

文章编号:1005-4642(2021)09-0035-05

虚实结合的核物理综合实验系统的设计与教学实践

刘海林¹, 吴奕初¹, 杨智慧¹, 王晓峰¹, 段 琛², 成 斌²

(1. 武汉大学 物理实验教学中心, 湖北 武汉 430072; 2. 安徽核芯电子科技有限公司, 安徽 合肥 230026)

摘 要:为解决核物理教学实验安全难题,设计了虚实结合的核物理教学实验仪器. 采用先进的虚拟放射源、可重构理念和技术,通过虚实结合开发了放射源模拟器、教学通用型的多功能数字多道和实验控制系统,可对放射源及探测分析系统仪器及参量进行灵活的重构配置,拓宽传统核物理实验教学的内容. 利用该系统可开设放射性测量的统计规律、闪烁体探测器与 γ 射线吸收、康普顿散射等 10 余个实验项目,学生可以重构实验系统,研究射线(粒子)与物质相互作用的规律.

关键词:核物理实验;虚拟放射源;数字化多道;虚实结合

中图分类号:G642.423

文献标识码:B

DOI:10.19655/j.cnki.1005-4642.2021.09.006

近代物理实验是物理专业学生的重要基础课,所涉及的物理知识面广、综合性和技术性强^[1]. 核物理实验由于需要长期保存放射源,给高校实验室管理带来了极大不便;此外,学生缺乏操作放射源及射线装置的经验,对放射源的使用与管理也带来一定的风险和困难^[2-3]. 根据最近北京大学、复旦大学和武汉大学等 41 个物理国家级实验教学示范中心统计结果,目前开设核物理项目总数为 13 个,开设率最高的 X 射线标识谱与吸收实验也只有 1/3 左右,闪烁体计数器及 γ 能谱测量、康普顿散射等 5 个实验开设率约 1/4,其余实验的开设率不足 1/10. 多数开设核物理实验的高校,学时较少,实验内容单一,学生无法得到充分的训练. 很多普通本科院校因没有放射源和射线装置使用资质而停止开设近代核物理实验. 另外,对于学生而言,提到核物理,学生脑海中想到的常是一些核事故、核污染等可怕画面,普遍对核物理实验存在顾忌心理. 因此开发不含放射源的核物理实验是十分必要的.

近年来,国际上非常重视核物理虚拟仿真实验项目建设,美国、欧洲一些大学研发仿真教学软

件^[4],学生使用复杂高危核仪器设备之前先做虚拟仿真实验^[5],意大利 CAEN 公司研制出了放射源模拟器^[6]. 国内中国科学技术大学等建设了虚拟仿真实验中心,应用虚拟放射源代替真实放射源,虚实结合开展核物理实验教学,取得了较好的教学效果^[7]. 武汉大学物理实验教学中心基于物理学院拥有湖北省核固体物理重点实验室的科研优势,通过引进先进的教学理念,对虚实结合的近代核物理实验教学进行探索与实践,取得了一定成效^[8].

1 核物理虚实结合实验教学平台的构建

通过对近代物理实验教学资源不断整合、优化和更新,实验中心将信息技术与实验教学深度融合,构建了核物理虚实结合实验教学平台. 该平台包括 3 部分:实体实验、虚实结合实验和虚拟仿真实验. 采用启发式、开放式的教学方式,突破了传统实体实验为主的教学模式,将虚拟仿真、虚实结合、校园实验等项目引入教学,基于虚实结合的实验平台如图 1 所示. 学生可以根据自己的需求及水平对设备进行灵活搭配,可以进行纯虚拟

“第 11 届全国高等学校物理实验教学研讨会”论文

收稿日期:2021-07-06

基金项目:2020 年高等学校教学研究项目(No. DJZW202027zn);2020 年湖北高校省级教学研究项目(No. 2020035, 2020046);2020 年武汉大学教学研究重点项目(No. ZD-5)

作者简介:刘海林(1970-)男,湖北枣阳人,武汉大学物理科学与技术学院讲师,博士,研究方向为凝聚态物理. E-mail:hailin_liu@whu.edu.cn

通讯作者:吴奕初(1964-)男,福建上杭人,武汉大学物理科学与技术学院教授,博士,研究方向为核技术及其应用. E-mail:ycwu@whu.edu.cn



的软件仿真实验,也可以使用真实核探测器进行实物验证或使用虚拟放射源进行虚实结合实验.

学有余力的学生还可进行自主设计虚实重构的创新实验.

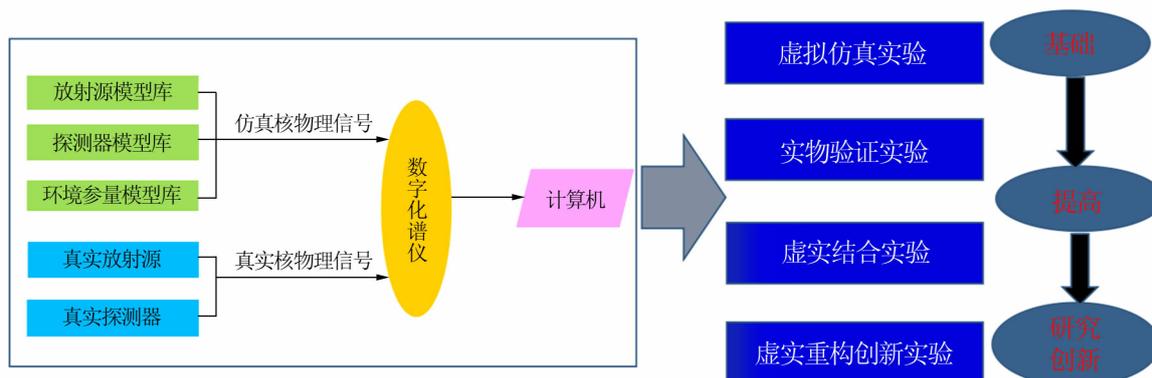


图 1 核物理虚实结合实验教学平台的结构图

1.1 对传统核物理实验进行升级改造

对传统实验中康普顿散射、相对论效应验证和卢瑟福散射实体实验进行了升级改造,采用真实放射源,以多功能数字多道代替了传统核物理的插件设备,提高实验效率的同时降低了实验成本.新购买 X 射线衍射仪,以科研与教学结合的方式开发了教学型正电子寿命测量系统及常规的 NIM 箱插件,为学生自主设计及开发新实验提供了条件.积极探索“无放射源”核物理实验的各种可行性方案^[9-10],增加了校园环境天然放射性的检测与评价及⁴⁰KCl γ 能谱的测量等实验,供本科生进行科研训练和做毕业设计.

1.2 虚实结合实验

用放射源模拟器模拟产生了真实的仿真核信号,并附带信号采集处理系统,无需放射源,为普通高校开设核物理实验提供新的解决方案.通过虚实结合——研制虚拟放射源及数字化多道,开展了“无放射源”的近代核物理实验,并将传统的实体实验与虚拟仿真实验有机结合,设备先进、功能齐全.引入国内外先进的教学理念,可以开展不受放射源和射线装置限制的近代物理教学实验,实现虚拟与现实的有机结合,该实验教学方式下既可以开设核物理实验课程,又能够保留学生一定的动手能力,还可与真实核信号进行对比,激发学生的求知欲.根据不同专业学生的需要,可以选取不同的实验方法对仪器虚实重构,完成实验内容,教学内容丰富,时间灵活可控.

1.3 虚拟仿真实验

科教融合、校企联合研究射线(粒子)与物质

相互作用,建设放射源库、探测器库、能谱测量、数量处理等模块,开出与虚实结合核物理实验一一对应的虚拟仿真实验.该类实验是实体实验的补充及拓展,既可以代替常规实验正常开设,也可以用作学生预习和复习.通过虚拟再现实验的所有实验环节,学生可以快速、全面地掌握实验内容,为虚实结合实验与真实核物理实验的学习提供重要的练习与辅助工具.

2 虚实结合实验系统的设计

2.1 系统的构成

虚实结合核物理综合实验系统是基于以上平台设计和开发的,放射源模拟器与多功能数字多道如图 2 所示.系统主要包括放射源模拟器、教学通用型的多功能数字多道和实验控制系统软件.放射源模拟器模拟输出的脉冲波形可任意调节,可合成任意放射源与探测器组合的信号;多功能数字多道模块采用数字化技术,利用高速模数转换器(AD)与现场可编程逻辑门阵列(FPGA),采用不同的工作固件,可以替代多种传统核信号处理设备.本系统配套软件使用 C++ 语言配合 Qt 框架研发,除了实现系统的参量输入,数据的传输、分析及展示外,还提供了虚拟实验的模型展示界面,在本界面中模拟了当前实验所关心的粒子与物质的相互作用过程,使得不可见的粒子与核变得直观生动,使学生建立起一套科学的物理图像.

系统可实现示波器、单道分析器+计数器、多道分析器、符合能谱测量、反符合能谱测量、时间

数字转换器等功能,能够拓宽传统核物理实验教学的内容,在同一套设备上能完成多项实验项目.各高校可根据自身学科特点选择若干实验,按真实实验要求开设,也可按射线与物质相互作用规律开设综合实验.

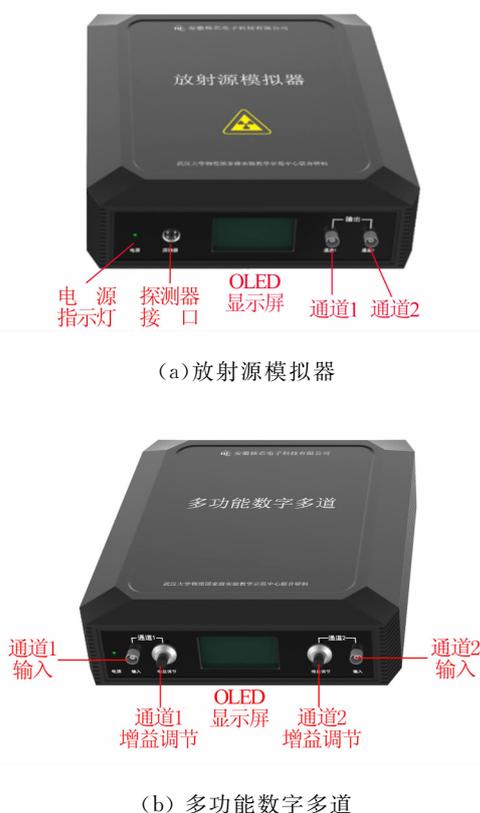


图 2 放射源模拟器与多功能数字多道

2.2 可开设的实验项目

综合实验系统可开设如下实验项目:

- 1)放射性探测的统计规律实验;
- 2)闪烁体探测器与 γ 射线吸收实验;
- 3)半导体探测器与 α 粒子的能损实验;
- 4) β 射线的吸收实验;
- 5)X 射线吸收和特征谱实验;
- 6)中子活化元素半衰期测量实验;
- 7)康普顿散射实验;
- 8)卢瑟福散射实验;
- 9)相对论效应验证;
- 10)校园环境天然放射性测量;
- 11)正电子寿命谱测量;
- 12)穆斯堡尔效应.

此外,学生可以根据自己的需求及水平对设备进行灵活搭配,自主设计和开发新的核物理实

验,或提出具体要求与公司合作研发.

3 教学实践

3.1 实验案例

以 γ 射线探测技术及应用综合实验为例,该实验由浅入深分 4 部分内容:

- 1)学习闪烁体探测器的使用及能谱分析方法,利用该探测器进行 γ 射线的能谱测量;
- 2)了解物质对 γ 射线的吸收规律,测量几种典型物质的吸收系数;
- 3)结合符合测量技术,验证康普顿效应,证实光子假说的正确性;
- 4)使用真实探测器测量校园不同区域的放射性,学习低水平天然放射性的测量与分析方法.

通过学习 γ 射线探测技术及应用综合实验,学生除了学习核物理基本实验技能外,还可以了解天然放射性无处不在、无时不有.实验过程实施课程思政,立德树人,帮助学生树立正确的核科学观.

图 3 为虚实结合核物理综合实验系统——康普顿散射实验各部分连接示意图(其他实验连接类似,如开设卢瑟福散射实验只需将康普顿散射实验平台更换为卢瑟福散射实验平台).

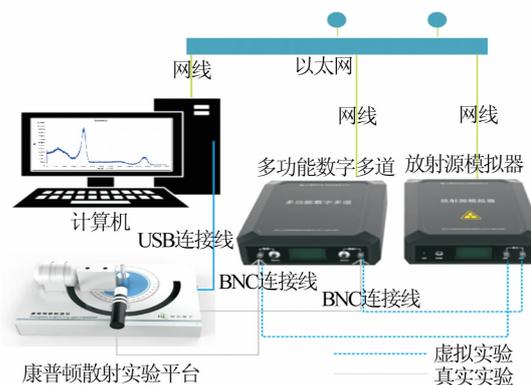


图 3 虚实结合核物理综合实验系统的连线示意图

经典诺贝尔物理实验康普顿散射的实验目的是:验证康普顿散射的光子能量及微分截面与散射角的关系.实验采用康普顿散射的次级 γ 光子与电子之间的符合测量技术,提高了实验的信噪比与测量精度.信号模拟器输出的通道 1 信号(图 2)模拟了探测康普顿散射 γ 的 NaI(Tl)闪烁体探测器的信号输出,它符合康普顿散射能谱分布;而通道 2 模拟了作为散射体的塑料闪烁体探

测器的信号经过单道之后的输出,所以它是 1 组方波信号. 在示波器中,可以观测到通道 2 有大量的随机信号,而通道 1 信号只有少量的探测示例,两通道在符合测量的情况下,即可得到康普顿散射能谱. 通过测量不同角度下散射 γ 光子的能谱,根据能量刻度信息计算并验证康普顿散射能量公式和微分截面公式.

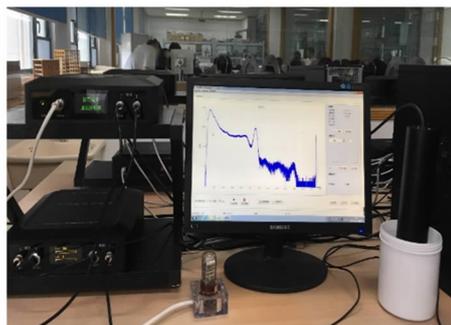
本综合实验解决了放射源辐射安全难题,帮助学生深刻理解闪烁体探测器的原理,虚拟再现了经典诺贝尔奖实验康普顿散射效应,有效调动了学生学习近代核物理专业理论和实践知识的积极性. 学生在实验方法的思考、仪器的选择和搭配、实验条件的确定以及实验数据的处理等方面得到了基本训练. 校园环境放射性现场测量,让学生了解放射性存在于日常生活中,拓宽了学生的知识面,提高了学生的学习兴趣.

3.2 应用情况

近几年来,物理实验教学中心在近代物理实验、实验物理 IV、诺贝尔奖物理实验和核技术综合实验等教学中采用理论与实验、虚拟与现实、线上与线下相结合的混合式教学模式,要求学生根据兴趣爱好至少选做 1 个虚实结合实验题目. 该教学模式取得了良好的教学效果,图 4 和图 5 分别为学生做虚实结合实验和环境天然放射性测量的场景.

2019 年申报了“康普顿散射虚拟仿真实验”项目,并且通过“实验空间”——国家虚拟仿真实验教学项目共享平台向全国高校开放. 该项目作为近代物理实验线上教学资源被中国科学技术大学、华中师范大学等 23 所高校的学生选做,总计 2 134 人次进行了实验,实现了优质教育资源共享. 2020 年春季新冠肺炎疫情期间,线上教学情况被《物理与工程》和国家虚拟仿真实验教学平台等微信平台报道,受到全国高校的广泛关注. 2020 年“康普顿散射虚拟仿真实验”课程被认定为“首批国家级一流本科课程”,被湖北电视台教育频道专题报道.

本系统已在中国科学技术大学、中山大学、同济大学和国防科技大学等近 10 所高校推广使用,用户反馈良好. 本系统于 2020 年获校级自制仪器评比二等奖和第 6 届全国高等学校教师自制实验教学仪器设备创新大赛三等奖,相关成果获得 2021 年武汉大学教学成果二等奖.



(a)



(b)

图 4 虚实结合核物理综合实验系统的教学应用



(a)



(b)

图 5 利用环境天然放射性测量系统开展校园实验

4 结束语

采用虚拟仿真、虚拟放射源等技术结合多功能数字多道,既可以使用虚拟的核脉冲信号,又可以使用真实探测器开展无源的核物理教学实验,为普通高校开设核物理实验提供了新的解决方案。下一步,将以国家级实验教学示范中心和湖北省核固体物理重点实验室为依托,将最新核科学及核技术成果快速转化为实验教学内容;通过校企合作研制小型化可手机操作的校园环境天然放射性测量仪,面向理工科非物理专业开设1~2个典型实验,扩大受益面。加强与科普教育基地和科技馆等公众平台的合作交流,中心演示与开放实验室计划筹建“生活中的放射性”展示厅,充分发挥示范中心在科普宣传中的重要作用。

参考文献:

- [1] 乐永康,龚新高,苏卫锋,等. 虚实结合的物理实验教学[J]. 物理实验,2017,37(1):39-43.
- [2] 杨东侠,刘安平,韩忠,等. 核物理虚拟仿真实验教学平台搭建[J]. 物理与工程,2018,28(5):106-109,113.
- [3] 吴攀,单建强,张博. 虚拟仿真实验在核工程与核技术专业中的应用[J]. 实验室研究与探索,2018,37(4):102-106.
- [4] Sidanin P, Plavsic J, Arsenic I, et al. Virtual reality (VR) simulation of a nuclear physics laboratory exercise [J]. European Journal Physics, 2020, 41(6):065802.
- [5] Ttaczata W, Grajner G, Zaremba M. Virtual laboratory with simulated nuclear physics experiments [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008,57(8):1766-1770.
- [6] Abba A, Caponio F, Cusimano A, et al. Dual channel fast digital detector emulator with analog input [J]. Review Scientific Instruments, 2014, 85013506.
- [7] 张增明,王中平,张宪锋,等. 国家级物理虚拟仿真实验教学中心的建设实践[J]. 实验技术与管理, 2015,32(12):146-149.
- [8] 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):102-106,128.
- [9] Albéri M, Baldoncini M, Bottardi C, et al. Training future engineers to be ghostbusters: Hunting for the spectral wvvironmental radioactivity [J]. Education Sciences, 2019,9:15.
- [10] 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):47-50,54.

Design and teaching practice of nuclear comprehensive experiment system integrated with virtual-reality technique

LIU Hai-lin¹, WU Yi-chu¹, YANG Zhi-hui¹, WANG Xiao-feng¹, DUAN Chen², CHENG Bin²

(1. Physics Experiment Teaching Center, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Anhui Nuclear Core Electronics Technology Co. LTD., Hefei 230026, China)

Abstract: This comprehensive experiment system was a kind of instrument integrated with virtual-reality technique, which was designed to solve the safety problem of nuclear physics experimental teaching. Based on advanced virtual radiation source, reconfigurable concept and techniques, a radiation source simulator and a versatile digital multichannel and experimental control system through the combination of virtual-reality technique were designed. The equipment and parameters of radiation source and detection and analysis system could be flexibly reconfigured, and the content of traditional nuclear physics experimental teaching was broadened. More than 10 experimental projects, such as statistical law of radioactivity measurement, scintillator detector and γ ray absorption, Compton scattering and so on, could be performed using this system. Furthermore, the experiment system could be reconstructed by students to study the interaction between radiation (particle) and matter.

Key words: nuclear physics experiment; virtual radiation source; digital multichannel; virtual-reality combination

[责任编辑:任德香]