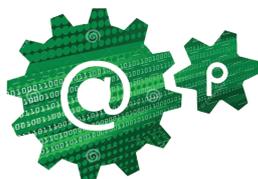


文章编号:1005-4642(2023)06-0029-07



互联网+物理

## 测量放射性物质辐射强度的 虚拟仿真居里实验

于婷婷<sup>1a</sup>, 方 恺<sup>1a</sup>, 张冶文<sup>1b</sup>, André Pierre Legrand<sup>2</sup>,  
Bernard Pigelet<sup>2</sup>, 金 佳<sup>1a</sup>, 倪 晨<sup>1a</sup>, 羊亚平<sup>1a</sup>

(1. 同济大学 a. 物理科学与工程学院, 上海 200092;

b. 电子与信息工程学院, 上海 201804;

2. ESPCI Paris, PSL Research University, Paris 75005)

**摘 要:** 将获得诺贝尔奖的测量放射性物质辐射强度实验的理论知识、实验方法与虚拟仿真技术进行融合, 设计了融入科学研究方法的虚拟仿真综合实验教学项目。通过构建全过程、多环节和沉浸式的在线实验教学环境, 学生可以应用比较测量法等, 掌握获得微小电荷量与饱和电流的实验方法, 加深对放射性物质辐射强度测量原理的理解, 体验科学发现的历程。

**关键词:** 放射性; 居里实验; 虚拟仿真实验

**中图分类号:** O4-39; O571.3

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.19655/j.cnki.1005-4642.2023.06.004

1903 年的诺贝尔物理学奖的一半授予法国物理学家亨利·贝克勒尔 (Antoine Henri Becquerel), 以表彰其发现了自发放射性; 另一半授予法国物理学家皮埃尔·居里 (Pierre Curie) 和玛丽·斯克洛多夫斯卡·居里 (Marie Skłodowska Curie), 以表彰他们对放射性辐射现象研究所做的卓越贡献。

当今, 核物理科学研究日益深广, 核技术已广泛应用在工业、农业、医疗、环保和国家安全等领域, 取得了良好的社会效益, 成为当前社会发展的重要领域<sup>[1]</sup>。理工科专业的学生掌握相关原子核物理知识及其常用参量的测量技术, 可将理论知识与工程技术应用相结合。核物理实验教学内容融入相关大学物理实验和近代物理实验等课程, 为培养理工结合的综合性人才夯实基础。学生通过学习测量放射性物质辐射强度的实验原理和实验方法, 深思获得诺贝尔奖的经典实验蕴含的科学思想, 对于锻炼其实验实践能力和提升创新能力具有重要意义。由于辐射安全防护的管理要求, 一般的高校实验室难以面对放射性测量可能

存在的辐射风险<sup>[2-3]</sup>, 因此难以具备开设研究物质放射性实验的线下教学条件。

为了完善学生的知识培养体系, 提高学生的创新能力与综合素质, 丰富教学资源, 同济大学与巴黎高等物理与化学学院 (ESPCI) 合作研究了《放射性物质的研究》等文献, 以及历史实验设备等资料, 融合理论知识、实验方法与虚拟仿真技术, 设计了测量放射性物质辐射强度的虚拟仿真居里实验。

居里夫妇的核心实验方法是运用石英晶体压电天平代替了贝克勒尔验电器, 较为准确地测量出了放射性物质射线在空气中产生的导电性<sup>[4]</sup>。如今, 居里等科学家们所使用过的实验设备陈列在法国巴黎的镭研究所展馆和巴黎高等物理与化学学院的博物馆中, 仅供参观。

20 世纪初, 多位赴法留学的物理专业学生在居里夫人领导的镭研究所学习和从事研究工作, 并在核科学领域取得了卓越成就。著名核物理学家钱三强院士就曾在居里实验室从事原子核物理实验研究工作<sup>[5-6]</sup>, 开展放射性测量的实验研究。

**收稿日期:** 2022-12-13; **修改日期:** 2023-02-26

**基金项目:** 同济大学实验教学改革基金项目 (No. 1370104323, No. 1370104326)

**作者简介:** 于婷婷 (1990—), 女, 辽宁阜新人, 同济大学物理科学与工程学院工程师, 硕士, 从事物理实验教学。E-mail: yutingting@tongji.edu.cn

**通信作者:** 方 恺 (1973—), 女, 江苏南京人, 同济大学物理科学与工程学院教授级高级工程师, 博士, 主要研究方向为教育技术学和凝聚态物理学。E-mail: fangkaitj@tongji.edu.cn

钱三强回国后,致力于新中国的原子核物理学研究,成为中国“两弹一星”元勋. 居里夫人对待科学认真严谨的态度、积极主动的探索精神,以及中国科学家们实事求是的科学作风、为祖国献身科学事业的爱国主义精神时刻激励着新一代的物理学子们.

## 1 虚拟仿真实验内容

### 1.1 科学问题的提出

在 X 射线被发现以后,贝克勒尔进一步研究和探索,发现铀盐能使照相底板感光,并能使靠近它的气体电离,致使验电器带电<sup>[7-8]</sup>. 因此,贝克勒尔推测根据电离电荷量可以间接表示辐射的相对强度,进而测量物质的放射性. 贝克勒尔的研究表明辐射在气体中每秒所产生的离子数目与气体所吸收的辐射能量成正比,但是以当时的实验条件难以精确测量离子的微小电荷量. 居里夫妇攻克了这个难题,基于压电天平和静电计等设备,设计了对物质辐射强度的测量方法<sup>[9-11]</sup>.

在居里夫人的放射性测量实验中,要得到给定辐射所对应的极限电流,必须满足 2 个条件:a. 要有气体分子能够完全吸收辐射;b. 要有电场,以保证辐射所产生的离子能够几乎全部参与导电. 只有电场强度较大时,在辐射所产生的离子总数中复合的离子数目所占的比例才可以忽略不计,并能够保证绝大多数离子都到达了电极,形成饱和电流. 满足以上条件,饱和电流与离子数目成正比.

### 1.2 实验装置

测量放射性物质辐射强度的实验装置和器件主要包括电离室、石英压电天平、静电计、光源、标尺和计时器等.

图 1 为放射性物质辐射强度的测量的装置示意图. 电离室内部为平板电容器,放射性物质实验样品放置在电容器的下极板上,使 2 块电极板之间的空气发生电离. 为测量空气的导电性,将电容器的下极板连接到由多个小蓄电池组成的电池组的电极上,使其有高电势;电池组的另一个电极接地. 将电容器的上极板通过导线连接到电池的接地电极,闭合开关可使其接地,2 块极板之间就会有电流流过. 图 2 为陈列在巴黎高等物理与化学学院博物馆(即巴黎科学空间博物馆)中的居里放射性测量实验装置.

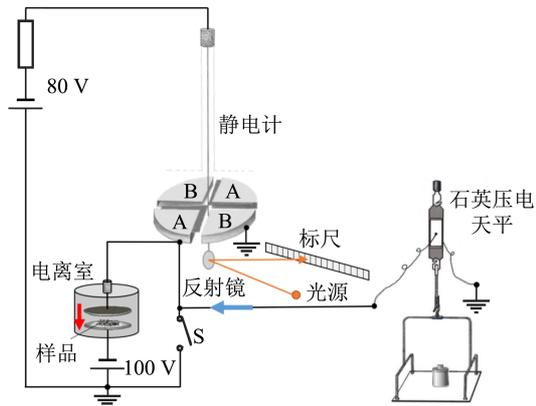


图 1 放射性物质辐射强度的测量装置示意图



1. 电离室 2. 静电计 3. 石英压电天平 4. 导线(同轴电缆) 5. 标尺 6. 秒表 7. 砝码盒 8. 压电石英晶体样品 9. 原实验中的电离室

图 2 巴黎高等物理与化学学院博物馆陈列的实验装置

### 1.3 实验测量原理

在居里夫人的实验中<sup>[12-13]</sup>,若选取的电容器极板直径约 8 cm,上、下极板间距为 3 cm,用铀化合物进行测量,测得的饱和电流的数量级为  $10^{-11}$  A. 如何精确测量微弱电流和微小电荷量是实验难点所在,居里夫人在当年做实验时利用石英晶体的压电效应产生的电荷来补偿极板上的电荷,即补偿法. 实验中利用了高灵敏度的静电计测量电位差. 静电计的原理是利用电荷的同性相斥和异性相吸,产生偏转力矩,使金属叶片带动张丝发生扭转. 如图 1 所示,电离室上极板与静电计相连,其电势由静电计记录. 如果打开开关 S,电离室上极板被充电(图 1 中蓝色箭头方向),电荷会引起静电计的偏转,偏转角度  $\Delta\varphi$  正比于压电片所产生的电荷量.

辐射电离使极板上的电荷释放,形成放电电流(图 1 中红色箭头方向). 在放电过程中,偏转角速度为  $\omega = \Delta\varphi/t$ ,其中  $t$  为放电时间. 偏转角速度与电流大小成正比,因而可以通过测量时间来间接测量电流的大小. 压电晶体的压电系数是确定值,而饱和状态下的放电电流仅由样品的放射性决定,因而可以将放射性强度的测量转换成放电时间的测量. 由于整个系统的电容值一定,则电离产生的电荷量正比于电压,即  $Q = CU = it =$

$(JI_{\text{rad}})t$ . 其中,  $i$  为饱和电流,  $I_{\text{rad}}$  为放射性强度,  $J$  为比例系数. 若设压电晶体的压电系数为  $K$ , 通过悬挂砝码施加应力而产生的电荷量为  $Q' = Kmg$ . 由于实验中的充放电过程所产生的电荷抵消, 即有  $Q = Q'$ , 则放射性强度为

$$I_{\text{rad}} = \frac{Kgm}{Jt},$$

可知,当砝码质量和系统参量确定时,放射性强度与放电时间成反比. 图 3 为实验原理示意图.

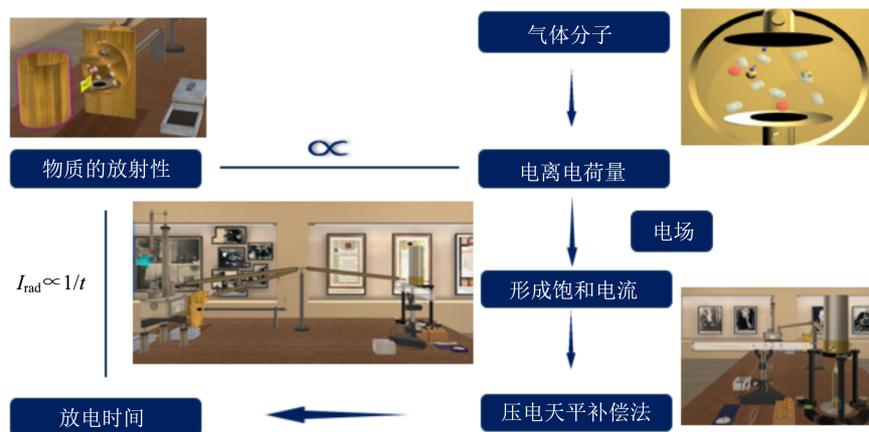


图 3 实验原理示意图

## 2 虚拟仿真实验的设计

### 2.1 虚拟仿真系统模块化

测量放射性物质辐射强度的虚拟仿真居里实验系统包含 7 个实验模块:参观实验室、搭建实验系统、仪器原理、预实验、放射性测量、钋提取实验和拓展实验. 学生可循序渐进地进入到虚拟实验中,了解居里夫人的科学研究历程,激发学生的学习兴趣;鼓励自主学习仪器的原理,搭建实验系统,通过预实验初步尝试测量的过程. 正式学习放射性测量实验,即测量含镭盐的样品的辐射强度. 完成实验基本内容之后,学生可拓展学习测量其他样品(如具有放射性的旧表盘)的辐射强度,以及钋物质样品的提取实验.

### 2.2 教学设计特色

测量放射性物质辐射强度的虚拟仿真居里实验作为近代物理实验和大学物理实验等课程中的学习内容,不仅能够通过模块化的实验设计引导学生学习掌握测量放射性物质辐射强度的实验原理与方法,而且能够通过在教学设计方面引入分层次教学和个性化学习的模式,培养学生科学观

察和创新思维的能力,提高学生将信息技术与物理知识学习相结合的能力.

实验模块中的参观实验室部分可以帮助学生简单了解核物理实验的平台;搭建实验系统后的预实验模块能够为初次涉猎核物理相关知识的学生提供常用参量测量技术的体验;而正式的放射性测量实验和高阶版的拓展实验更能充分满足理工科学生的个性化学习需求. 实验教学设计不再局限于固定不变的常规操作,灵活自由的实验设计能够更好地为学生的学习提供服务与指导.

实验项目中潜移默化地融入思政教学内容,包括:介绍相关物理学史,实验室展板中展示的诺贝尔奖证书和科学家们认真做实验的照片,展示居里夫妇进行实验的简陋条件,并通过放射性实验的注意事项弹窗,以及实验指导书中对于实验背景资料等做进一步介绍. 通过这些教学内容让学生了解科学家们艰苦卓绝的科学作风,以及放射性科学应用领域的发展历程,掌握放射性物理实验的实验安全操作规程,培养学生实事求是的科学素养、认真严谨的科学态度和勇于探索的科学精神. 仿真实验项目的教学设计如图 4 所示.

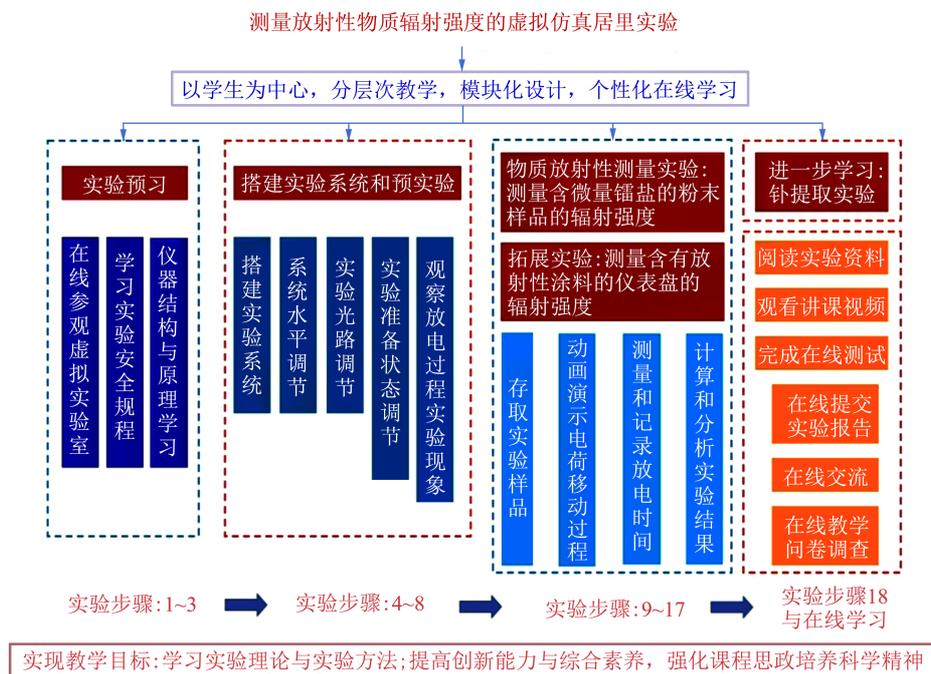


图 4 虚拟仿真实验教学设计框图

### 3 实验模块

#### 3.1 实验预习

在线参观虚拟实验室,熟悉虚拟实验室教学环境,初步了解实验系统结构;学习放射性测量实验安全要求和规范,以及样品制备过程中的安全操作要求等实验注意事项;在仪器原理模块中,通过鼠标点击选中仪器,查看其内部结构图,并分步组装仪器,更深入地学习静电计和石英压电天平的仪器结构与工作原理。

#### 3.2 搭建实验系统和预实验

学生从仪器库中自主选取实验所需的装置或器件,按照实验原理给出的电路图完成放射性物质辐射强度测量实验系统的搭建,如图 5 所示。学生点击鼠标左键拖动仪器或导线,当处于正确位置时系统显示为蓝色[图 5(a)],反之则显示为红色[图 5(b)]。在完成静电计与石英压电天平的水平调节后打开实验光源:半导体激光器。红色的激光束由光源发出后照射到静电计中转子上方连接在张丝末端的镜子上,再由镜面将光点反射到标尺上。预实验阶段通过观察标尺上光点的偏移现象,了解补偿法测量微小电荷量的实验方法。

#### 3.3 物质放射性测量实验

测量含微量镭盐的粉末样品的辐射强度。调节开关到 ON 状态,让光点回到标尺零点附近。打开电离室,用镊子从铅盒中夹取有微量放射性的实验样品 1(含微量镭盐的放射性粉末样品),放置在电离室中,如图 6 所示。此时,通过观看动画演示视频,了解电荷移动,加深对实验原理的理解。

在石英压电天平载物盘上,加 50 g 砝码(或 100 g, 200 g 等),使石英压电天平处于准备工作状态。调节开关至 OFF 状态,取下砝码,此时石英压电天平上的电荷量大于静电计上的电荷量,光点向零点位置的左侧移动,经过预设标线时开始计时。当物质的放射性引起的电荷抵消压电效应所产生的电荷时,光点会重新回到预设标线处(即计时开始的位置)此时停止计时。实验中使用秒表测量光点 2 次经过预设标线的时间间隔,即 1 次充放电的时间或石英压电天平工作 1 次产生的电荷补偿样品电离电荷的时间,如图 7 所示。测量后将调节开关调回到 ON 状态,使压电石英晶体处于短路状态。此即为完成 1 次放电时间的测量过程。更换砝码,可进行多次测量,分析样品的放射性强度。



(a)实验仪器(静电计)摆放正确提示图



(b)实验仪器(静电计)摆放错误提示图

图 5 搭建实验系统页面



图 6 放置样品操作界面图

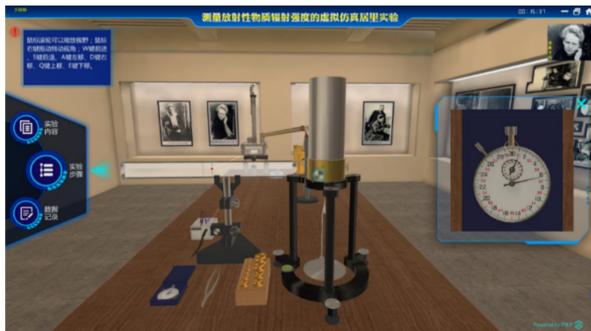


图 7 放电时间测量

### 3.4 拓展实验与学习

实验样品可更换为含有放射性涂料的仪表盘,并与样品 1 的放射性强度做比较分析.

居里夫人在发现新物质钋的过程中不仅完美地测量到了放射性强度,还用更加科学有效的方法提取到了钋的样品,居里夫人也因此项实验获得了诺贝尔化学奖<sup>[14-15]</sup>. 实验的进一步学习内容设计了钋的提取实验,通过虚拟仿真的方式,既能避免样品提取过程中使用剧毒试剂的危险性,以及核辐射危害,又能使学生能够了解居里夫人历时 4 年从沥青铀矿中提取样品的实验方法.

## 4 仿真实验的核心要素

### 4.1 系统和实验场景仿真度高

在法国居里实验室访问交流工作基础上,设计者还原了该实验的核心内容、实验仪器和研究过程. 在实验仪器方面,除光源由卤素灯换为半导体激光器以外,其余装置均与居里夫人当年所用之物保持一致,放置仪器的结构和材质等均与

实物高度相仿。实验室的虚拟环境也是比照当年的实验室进行设计,旨在让学生了解原实验环境,体会到实验研究工作的艰辛,培养坚持不懈的科学态度。

#### 4.2 支持自主学习实验仪器搭建和组装

充分发挥虚拟仿真实验优势,学生不但可以自主搭建和组装实验系统,还可以打开仪器外壳查看仪器内部结构。对于结构较为复杂的石英压电天平和静电计,专门设计了仪器组装的学习环节,帮助学生了解仪器结构的同时,使学生深入理解实验原理和设计思想。

#### 4.3 运动规律的实验场景逼真,呈现方式多样

实验现象和场景呈现效果逼真,同时运用实验视频等多媒体手段充分展示实验过程,对于电子运动等微观现象则采用动画演示的方式展现。设计中,尊重科学规律的同时,考虑到仪器的仿真度和画面的美观。

### 5 教学应用

#### 5.1 思政内容融入实验教学全过程

将课程思政教育有机融入虚拟仿真实验教学中,关注学生的思想和人格培养,践行润物无声的教学育人理念。在参观实验室、仪器搭建、预实验模块下,通过展板和背景资料的介绍激发学生执著追求的科学精神,学习科学家坚忍不拔和无私奉献的品质,培养学生爱国主义精神;在实验过程中设立了居里夫人的虚拟图片,学生可以随时点击图片向虚拟教师提问,鼓励学生深入思索。放射性测量实验和拓展模块的设计,可以塑造学生严谨的工作态度和勇攀科学高峰的品格。思政之“盐”化于课程之“水”,融入实验教学全过程的思政教育内容,实现立德树人的人才培养目标。

#### 5.2 在线教学现状

通过设计性、研究性的模块化实验设计,开展分层次实验教学和个性化学习模式,引导学生自主学习科学实验与科学研究的方法,培养学生独立思考,大胆假设,探索未知,破旧立新的创新、进取精神。利用积累的教育技术学方法,细化实验步骤,通过在线平台给出的实验报告对学习全过程的记录和评分,及时了解每位学生对相关知识点和实验操作的掌握情况,有针对性地给出有效反馈,并进行形成性评价,综合评估学生的科学态度、实验能力和遵章守纪等。用户可以在虚拟场

景下经历一次全过程学习、全方位培养和量化考核评价。

本实验在国家虚拟仿真实验教学课程共享平台(iLab-x 实验空间)上线以来用户数近 4 000 人,累计做实验约 20 000 人次,服务人群包括本校用户、其他学校用户和社会人士(图 8),获得一致好评(图 9)。

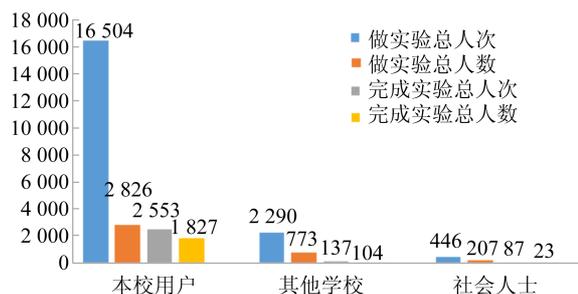


图 8 虚拟实验学习情况统计



图 9 虚拟实验用户评分统计

### 6 结束语

测量放射性物质辐射强度的虚拟仿真居里实验,运用教育技术学的研究方法,基于虚拟仿真技术,从声音、图像和实物 3 类资源中建立情境,搭建虚拟的居里实验室科研环境,高度还原了测量放射性物质辐射强度居里实验的核心内容。本实验涵盖了居里实验的科学思想、实验原理、装置结构、实验条件和实验结果等,与原始实验仪器和历史资料基本一致,有助于学生全面清晰地了解实验原理,掌握实验方法,体验科学研究的历程。目前,本实验项目主要在大学物理实验和近代物理实验等课程中开设,并向各专业学生开放在线学习。同时,校外学习者通过 iLab-x 实验空间平台登录,可进行本虚拟仿真实验课程的知识学习和

实验操作. 今后,本实验项目将持续拓展内容,优化用户体验,为在线学习者提供内容更为丰富、开放共享的虚拟仿真实验.

致谢:感谢科大奥锐科技有限公司对实验项目建设的支持!

### 参考文献:

- [1] 杜静玲,赵志祥,刘文平,等. 中国核技术应用发展现状与趋势[J]. 同位素,2018,31(3):180-187.
- [2] 王旗,朱雨莲,朱盼盼. “核物理综合实验”虚拟仿真实验项目的建设[J]. 大学物理实验,2019,32(6):126-129.
- [3] 杨东侠,刘安平,韩忠,等. 核物理虚拟仿真实验教学平台搭建:基于开放式实验教学[J]. 物理与工程,2018,28(5):106-109,113.
- [4] 赵秀娥,梁国钊. 试论居里夫人的科研艺术[J]. 大学物理,2006,25(12):51-54,63.
- [5] 孙丽. 两弹一星领军科学家的贡献及其启示解读[J]. 自然辩证法研究,2011,27(3):96-101.
- [6] 钱三强. 她在崎岖的道路上奋进:记原子时代的开创者居里夫人[J]. 知识就是力量,1999(2):34.
- [7] Strutt R J. The Becquerel rays and the properties of radium [M]. London: Arnold, 1904:25-35.
- [8] 尹晓冬,金亮,刘战存. 贝克勒尔对放射性的发现及研究[J]. 物理与工程,2013,23(6):38-44.
- [9] 张清建. 居里夫妇与钋和镭的发现[J]. 大学化学,2000,15(2):52-55,62.
- [10] Gillispie C C. Dictionary of scientific biography: Vol 3 [C]. New York,1971.
- [11] 何法信,高萍. 探索原子核奥秘的金钥匙:纪念放射性发现 100 周年[J]. 化学通报,1996,59(12):41-47.
- [12] 玛丽·居里. 居里传[M]. 周荃,等译. 南昌:江西教育出版社,1999.
- [13] 周雁翎. 居里夫人传[M]. 长春:长春出版社,1999.
- [14] 李艳平. 天然放射性的发现[J]. 大学物理,2001,20(5):43-46.
- [15] 白欣,王晓义,冯晓颖. 居里夫人-放射化学的奠基人:为纪念居里夫人获得诺贝尔化学奖 100 周年及 2011“国际化学年”而作[J]. 化学通报,2011,74(5):474-478.

## Virtual simulation design of Curie experiment on measuring radiation intensity of radioactive materials

YU Tingting<sup>1a</sup>, FANG Kai<sup>1a</sup>, ZHANG Yewen<sup>1b</sup>, André Pierre Legrand<sup>2</sup>,  
Bernard Pigelet<sup>2</sup>, JIN Jia<sup>1a</sup>, NI Chen<sup>1a</sup>, YANG Yaping<sup>1a</sup>

(1a. School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

1b. College of Electronic and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. ESPCI Paris, PSL Research University, Paris 75005, France)

**Abstract:** Based on the fusion of the theory knowledge, experimental methods and virtual simulation technology of the experiment which won the Nobel Prize for measurement of the radiation intensity, the virtual simulation comprehensive experimental project was designed involving scientific research methods. By building the whole process, many links and immersion online experiment teaching environment, students could apply comparative measurement and other means to master the experimental methods of obtaining small charge and saturation current, deepen their understanding on the principle of measuring the radiation intensity of materials, and experience the process of scientific discovery.

**Key words:** radiation; Curie experiment; virtual simulation experiment

[责任编辑:郭伟]