,2003,32(4):9.
QIN L S, REN G H. Progress and prospect in the development of LSO scintillation crystal[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2003, 32(4):9. (in Chinese)
- [7] International Atomic Energy Agency-Nuclear Data Services [DB/OL]. (2025-07-04), [2025-07-06]. <https://www-nds.iaea.org/>
- [8] 汪晓莲,李澄,邵明,等.粒子探测技术[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2009:7-9,84-88.
WANG X L, LI C, SHAO M, et al. Particle detection technology[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2009: 7-9, 84-88. (in Chinese)
- [9] 李澄.核与粒子物理实验方法[M].北京:科学出版社,2021:126-136.
LI C. Experimental methods of nuclear and particle physics [M]. Beijing: Science Press, 2021: 126-136. (in Chinese)
- [10] 朱锦秋,邵广南,江山,等.安徽省土壤中天然放射性核素含量调查[J].辐射防护,1991,11(4):291-294.
ZHU J Q, SHAO G N, JIANG S, et al. Survey of natural radionuclide contents in soil in Anhui province[J]. Radiation Protection, 1991, 11(4): 291-294. (in Chinese)
- [11] XCOM: Photon Cross Sections Database[DB/OL]. (2024-08-14), [2025-07-06]. <https://www.nist.gov/pml/xcom-photon-cross-sections-database>.