



康普顿散射成像与测量实验系统研发

杨宝璐, 王新*, 杨诚, 王铭勋, 徐捷, 穆宝忠

(同济大学物理科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 围绕康普顿散射成像和测量实验需求, 开展了 X 射线康普顿散射实验系统研发及实验研究。针对系统准直器对成像分辨率及光束集光立体角的影响进行仿真, 并设计了实验系统的结构。在研究探测器对不同能量 X 射线的探测效率的基础上, 建立了光通量计算模型, 分析了探测器参数对散射 X 射线光通量的影响, 提高了实验系统的探测效率。在对 X 射线康普顿散射实验的研究中, 获得了清晰的散射图像, 初步测量了 PMMA (polymethyl methacrylate, 聚甲基丙烯酸甲酯) 的散射强度。该系统可以用于康普顿散射成像演示实验和物质散射分析的研究。

关键词: 康普顿散射; 准直器; 分辨率; 探测效率

中图分类号: O434.1

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20220591

Research of Compton Scattering Imaging and Measurement Experimental System

YANG Baolu, WANG Xin*, YANG Cheng, WANG Mingxun, XU Jie, MU Baozhong

(School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Centering on the needs of Compton scattering imaging and measurement experiments, the development of X-ray Compton scattering experimental system and experimental research were carried out. The influence of the system collimator on the imaging resolution and the solid angle of the beam collection was simulated, and the structure of the experimental system was designed. Based on the study of the detection efficiency of the detector for different energies of X-rays, the luminous flux calculation model was established, the influence of detector parameters on the luminous flux of scattered X-rays was analyzed, and the detection efficiency of the system was improved. X-ray Compton scattering experiments were carried out, clear scattering images were obtained, and the scattering intensity of PMMA was preliminarily measured. The system can be used for demonstration experiments of Compton scattering imaging and studies of material scattering analysis.

Key words: Compton scattering; collimator; resolution; detection efficiency

X 射线与物质的相互作用主要有 4 种形式: 光电效应、瑞利散射、康普顿散射和电子对效应^[1]。康普顿散射是指入射的 X 射线光子与原子内的外层轨道电子发生非弹性碰撞, 光子的部分能量转移给自由电子, 在一定角度产生散射射线和反冲光子, 散射波长变化与散射角度有关^[2]。不同物质的密度与有效原子序数的差异导致了每种物质都具有不同的康普顿散射截面, 且康普顿散

射主要发生在散射角度大于 90° 的方向, 因此, 通过探测背向康普顿散射光子可以实现对物质的 X 射线成像, 获得物质的形貌、对比度差异等信息, 在工业无损检测、安全检测、材料科学等领域具有重要的应用^[3-5]。

目前, 常规的 X 射线康普顿散射成像系统主要包括龙虾眼型和光束扫描型^[6-7] 两类。龙虾眼型是仿真龙虾眼睛的结构, 分为 Schmidt 结构和

收稿日期: 2022-10-08; 修回日期: 2023-08-24

基金项目: 2021 年同济大学精品实验项目(2021-12)。

作者简介: 杨宝璐(1996-), 男, 博士生, 主要从事 X 射线成像方面的研究。

*通信作者: 王新(1980-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事 X 射线光学及系统方面的研究。E-mail: wangx@tongji.edu.cn

Angel 结构。入射的 X 射线在龙虾眼物镜的通道内进行反射后聚焦获得图像。龙虾眼物镜体积小、重量轻, 龙虾眼物镜的成像性能, 如空间分辨率、集光效率由通道尺寸决定。如果要获得高分辨率成像, 需要很小(几个毫米到微米级)的通道尺寸; 但是, 这又会导致物镜的集光效率低, 影响对弱信号的探测能力。同时, 物镜的视场由物镜整体尺寸决定, 如果要实现百毫米的大视场, 则需要物镜的层数达到几百甚至千层, 极大地增大了制作的难度。另外, 由于 X 射线在物镜内表面的反射掠入射角度很小, 一般小于 1° , 且随着 X 射线能量的增大, 掠入射角度更小, 因此, 物镜适合应用于对较低能量 X 射线的聚焦和成像, 不适合高能点的应用。光束扫描型康普顿散射成像系统基于准直器形成高速扫描的点光束, 利用大面积探测器接收物质的 X 射线散射信号。通过优化设计准直器、探测器, 可以在很大视场内获得高分辨率、高探测效率的散射成像, 已初步应用于安检和无损检测领域^[8], 但依然存在分辨率和探测灵敏度不够高, 技术不够成熟等问题。目前, 在高校教学中也开展了 X 射线康普顿散射的近代物理实验教学^[9], 但是, 大学中的康普顿散射实验教学主要是验证康普顿频移, 而且多数是借助改进的 X 射线衍射仪器来完成康普顿频移的物理实验教学^[10-12]。受制于实验仪器, 相对复杂的 X 射线康普顿散射实验则无法开展。

本文开展了光束扫描 X 射线康普顿散射成像与测量系统的设计及实验研究。通过建立散射探测的光通量计算模型, 解决了 X 射线散射系统探测效率低的问题, 提高了康普顿散射成像系统的探测效率。最后, 开展实验检验了系统的成像性能和对有机物品的探测能力。研制的康普顿散射成像系统可以用于 X 射线康普顿散射成像实验演示和利用康普顿散射性质来分析物质种类等物理实验教学, 对于丰富物理实验教学内容 and 手段具有重要意义。

1 康普顿散射截面

康普顿散射是指硬 X 射线或者 γ 射线与原子内电子发生非弹性碰撞, 散射光与入射光的波长发生改变, 也称为非相干散射或非弹性散射。

X 射线与自由电子发生康普顿散射, 散射光的光子能量与散射角有关, 而散射光的强度同样与散射角有关。康普顿散射强度随角度 θ 的分布情况, 可以由 K-N (Klein-Nishina) 方程给出^[8]。

$$\frac{d\sigma_{\text{KN}}}{d\Omega} = \frac{r_e^2}{2} \left[\frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \right]^2 \left[1 + \cos^2\theta + \frac{\alpha^2(1 - \cos\theta)^2}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \right] \quad (1)$$

式中: $\alpha = E_0/m_e c^2$ 为以电子静能为单位的入射光子能量; r_e 为经典电子半径; $d\sigma_{\text{KN}}/d\Omega$ 为康普顿散射截面, 即光子与自由电子发生非弹性碰撞后, 散射光子向各个方向散射的概率。计算的康普顿散射截面与散射角的关系如图 1 所示。低能 X 射线的散射截面大于高能 X 射线, 对于背散射(散射角大于 90°), 散射角越接近 180° , 散射强度越大。

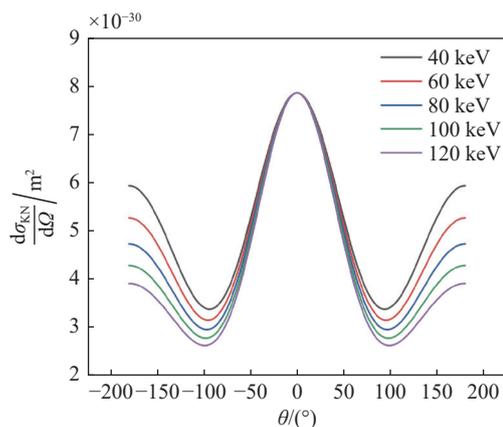


图 1 康普顿散射截面与散射角的关系

2 康普顿散射实验系统设计

康普顿散射成像实验系统组成如图 2 所示, 光束扫描康普顿散射实验系统原理如图 3 所示。将 X 射线源通过前置狭缝将产生的光束准直成很窄的扇形光束, 照射在高速转动的准直器上。准直器上有 4 个出光孔, 出光孔以外区域采用高原子序数(钨、铅等)材料进行屏蔽, 确保出光孔以外部分无法透过 X 射线。在准直器转动的过程中, 同一时刻有且仅有一个出光孔出射 X 射线, 形成一束 X 射线细光束, 经过高速转动的准直器后在垂直方向做一维高速线扫描。同时, 另一维扫描则通过待测物与设备间的相对运动产生。探测器与 X 射线源均位于被检测物的同一侧, 当探测器接收到待测物产生的散射信号后, 将光信号

转变为电信号, 利用算法将时序的电信号重构获得待测物的二维图像。

在康普顿散射系统中, 成像空间分辨率、出光立体角和集光效率是反映系统性能的重要指标。空间分辨率由系统准直后的细光束直径决定, 而出光立体角则为系统的有效 X 射线光束的立体角, 集光效率则由探测器对散射 X 射线的探测效率和光通量决定。因此, 优化设计系统的结构和探测器是实现高分辨率、高灵敏度探测的关键。

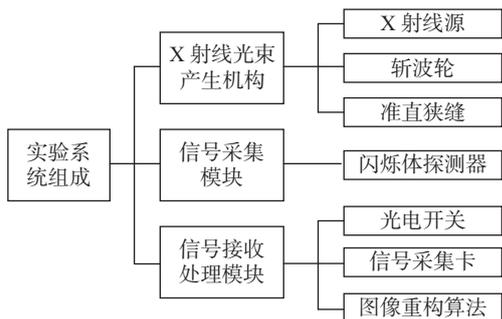


图 2 康普顿散射成像实验系统组成示意框图

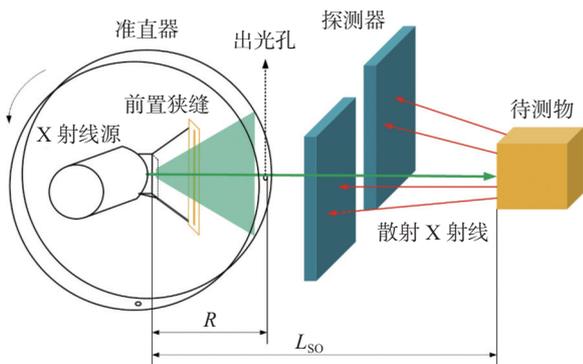


图 3 光束扫描散射成像原理图

图 3 中准直器直径决定了准直长度, 它与光源焦斑尺寸、前置狭缝共同决定出光立体角。成像分辨率由投影在物体上光斑的线宽决定, 这跟光源与物体的距离 L_{so} 有关, 需要通过计算分析出光孔直径与准直长度来达到较好的出光立体角和分辨率。如图 4 和图 5 所示为计算的分辨率和出光立体角, 此时光源焦斑直径为 0.8 mm, L_{so} 为 2 m, 可以看出当准直器出光孔直径小于等于 0.5 mm 时, 分辨率较高。同时, 为保证较高的出光立体角, 出光孔直径为 0.5 mm, 此时, 当准直器的直径为 500 mm 时, 实验系统的出光立体角为 0.4×10^{-5} sr。

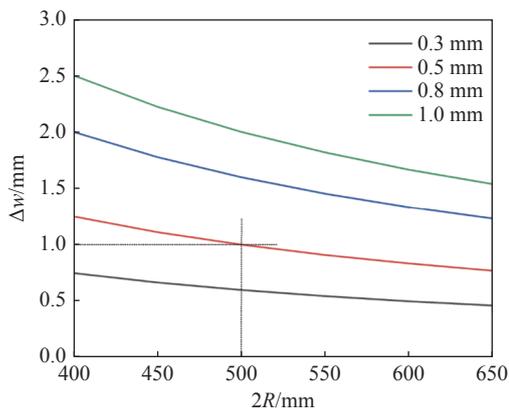


图 4 准直器与出光孔直径对分辨率的影响

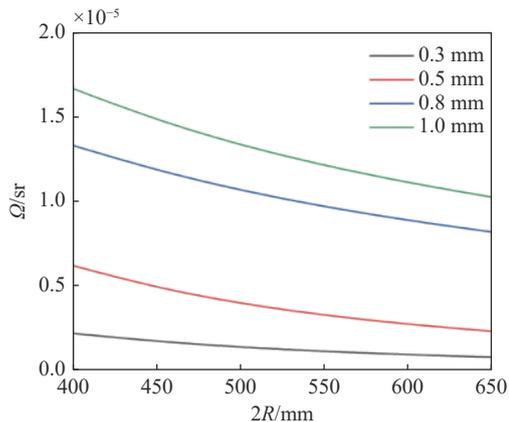


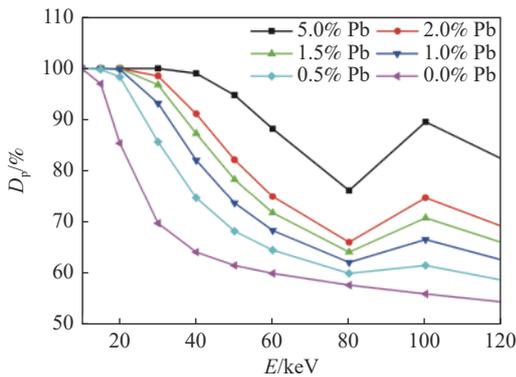
图 5 准直器与出光孔直径对集光效率的影响

3 X 射线探测效率仿真

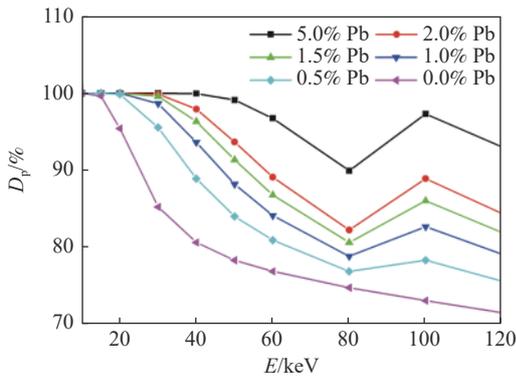
康普顿散射信号比透射信号弱几个数量级, 需要采用大面积的探测器来提高采集的散射信号强度。实验采用塑料闪烁体作为系统的弱光子探测器件。对于塑料闪烁体, 决定其探测效率的主要因素是 X 射线光子在塑料基质中的沉积效率和荧光物质的发光效率。为了提高探测效率, 很多塑料闪烁体采用掺铅(Pb)来提高 X 射线在其中的沉积效率, 但这又会影响发光效率。为了优化探测器对于 X 射线的探测效率, 计算分析了不同厚度掺铅(Pb)塑料闪烁体在不同能点对 X 射线光子的沉积效率, 如图 6 所示。图 6(a)和图 6(b)分别为 50 mm 和 80 mm 厚的塑料闪烁体在不同掺铅程度与不同能点下的沉积效率。由图可以看出, 随着 X 射线能量提高, 沉积效率逐渐降低, 在 80~100 keV 能区的沉积效率突变是由铅元素的 K 电子层吸收边(88 keV)引起的。另外, 较厚的闪烁体具有更高的沉积效率, 尤其在低能区。

对于闪烁体, 实际探测效率由沉积效率和发光效率共同决定。发光效率即沉积 1 MeV 能量产

生的荧光光子数。因此，在沉积效率仿真的基础上，同时考虑到不同掺铅比例的发光效率，计算了闪烁体的探测效率，如图 7 所示。由图可以看出，由于掺铅塑料闪烁体的发光效率随着铅含量的增大而降低，掺铅的效果并没有体现出来，反而 5% 掺铅的探测效率低于不掺铅的探测效率。对于厚度 50 mm 且不掺铅的闪烁体探测器，探测效率约为 63%，当厚度为 80 mm 时，探测效率约为 80%。根据计算结果，厚度为 50~80 mm 的塑料闪烁体能够获得较高的 X 射线探测效率，并且对于该厚度的塑料闪烁体，无需掺铅。掺铅主要用于较薄的塑料闪烁体，因为薄闪烁体的沉积效率太低。



(a) 50 mm 厚度塑料闪烁体



(b) 80 mm 厚度塑料闪烁体

图 6 两种厚度塑料闪烁体在不同掺铅程度与射线能点变化下沉积效率

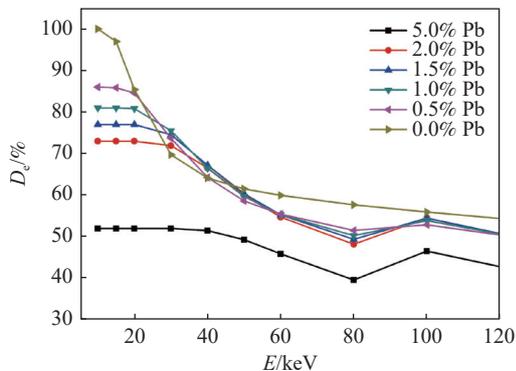


图 7 塑料闪烁体探测效率

4 光通量建模与仿真

前面分析了入射 X 射线细光束的出光立体角，这决定了照射在物体上的 X 射线的强度。由于散射的 X 射线信号较弱，需采用较大尺寸的闪烁体探测器，从而收集更多的散射光子，因此，建立了探测器的光通量计算模型，分析探测器对散射光的收集能力，如图 8 所示。

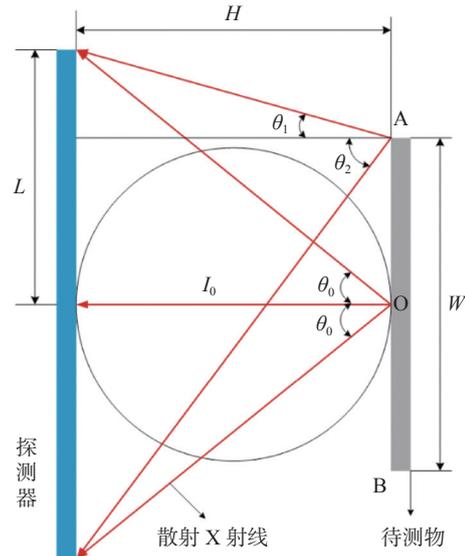


图 8 散射探测光通量模型

根据图 8，被探测器收集的 X 射线的光通量可以表示为：

$$\Phi = \int_0^{2\pi} \int_0^\theta I_0 \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi \quad (2)$$

计算后得到：

$$\Phi = \pi I_0 \sin^2(\theta) \quad (3)$$

式中： I_0 为中心光束入射到探测器的光强， θ 为 X 射线发散角。假设待测物到探测器的距离 H 为 200 mm，则计算得到物品的中心点 O 和边缘点 A 、 B 散射的 X 射线被探测器收集的光通量，如图 9 所示，设定 I_0 为 1，物品长度为 2 m。由图 9 可以看出，物品中心点散射的 X 射线被探测器接收的光通量变化很小，但边缘点散射 X 射线被接收的光通量随着探测器尺寸 L 的增大而显著增大。当探测器长度 $2L$ 达到 3 m 以上时才能使中心点与边缘点被接收的散射 X 射线的光通量相接近。同时，为了使散射实验系统整体尺寸不至于太庞大，可以适当减小探测器的长度，以边缘点光通量不低于中心点光通量的 80% 为标准，中心

点与边缘点信号强度的差异可以根据实测数据来进行校正。

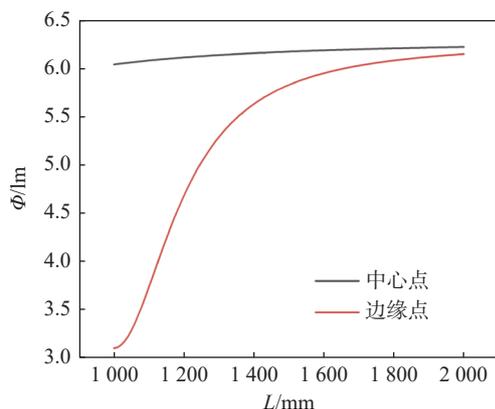


图 9 光通量与探测器尺寸的关系

5 康普顿散射实验

基于设计和仿真, 研制了 X 射线康普顿散射实验系统, 系统主要由 X 射线源、准直器、探测器等构成, 实验系统的主要参数如表 1 所示。

表 1 康普顿散射实验系统参数

结构参量	数值
准直器直径 $2d/\text{mm}$	500
准直器出光孔直径 n/mm	0.5
前置狭缝宽度 m/mm	0.5
探测器厚度 l/mm	50
探测器长度 L/mm	1250
设计分辨率 i/mm	1

如图 10 所示为研制的 X 射线康普顿散射实验系统。X 射线源采用一体式钨靶 X 射线光管, 光源最高电压为 160 kV, 功率连续可调, 辐射出能量为 0~160 keV 的连续、特征谱 X 射线。探测器及数据采集模块包含: 塑料闪烁体、光电倍增管、信号放大器、数据采集卡以及光电开关。光电倍增管采用高压电源模块供电, 高压电源模块的输出电压为 0~-1500 V, 由控制电压进行调节, 实验中光电倍增管的输入电压为-1200 V。

为了检验系统背散射成像的能力, 在木箱放置一些参考样品, 包括剪刀、T 型 PMMA、护手霜、塑料手枪, 如图 11(a)所示。图 11(b)能够清晰地显示物品的轮廓, 并且样品的细节也清晰可见, 如塑料手枪中的电池仓。

同时, 为了检验系统对不同厚度样品的探测

能力, 采用不同厚度的 PMMA 样品进行了 X 射线散射实验。如图 12(a)所示, 从左到右样品的厚度分别为 10、15、20、25 和 30 mm。如表 2 所示是厚度差为 5 mm 的 PMMA 强度信号的比值。从图 12(b)中可以看出, 系统能够探测出厚度为 10 mm 及以上的 PMMA, 并且随着厚度的增加散射信号强度相应增大。直观上来看, 根据图像亮度能够分辨出厚度为 10 和 15 mm 的样品, 但是基本无法区分 25 和 30 mm 的样品, 这是由很厚的样品所导致的散射信号饱和引起的。表 2 为实际测量的不同厚度比的 PMMA 在 X 射线的高、低能和大、小功率下的散射强度比。利用研制的康普顿散射实验系统可以开展不同材料、不同厚度物质的康普顿散射强度和对比度分析实验研究。

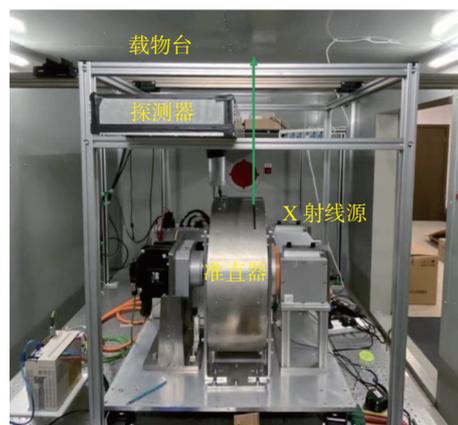
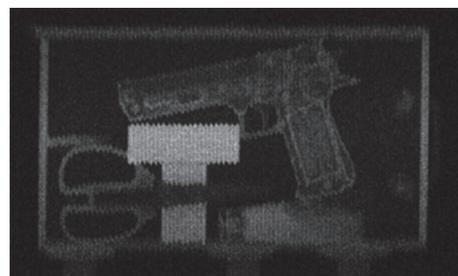


图 10 康普顿散射实验系统



(a) 物品可见光图像

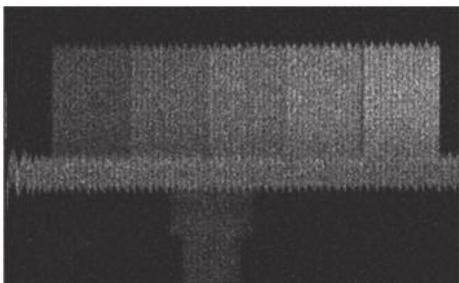


(b) 物品背散射图像

图 11 实验系统分辨率检验



(a) PMMA 可见光图像



(b) PMMA 背散射图像

图 12 不同厚度样品强度测量实验结果

表 2 厚度差为 5 mm 的 PMMA 散射强度比

厚度比	射线源电压与功率			
	150 kV		60 kV	
	750 W	300 W	750 W	300 W
10:15	0.728	0.733	0.760	0.746
15:20	0.833	0.816	0.844	0.861
20:25	0.871	0.908	0.921	0.930
25:30	0.902	0.861	0.910	0.906

6 结束语

本文围绕康普顿散射成像和测量实验需求,开展了康普顿散射实验系统研发及实验研究。通过建立系统成像分辨率与探测器探测效率的理论模型,设计了实验系统结构,研究了探测器厚度和尺寸对不同能量 X 射线探测效率的影响。基于设计,开展了 X 射线康普顿散射实验研究。结果显示,康普顿散射系统在 2 m 范围的成像分辨率约为 1 mm,实现了大视场下的高分辨率探测。该 X 射线康普顿散射实验系统不但可用于综合性和探索性实验教学,在无损检测和材料科学领域也具有很好的应用前景。

参考文献

- [1] HENKE B L, GULLIKSON E M, DAVIS J C. X-ray interactions: Photoabsorption, scattering, transmission, and reflection at $E = 50\text{--}30\,000$ eV, $Z = 1\text{--}92$ [J]. *Atomic Data & Nuclear Data Tables*, 1993, 54(2): 181–342.
- [2] COMPTON A H. A quantum theory of the scattering of X-rays by light elements[J]. *Physics Review*, 1923, 21(5): 483–502.
- [3] 崔玉华. X射线康普顿散射成像技术的研究与应用[J]. *中国安防*, 2012(3): 41–44.
- [4] HARDING G. X-ray scatter tomography for explosives detection[J]. *Radiation Physics & Chemistry*, 2004, 71(3): 869–881.
- [5] HUBBELL J H, VEIGELE W J, BRIGGS E A, et al. Atomic form factors, incoherent scattering functions, and photon scattering cross sections[J]. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1975, 4(3): 471–538.
- [6] XU J, WANG X, ZHANG Q, et al. A novel lobster-eye imaging system based on Schmidt-type objective for X-ray backscattering inspection[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(7): 073103.
- [7] DINCA D C, SCHUBERT J R, CALLERAME J. X-ray backscatter imaging[C]//Proc. SPIE6945, Optics and Photonics in Global Homeland Security IV. [S.l.]: [s.n.] 2008: 694516.
- [8] HUANG S L, WANG X, CHEN Y F, et al. Modeling and quantitative analysis of X-ray transmission and backscatter imaging aimed at security inspection[J]. *Optics Express*, 2018, 27(2): 337–349.
- [9] 杨军, 蒋开明, 葛传楠, 等. 康普顿效应教学中几个问题的探析[J]. *大学物理*, 2009, 28(11): 25–28.
- [10] 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.
- [11] 刘茂元, 高启, 陈天禄, 等. 将科学研究融入大学物理教学的探讨——以宇宙射线研究为例[J]. *物理与工程*, 2021, 31(3): 39–47.
- [12] 刘海林, 吴奕初, 杨智慧, 等. 虚实结合的核物理综合实验系统的设计与教学实践[J]. *物理实验*, 2021, 41(9): 35–39.

编辑 王燕