



γ 射线探测综合实验教学平台开发

覃雪, 余鑫, 韩寰宇, 陈秀莲, 刘军*

(四川大学物理学院, 成都 610064)

摘要: 针对传统 γ 射线探测实验装置定位精度不高、搭建麻烦、可开展的实验项目少, 不利于实验重复与教学等缺点, 该文设计开发了一款 γ 射线探测与测量综合实验教学平台, 完成了平台的机械设计加工以及 γ 射线探测专用数字化多道分析器研制。基于该平台, 可完成多个关于 γ 射线探测与应用的认识、基础、综合型、探究型实验项目。实践教学效果证明, 该平台稳定性好, 操作性强, 实验结果准确, 方便教师教学, 能使学生更好地理解与掌握 γ 射线的性质、 γ 射线与物质相互作用的机制以及 γ 射线的应用。

关键词: γ 射线; 探测; 实验教学平台; 数字化多道

中图分类号: TL81

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230008

Development of a Comprehensive Experimental Teaching Platform for the γ -ray Detection

QIN Xue, YU Xin, HAN Huanyu, CHEN Xiulian, LIU Jun*

(College of Physics, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: Aiming at the disadvantages of traditional γ -ray detection experimental equipment such as low positioning accuracy, troublesome construction, few experimental projects that can be carried out, and not conducive to experiment repetition and teaching, this paper designs and develops a comprehensive experimental teaching platform for the γ -ray detection and measurement, completes the mechanical design and processing of the platform, and develops a multifunctional digital energy spectrometer for the γ -ray detection. Based on this platform, several cognitive, basic, comprehensive, and exploratory experimental projects on γ -ray detection and application can be completed. Practical teaching results have proved that the platform has good stability, strong operability, and accurate experimental results, and it is convenient for teachers to teach, which can enable students to better understand and master the properties of γ -rays, the mechanism of γ -rays interacting with substances, and the applications of γ -rays.

Key words: γ -ray; detection; experiment teaching platform; digital energy spectrometer

研究 γ 射线与物质的相互作用, 在原子和原子核物理、核辐射探测和防护、核技术应用和核能利用等许多领域中有着重要的意义^[1-4]。为核专业本科生开设 γ 射线探测与测量等相关实验, 有助于他们更加深入地理解 γ 射线的性质以及与物质相互作用的机制。通过调研发现, 国内多个涉核高校均开设有 γ 射线测量相关的实验^[5-6], 但是实验装置大多采用临时搭建方式, 其中包括放射源放置、吸收片选取与放置、探测器位置移动等, 因此其定位精度不高、搭建麻烦、可开展的

实验项目少, 不利于实验重复与教学, 也不利于开展探究型实验。传统的基于“NIM”标准的 γ 射线探测器读出电子学部件体积庞大, 调试复杂, 且学生在插拔线缆过程以及调整旋钮(如高压、放大器增益、信号极性)过程中容易损坏线缆和旋钮, 不利于实验教学仪器的维护。

基于以上原因, 四川大学核工程与核技术实验室开发了一款 γ 射线探测综合实验教学平台。基于该平台, 可开设多个认识、基础、综合型、探究型实验项目, 部分实验项目如表 1 所示。

收稿日期: 2022-12-29; 修回日期: 2023-07-08

基金项目: 四川大学实验技术立项批准项目(SCU201020)。

作者简介: 覃雪(1989-), 女, 硕士, 实验师, 主要从事辐射探测实验教学工作。

*通信作者: 刘军(1983-), 男, 硕士, 实验师, 主要从事辐射探测实验教学及实验室辐射安全管理工作。E-mail:

liujunl@scu.edu.cn

表 1 本实验平台可开设的部分实验项目

序号	实验项目名称
①	闪烁体探测器认识与操作
②	γ 射线能谱测量
③	γ 放射源强度平方反比定律验证
④	γ 射线吸收
⑤	利用 γ 射线测量样品厚度
⑥	利用 γ 射线测量NaCl溶液密度
⑦	γ 射线料位测量
⑧	γ 射线反散射谱的影响因素探究

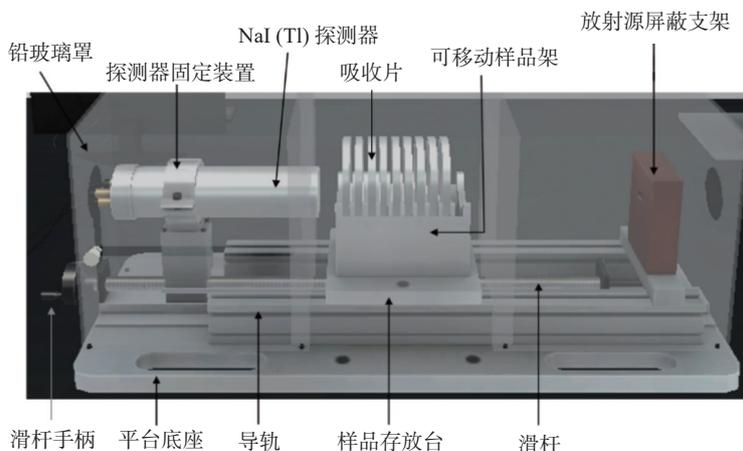
除了以上实验,学生还可利用该平台进行创新性实验的研究与开展。通过开发与使用该平台,一方面规范了 γ 射线测量相关实验的教学,扩展升华了实验内容;另一方面增加了实验平台的可靠性、安全性和可操作性。通过这两方面的改进,能够使学生在实验过程中更深刻地理解实验原理,将课本上理论知识形象化、具体化,并与工业上 γ 射线的具体应用联系起来,为他们今后从事更为先进的工作打下基础。

1 平台设计

1.1 平台机械设计

γ 射线探测综合实验教学平台主要由NaI(Tl)闪烁体探测器、机械平台、实验附件、数字化多道分析器、谱采集分析软件组成。机械平台由铅玻璃罩、平台底座、滑杆、导轨、探测器固定装

置、放射源屏蔽支架、样品存放台、可移动样品架组成,整体结构如图1所示。70 cm长滑杆安装在平台底座中央,探测器固定装置安装在滑杆上,样品存放台、放射源屏蔽支架通过螺丝固定在底座两侧导轨上,导轨上标有刻度值,转动滑杆手柄时,可改变探测器与放射源之间的距离,其值可直接通过刻度读出。可移动样品架底座与样品存放台大小相当,不需要时可从样品存放台上移开,样品架上面设计有10个半圆镂空形状凹槽,用来放置某些实验附件。实验附件为不同规格的铅、铜、铝吸收片和有机玻璃量筒。吸收片插入样品架中,最多可插入10片,样品架放入位于探测器固定装置与放射源支架之间的样品存放台。铅、铜、铝吸收片的厚度经过理论与模拟计算确定,铅的厚度为2 mm、铜的厚度为3 mm,铝的厚度为10 mm,插入不同的片数,可使得 ^{137}Cs 放出的0.662 MeV γ 射线强度衰减10%~90%,用来研究不同材料对 γ 射线的屏蔽性能以及 γ 射线在不同物质中的吸收规律。有机玻璃量筒放置在样品存放台,将量筒里面加入不同液体,可用来进行 γ 放射性测量不同液体密度的研究,加入不同深度的液体或固体,可用来进行 γ 放射性测量物料位置的研究。有机量筒设计成长方体,与样品存放台的长宽匹配,可保证进行上述实验研究过程中射线穿过物质的厚度不变。

图 1 γ 射线探测综合实验教学机械平台主体

放射源屏蔽支架的主要功能为固定放射源以及屏蔽电离辐射,保证实验人员的剂量安全。考虑到加工方便以及制作成本,支架材质选为铜,具体尺寸通过蒙特卡罗模拟得到。实验室中 ^{137}Cs

放射源活度为 $3.4 \times 10^5 \text{ Bq}$,现利用一定厚度的铜将其屏蔽,模拟计算屏蔽后的空气吸收剂量率。采用MCNP^[7]蒙特卡罗程序分别模拟了铜屏蔽体厚度为1、2、3、4、5、6 cm的情况,结果如图2所示。

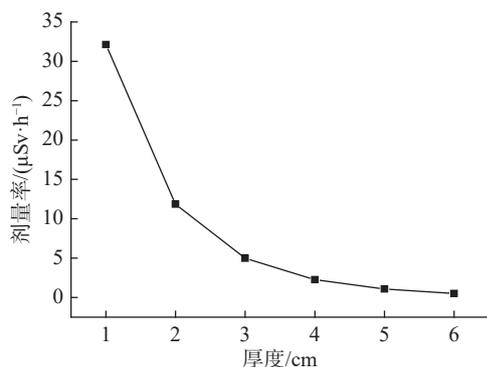


图2 0.662 MeV γ 射线穿过不同厚度铜在其后产生的空气吸收剂量率

由图2可知,随着铜屏蔽体厚度逐渐增加, ^{137}Cs 放射源在其后产生的空气吸收剂量率逐渐减小,当铜屏蔽体厚度增加到4 cm时,吸收剂量率减小到 $2.27\ \mu\text{Sv}/\text{h}$,考虑到平台外面的铅玻璃罩对射线仍能起到一定的屏蔽作用,因此屏蔽体厚度设计成4 cm。放射源屏蔽支架结构如图1所示,中间镂空部分为了放置放射源,放射源与探测器和吸收片水平方向在一条直线上,放射源顶部以

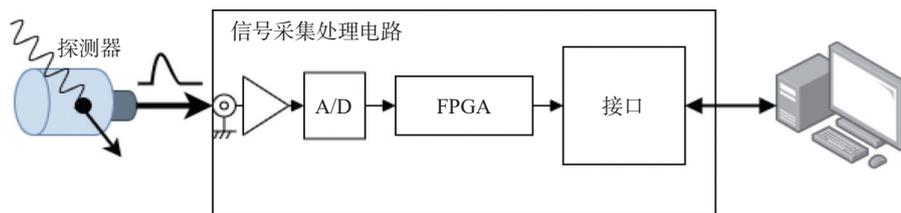


图3 核心电路主要结构图

由图3可知,电路由模拟信号链、模数转换器(ADC)、可编程逻辑器件(FPGA)以及接口电路4个部分组成。模拟信号链用于匹配NaI(Tl)探测器输出信号以及对小信号进行预放大;放大后的信号进入ADC进行模数转化;转化后的数字量在FPGA中进行流水线处理,得到能谱信息(计数随幅度分布关系);然后再由USB接口发送到计算机上显示和存储。在该电路中,ADC选型为ADI公司的AD9258-80,采样率为80 MS/s,采集精度为14bit;FPGA选型为Xilinx公司的XC6SLX100T-FGG676,能够满足绝大多数探测器的信号采集与处理。

探测器信号经过ADC转换后为数字信号,发送到FPGA中进行数字信号处理。数字信号处理过程如图4所示,信号进入FPGA后分为两路:一路进入慢梯形成形用于提高信号信噪比;另一路进入到快梯形成形用于信号触发和堆积判弃计

及两边的铜厚度均为4 cm。铅玻璃罩两端固定在底座上,中间可推开方便换样品。铅玻璃罩的作用一是防尘,二是屏蔽 γ 射线。由于铜已经屏蔽了大部分 γ 射线,以及考虑到成本原因,铅玻璃的厚度选1 cm即可,通过模拟计算,经过4 cm铜和1 cm铅玻璃屏蔽后, $3.4\times 10^5\ \text{Bq}$ 的 ^{137}Cs 产生的空气吸收剂量率大约为 $0.10\ \mu\text{Sv}/\text{h}$,此剂量率值基本和环境本底剂量值相当^[8-9],因此平台设计可很好地保护实验人员的剂量安全。

1.2 数字化多道分析器研制

传统的核电子学插件需要配合NIM机箱使用,非常陈旧并且笨重,在实验中需要多处连接线缆,旋钮易坏,造成学生实验时线路不稳,接触不好,噪声水平大,实验结果有较大误差^[10-12]。专为本实验平台研制的数字化多道分析器改进了上述缺点,同时还继承了低、高压提供以及信号处理等综合功能,具有低功耗、低噪声、集成化、易操作的优点,核心的信号采集处理电路结构如图3所示。

算。快梯形成形输出信号发送到脉冲触发模块进行脉冲触发,产生触发标志后可流水线地计算慢梯形成形输出信号的脉冲峰值。脉冲峰值再发送到能谱统计模块进行能谱统计,能谱统计功能可实现实时在线的1024、2048、4096、8192道的能谱统计功能。最后,数据打包模块将能谱统计数据、测量时间数据、死时间计算数据一起打包,通过通信模块发送到计算机软件上进行能谱实时显示。在FPGA内部,每个数据处理模块都有特定的标识地址(ID0~ID6),用于计算机软件发送不同的参数设置指令,便于各项参数调节。

谱采集分析软件配合数字化多道分析器,能够实现能谱测量参数的控制以及能谱的显示与分析。其关键功能包括:

- 1) 能谱统计数据采集与显示;
- 2) 探测器高压的设置与显示;
- 3) 数字化多道分析器的数字信号处理参数设置;

- 4) 能谱的可视化调整与特征分析;
- 5) 能谱的保存与二次显示分析。软件界面示

意图如图 5 所示, 界面上采集与显示的为 ^{137}Cs 能谱图。

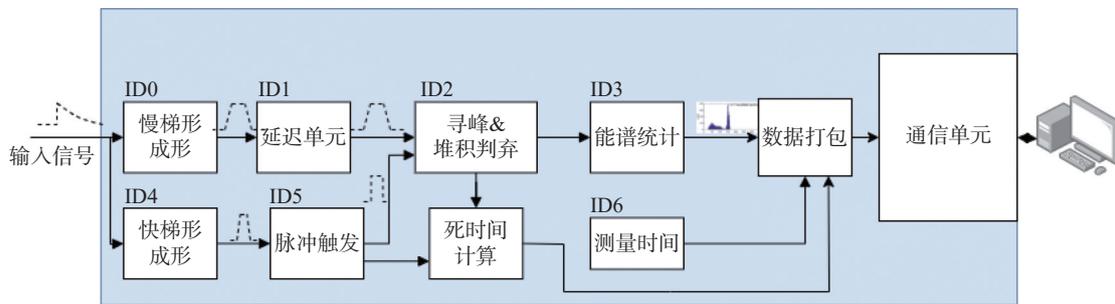


图 4 数字信号处理流程图

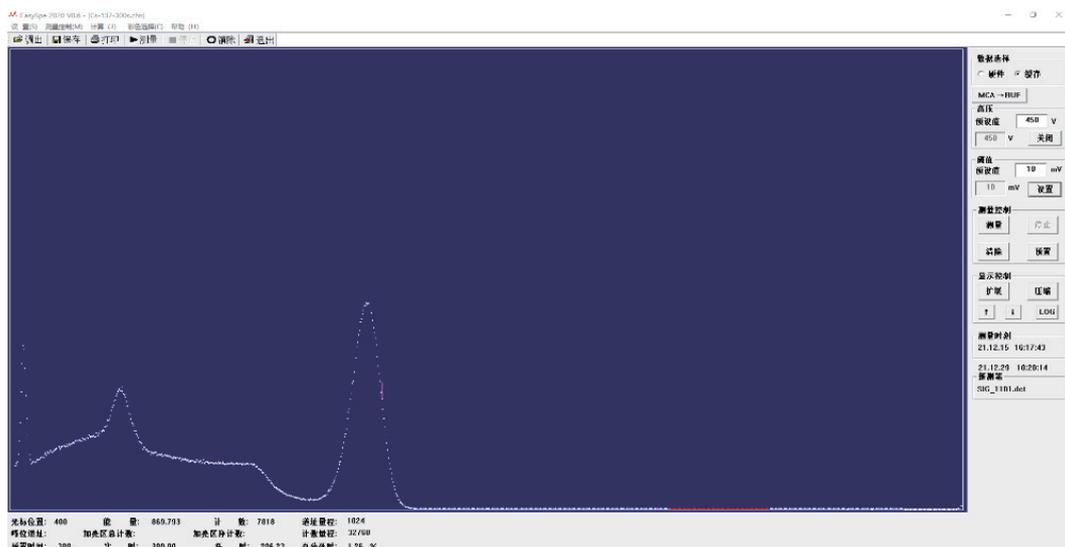


图 5 能谱采集分析软件界面示意图

2 教学成效

2.1 学生受益情况

γ 射线探测综合实验教学平台于 2020 年春季学期在四川大学实验教学中投入使用, 已有 200 余人次的本科生和研究生在该平台上开展实验, 目前平台稳定运行两年多, 未出任何故障。

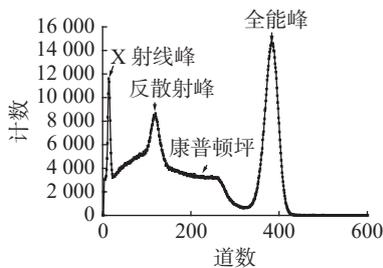
2.2 实验开设情况

学生在该平台上操作基础实验“ γ 射线能谱测

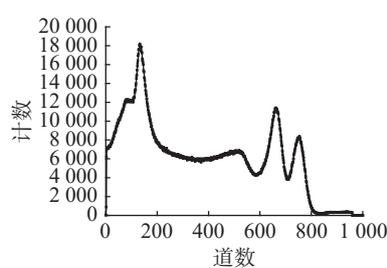
量”如图 6(a)所示, 该实验通过测量 ^{137}Cs 和 ^{60}Co 放射源 γ 能谱, 进行能量刻度, 并识别未知放射性核素, 通过操作该实验, 使学生掌握 γ 能谱测量技术及分析 γ 射线能谱的方法。图 6(b)、图 6(c)分别为实验测量得到的 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 放射源能谱(原始数据保存后二次作图得到)。从谱图中可以清楚地看到 ^{137}Cs X 射线峰、反散射峰、康普顿坪以及 0.662 MeV γ 射线全能峰。



(a) 学生正在操作实验



(b) ^{137}Cs 能谱



(c) ^{60}Co 能谱

图 6 γ 射线能谱测量实验

利用该平台,还可进行 γ 放射源强度平方反比定律验证实验。转动滑轨手柄,改变探测器与放射源的距离,由于放射源向 4π 方向发射 γ 射线,距离不同,探测器对放射源所张立体角不同,被探测器测到的 γ 射线强度不一样,强度与距离的平方遵循反比关系,每一距离下,测量 γ 能谱,同样的条件下不放放射源测量本底谱,得到全能峰净计数,验证计数与距离的平方反比关系,学生测量得到的平方反比实验结果如图7所示。实验所得结果为1.897,与理论值2之间的误差约为5%,误差来源于放射源只能近似为点源,且放射源四周并不空旷有散射物。通过完成 γ 射线能谱测量和平方反比定律验证这两个基础实验,学生对实验平台有所了解,对实验仪器的操作基本熟悉,同时对 γ 射线的性质、 γ 射线能谱形成原因和能谱测量方法已基本掌握,为后续综合实验的开展奠定了基础。随着核技术应用的不断发展,利用 γ 射线与物质相互作用的机制与规律为基础,工业上可以制成核密度计、浓度计、核厚度计和核料位计等^[13-15]。利用本实验平台,可以将 γ 射线在工业上各种应用的原理提炼出来,设计成 γ 射线测厚度、 γ 射线测料位、 γ 射线测密度等综合性学生实验,以期达到学以致用,融会贯通的目的。 γ 射线测厚度实验中,先测出 γ 射线在已知样品中的衰减曲线,从而得到在该样品中的衰减系数,然后测出穿过未知厚度样品前后的计数,通过已求得的衰减系数即可得到未知样品的厚度。学生利用该平台测得的¹³⁷Cs放射源在铜样品中的衰减曲线如图8所示,根据拟合公式可以得到¹³⁷Cs 0.662MeV γ 射线在铜中的线性衰减系数为0.661/cm,表2为利用 γ 射线测得的未知铜样品厚度结果,与用千分尺测量得到的厚度之间的相对误差为2.67%。

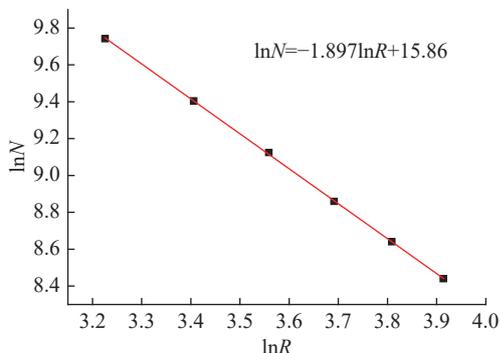


图7 γ 放射源强度平方反比实验验证结果

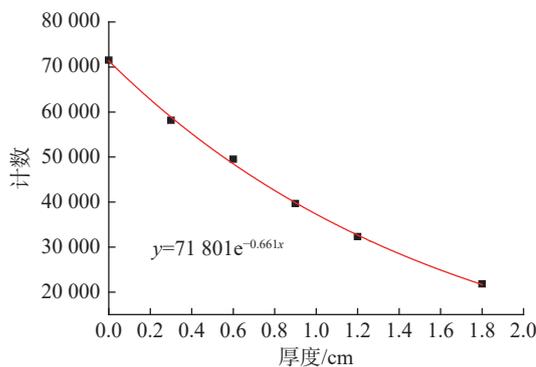


图8 ¹³⁷Cs 0.662MeV γ 射线在铜中的衰减曲线

表2 利用 γ 射线测得的未知铜样品厚度结果

	穿过铜片前	穿过铜片后
计数	71 512	27 299
铜样品测量厚度/cm		1.46
铜样品真实厚度/cm		1.50
相对误差/%		2.67

利用本平台进行 γ 射线测厚、测密度、测料位等实验研究时,可不对放射源进行准直,由于可直接测量得到能谱,通过记录全能峰计数即可排除散射射线的干扰,达到和准直一致的效果,学生也可记录全谱计数进行研究,通过比较全能峰计数和全谱计数的结果,更深刻地理解对放射源准直的目的和意义。

利用本实验平台,学生进行了大创项目“双源法测量土壤含水量”,通过制作一系列已知含水量的土壤样品,分别测量¹³⁷Cs放射源和²⁴¹Am放射源穿过土壤样品的透射率 $(I/I_0)_{Cs}$ 和 $(I/I_0)_{Am}$,拟合得到含水量与透射率的关系,如图9所示为学生得到的拟合结果示意图,含水量 θ 与两种源透射率的关系为:

$$\theta = 0.741 2\ln(I/I_0)_{Am} - 0.004 77(I/I_0)_{Cs} + 1.507$$

测量¹³⁷Cs、²⁴¹Am γ 射线通过未知含水量土壤样品的能谱,得到相应的透射率,如表3所示。

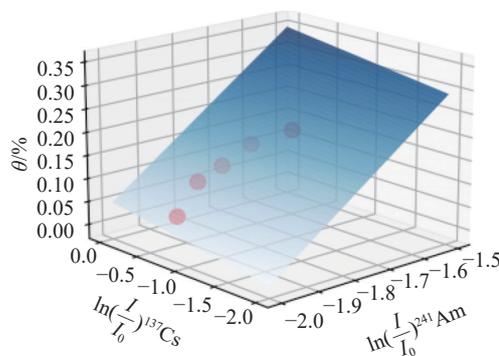


图9 含水量拟合曲面

表 3 γ 射线通过未知样品的透射率

样品	所用源	净计数率 I	$\ln(I/I_0)$
未知含水量土壤样品	^{137}Cs	471.40	-0.681 5
	^{241}Am	248.51	-1.779 6

将透射率 $\ln(I/I_0)_{\text{Cs}}$ 、 $\ln(I/I_0)_{\text{Am}}$ 代入拟合公式,求得未知样品含水量为 19.09%,传统称重法得出的含水量为 17.41%,两者之间的误差为 9.65%。

3 结束语

论文针对传统 γ 射线探测与测量实验装置的不足,设计开发了一款 γ 射线探测综合实验教学平台,完成了平台的机械设计加工以及数字化多道分析器研制。基于该平台,可开展多个关于 γ 射线的认知类、基础类、综合型、探究型实验项目。 γ 射线能谱测量、 γ 放射源强度平方反比定律验证、 γ 射线测量样品厚度以及双源法测量土壤含水量等学生实验结果表明,利用该平台所得到的实验结果与理论预期相符合,满足实验教学要求。目前, γ 射线探测综合实验教学平台已用于 200 余人次的实验,稳定运行两年多,未出任何故障。平台操作性强、可靠性高,方便实验教学,能有效减少实验老师维护设备的时间,同时使学生更好地理解与掌握 γ 射线的性质、 γ 射线与物质相互作用的机制以及 γ 射线的各种应用。

参考文献

- [1] 高嵩,高瑞琢. γ 射线浓度计标定方法的研究[J]. 中国矿业, 2021, 30(S1): 148-150.
- [2] TOHAMY M, ABBAS K, NONNEMAN S, et al. Improved experimental evaluation and model validation of a ^{252}Cf irradiator for delayed gamma-ray spectrometry applications[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2021, 173: 109694.
- [3] MARISELVAM K. Gamma-ray interactions with ytterbium ions doped BLFB glasses for shielding applications[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2021, 240: 166808.
- [4] 刘珉强,李晨,杜川华,等. γ 射线测距中散射光子影响因素的蒙特卡罗模拟[J]. 原子能科学技术, 2021, 55(8): 1472-1477.
- [5] 杨智慧,刘海林,王晓峰,等. 康普顿散射虚拟仿真实验设计及教学实践[J]. 实验室研究与探索, 2021, 40(3): 102-106.
- [6] 张增明,孙腊珍,张权,等. 创新研究型物理实验教学平台的建设[J]. 实验室研究与探索, 2008, 27(12): 7-9.
- [7] BRIESMEISTER J F. MCNP4C—A general monte carlo N-particle transport code[CP]. New Mexico: Los Alamos National Laboratory, 2000.
- [8] 夏益华. 高能电离辐射防护教程[M]. 哈尔滨: 哈尔滨大学出版社, 2010.
- [9] 董大勇. 实验教学中放射性辐射的防护[J]. 实验室研究与探索, 1995, 14(3): 88-91.
- [10] 程敏熙,刘海涛,廖金峰. 核物理实验数据微机采集与处理系统[J]. 实验室研究与探索, 2001, 20(4): 49-52.
- [11] 韩冬,王金爱,王忠,等. 辐射探测实验室仪器的改进研究[J]. 实验技术与管理, 2009, 26(10): 64-65.
- [12] 张怀强,吴和喜,汤彬,等. 基于FPGA的数字核信号处理系统的研究[J]. 核电子学与探测技术, 2014, 34(2): 254-261.
- [13] 吴志芳,刘锡明,王立强,等. 射线技术在工业领域的应用[J]. 同位素, 2020, 33(1): 1-13.
- [14] 李静舒,邱晓婷,余圳跃,等. γ 射线放射法测量料位高度[J]. 物理实验, 2020, 40(3): 39-42.
- [15] 常征. 伽马射线测厚仪与激光测厚仪在中厚板轧制生产中的应用对比[J]. 现代冶金, 2021, 49(2): 68-70.

编辑 张俊