

X 射线及粒子关联成像技术研究进展

谈志杰¹, 李晴宇^{1,2}, 喻虹^{1,3*}, 韩申生^{1,3}

¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所量子光学重点实验室, 上海 201800;

² 中国科学院大学, 北京 100049;

³ 国科大杭州高等研究院, 浙江 杭州 310024

摘要 X 射线及粒子成像技术是探索物质内部结构的有力工具, 对于物理学、材料学、生命科学等多领域的发展具有重要的推动作用。关联成像不同于传统成像, 是利用光场的高阶关联特性来获取物体信息, 具有独特的优越性, 在可见光成像领域取得了大量成果。近年来, 随着关联成像技术的发展, X 射线及粒子关联成像已成为新的前沿热点。介绍了基于热光源、赝热光源以及纠缠光源的 X 射线关联成像技术, 以及关联成像技术在原子、中子、电子等粒子成像领域取得的研究进展, 并对 X 射线及粒子关联成像技术未来的发展进行了展望, 探讨了 X 射线及粒子关联成像技术在实现应用中需要解决的一些问题。

关键词 成像系统; 关联成像; X 射线成像; 中子成像

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1011008

Progress on Ghost Imaging with X-Ray and Particles

Tan Zhijie¹, Li Qingyu^{1,2}, Yu Hong^{1,3*}, Han Shensheng^{1,3}

¹ Key Laboratory of Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³ Hangzhou Institute for Advanced Study, University of Chinese Academy of Sciences, Hangzhou, Zhejiang 310024, China

Abstract Imaging with X-ray and particles provides a powerful tool to explore the internal structure of matter, which plays an important role in the development of physics, materials science, life science and other fields. Different from traditional imaging methods, ghost imaging exploits the characteristics of high-order correlation of optical fields to obtain sample information, which has its unique advantages. Lots of achievements have been made in the field of visible light ghost imaging. In recent years, with the development of ghost imaging technology, X-ray and particle ghost imaging has become a frontier research field. This paper summarizes X-ray correlation imaging methods based on thermal source, pseudothermal source and entangled light source, and the research progress of correlation imaging technology in the regime of atomic, neutron, and electron imaging. The future development of X-ray and particle ghost imaging technology and some problems that need to be solved in application are discussed.

Key words imaging systems; ghost imaging; X-ray imaging; neutron imaging

OCIS codes 110.0113; 110.6150; 340.7440

收稿日期: 2021-03-08; 修回日期: 2021-04-14; 录用日期: 2021-04-23

基金项目: 国家自然科学基金(11627811)、国家重点研发计划(2017YFB0503303)

* E-mail: yuhong@siom.ac.cn

1 引言

19 世纪末物理学的三大发现(X 射线、放射性和电子)使得人们认识世界从宏观走向了微观,这为物理学和生物医学带来了革命性的发展。相比于传统的可见光成像,射线及粒子成像能够获得物体内部结构信息,同时还能够具有较高的空间分辨能力,在材料科学、生命科学等多个科研领域发挥着重要的作用^[1]。

自 1895 年德国科学家伦琴发现 X 射线以来^[2],X 射线成像相关研究一直是科学研究的热点话题,与其相关的研究工作多次获得诺贝尔奖。劳厄于 1912 年发现的 X 射线晶体衍射现象更是极大地推进了人类科技的进步。常规的 X 射线成像主要包括吸收成像、相衬成像^[3-5]以及相干衍射成像^[6-8]等成像方法。近年来,随着同步辐射光源的发展和 X 射线自由电子激光的出现,X 射线光源的亮度、相干性等性能得到了进一步提升,X 射线成像质量也在不断提高^[9]。中子成像与 X 射线有很多相似之处,但 X 射线主要与物质的电子发生相互作用,而中子能够穿透物质的电子层与原子核发生相互作用。同时由于中子具有磁矩,与一些轻元素的相互作用较强。基于这些特性,中子成像在航天航空、化工冶金、核工业、考古学、生命科学等领域应用广泛^[10-14]。电子也是成像的重要载体,电子显微镜可以提供远超过传统光学显微镜的空间分辨率,故在材料学、生物医学等领域具有重要地位^[15]。

以上这些成像方法主要是利用电磁场的一阶关联特性来获取物体的信息。1956 年, Hanbury-Brown-Twiss(HBT)实验^[16-17]开启了量子光学的新

篇章,人们对高阶相干性有了新的认识和理解^[18-19]。1995 年, Pittman 等^[20]利用光场的高阶关联特性实现了关联成像,也称为鬼成像(Ghost Imaging, GI)。随后,关联成像成为了前沿热点,在遥感、光刻、光谱相机、超分辨成像等众多领域得以应用^[21-25],但相关进展主要集中在可见光波段。2016 年,关联成像技术被推广到了 X 射线成像领域^[26-27],从而为 X 射线及粒子成像打开了一扇新的大门,目前原子、中子、电子等费米子粒子关联成像也已经成功实现^[28-30]。

本文介绍了近年来射线及粒子关联成像领域的主要研究成果。首先介绍了 X 射线关联成像研究进展,然后介绍关联成像技术在费米子成像领域的相关研究,包括原子、中子和电子关联成像,最后讨论 X 射线及粒子关联成像技术的未来发展方向。

2 X 射线关联成像研究进展

关联成像技术已经在 X 射线成像领域取得了大量的成果,采用的光源主要分为热光源、赝热光源以及纠缠光源。

2.1 热光源 X 射线关联成像

2016 年, Pelliccia 等^[26]在欧洲同步辐射装置(ESRF)上完成了真实热光源的实空间 X 射线关联成像实验演示,实验装置及成像结果如图 1 所示。同步辐射振荡器出射的 X 射线束通过透镜组会聚后进入单色仪,再由 Lane 晶体进行分束^[31],衍射光束作为参考光直接由探测器记录,透射光束继续向前传播后穿过直径为 200 μm 的铜丝样品作为探测光束。图 1(b)展示了使用传统方法得到的包含探测臂和参考臂信号的完整图像,图 1(c)和图 1(d)

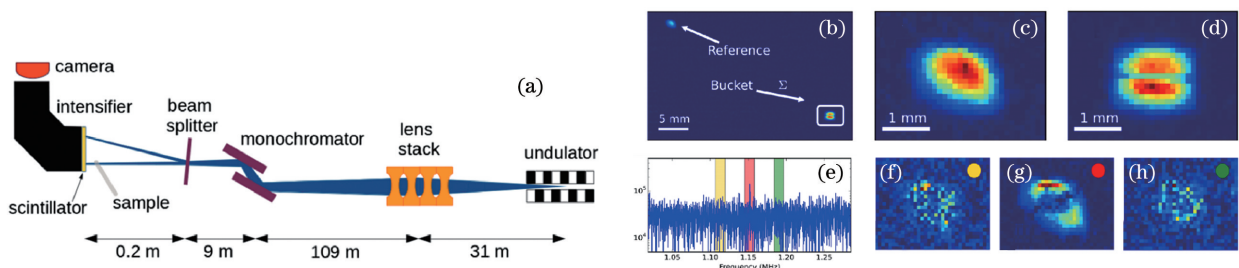


图 1 热光源 X 射线关联成像实验方案及其结果^[26]。(a)热光源 X 射线关联成像实验方案;(b)探测臂和参考臂信号的完整图像;(c)(d)参考臂与探测臂信号特写视图;(f)~(h)图 1(e)中显示的三个频段窗口分别通过傅里叶滤波获得的图像

Fig. 1 Experimental setup of X-ray GI using a thermal X-ray source and the results^[26]. (a) Experimental setup for X-ray GI using a thermal X-ray source; (b) complete frame with marked positions of the reference and bucket beams; (c) (d) close-up views of the reference and bucket beams; (f)~(h) ghost images obtained by Fourier filtering with the three frequency windows displayed in Fig. 1(e)

分别是参考臂和探测臂的特写视图,从图中可以清楚地看到铜丝。实验采用的是真实热光源,即采用孤立的电子束产生 X 射线,可以用同步辐射发出的散粒噪声来形成散斑场。由于脉冲较短,信号需要用超快相机进行接收,超快相机放置在分束器后 20 cm 的位置。实验中对样品采样 20000 次,为了得到正确的结果,需要对测量结果进行傅里叶滤波处理。所得到的实验结果如图 1(e)~(f)所示。从实验结果中可以看出,当采用的储存环频率为 1.15 MHz 时,能够通过关联得到样品,如图 1(g)所示,而当频率不匹配的时候,无法得到图像。

该实验采用真实热光源进行 X 射线关联成像,同时采用晶体衍射的方法实现 X 光波段的关联分束,这种分束方式所产生的两束光具有较好的远场关联特性^[32]。但是真实热光源往往信噪比较低,获得的图像质量较差。

2.2 赝热光 X 射线关联成像

具有空间相干性的光辐照散射介质或者空间相位调制器件后,会产生可以模拟真实热光场分布的散斑场,散斑场随时间变化则形成赝热光源。由于

赝热光源具有相干时间可控、散斑场特性可以进一步优化等优势,广泛应用于可见光关联成像。

2016 年,中国科学院上海光学精密机械研究所 Yu 等^[27]首次利用 X 射线赝热光源实现了傅里叶空间关联成像(FGI)实验演示,实验原理如图 2(a)所示。在实验中,为了克服分光困难的问题,与之前的晶体衍射分光方案不同,该研究小组提出了一种虚拟分光等效方案,即只使用空间非相干的赝热光源和一个固定的面探测器,在相干时间内利用电控装置控制样品的移入和移出光路,即可完成探测信号和参考信号的测量。因此仅使用一个探测器就可以记录两路光的信号,再利用关联运算得到样品的傅里叶变换衍射谱。该研究团队在上海同步辐射光源(SSRF)实验中采用了波长为 0.1 nm 的硬 X 射线,实验样品是在 Si_3N_4 衬底上制备的厚度为 2.2 μm 的 5 个金膜狭缝,狭缝间距为 3 μm ,狭缝宽度为 1 μm 。重建傅里叶衍射谱的过程中采用了稀疏约束的重构算法^[33]来降低采样率要求,提高图像质量。实验结果如图 2(b)和图 2(c)所示,与样品的空间特征一致。

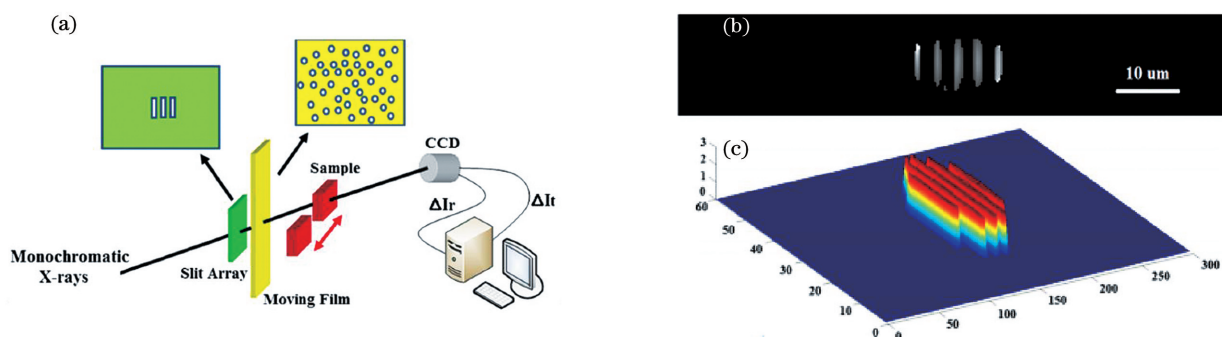


图 2 赝热 X 射线傅里叶空间关联成像方案及其结果^[27]。(a)赝热 X 射线傅里叶空间关联成像方案;(b)重构样品透射率的振幅分布图像;(c)重构样品透射率的相位分布图像

Fig. 2 Experimental setup for X-ray FGI using a pseudothermal X-ray source and the results^[27]. (a) Experimental setup for X-ray FGI using a pseudothermal X-ray source; (b) (c) amplitude and phase distributions of the reconstructed sample's transmittance

该实验完成了傅里叶空间的 X 射线关联成像原理演示,获得了非晶态样品的傅里叶谱,并通过物体的傅里叶谱成功重建了物体的实空间分布信息。这种成像方法的极限分辨率理论上仅受限于 X 射线波长,因此与相干衍射成像类似,有可能获得比实空间成像更高的空间分辨能力。同时,该方法能够获取样品的相位信息,这对于弱吸收的生物样品成像具有重要意义。

2017 年, Schneider 等^[34]提出基于自由电子激光(FEL)非相干散射的 X 射线调制方法,从多光子

干涉的角度出发^[35-37],通过计算关联得到物体的傅里叶信息。该实验在 FLASH 装置的 PG2 线站完成,实验装置如图 3(a)所示。使用的自由电子激光被设置为 10 Hz 的脉冲模式,中心波长为 13.2 nm,通过单色仪后带宽范围限制在 0.1% (± 0.013 nm)。在实验中,将这样的 FEL 光束打入缓慢移动的散射介质形成赝热 X 射线光源,使用正六边形排列的六方孔二维样品来模拟苯环结构,如图 3(c)所示。穿过二维物体的光束被 CCD 探测记录,CCD 与物体的距离为 275 mm。计算高阶关

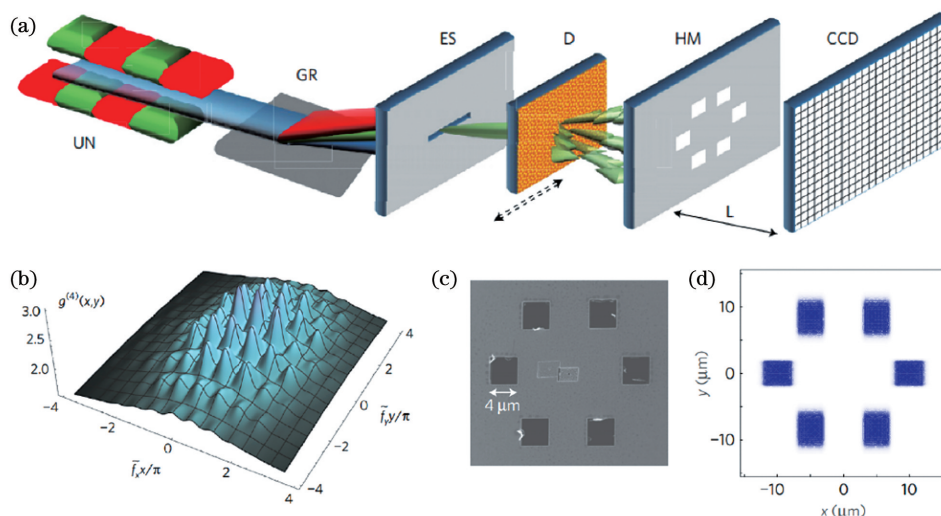


图 3 自由电子激光非相干散射量子成像实验^[34]。(a)自由电子激光非相干散射量子成像实验原理图;(b)10800 帧散斑图得到关联函数 $g^{(4)}$;(c)样品扫描电镜显微结果;(d)重构出的样品图像

Fig. 3 Quantum imaging with incoherently scattered light from a free-electron laser^[34]. (a) Experimental setup for quantum imaging with incoherently scattered light from a free-electron laser; (b) 10800 single-shot speckle patterns are processed to obtain correlation function $g^{(4)}$; (c) scanning electron microscopy image of the hole mask; (d) reconstructed image of the hole mask after evaluating

联后得到的结果如图 3(b)所示,重建后得到样品的空间分布,如图 3(d)所示。该方案能够获得低于 Abbe 极限的高分辨率图像,获取样品的物质结构和动力学信息,尤其是在一阶相干性被不完美的光学元件所破坏时,该方法依然有望得到良好的结果,这也是非相干光源成像的一个显著优势。

X 射线成像技术在医学成像中的应用是非常广泛的,如何在保持高质量图像的同时减少射线对生物样品的辐射损伤是 X 射线成像技术的一个重要课题。2018年,中国科学院物理研究所吴令安研究

团队^[38]利用台式 X 射线源实现了单光子量级的超低辐射关联成像,实验原理如图 4(a)所示。将可以旋转的 SiC 砂纸置于光路中以产生空间随机的散斑场,并通过电机的精准定位实现参考臂与探测臂的分离。在砂纸后面放了 Fuji 胶片以量化 X 射线辐射剂量,总通量约为 $2.9 \times 10^5 \text{ photons} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{mm}^{-2}$ ^[39],这相当于 CCD 每个像素的通量为 $120 \text{ photons} \cdot \text{s}^{-1}$ 。考虑到曝光时间为 10 ms,故实际完成 X 射线关联成像实验需要的通量为 1.2 photons/pixel。实验采集了 10000 次信号,样品分别为带有“CAS”标记的

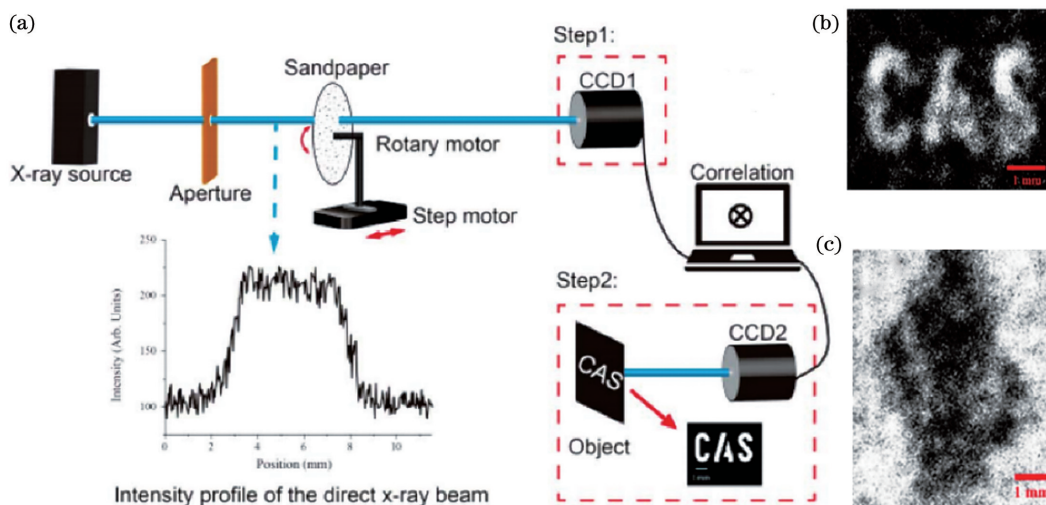


图 4 台式 X 射线关联成像实验装置及成像结果^[38]。(a)实验布局图;(b)“CAS”的结果;(c)贝壳结果

Fig. 4 Experimental setup for tabletop X-ray GI and the imaging results^[38]. (a) Experimental scheme; (b) ghost image of “CAS”; (c) ghost image of the shell

不锈钢面板和贝壳类生物样品,结果如图 4(b)和图 4(c)所示。对于第一个生物样品,X 射线关联成像相对于传统 X 射线成像技术来说,其图像分辨率更占优势,而对于第二个生物样品,X 射线关联成像需要较长的曝光时间,约为 220 ms。该实验证明,与传统的 X 射线成像相比,X 射线关联成像能够在相同辐射剂量的情况下得到更高的信噪比,有利于减小生物样品的辐射损伤,从而拓展了 X 射线关联成像的应用范围。

之后,该课题组又进行了散斑场优化设计,实现了基于矩阵调制的 X 射线关联成像^[40],并将多级小波卷积神经网络(MWCNN)扩展成可压缩哈达玛多级小波卷积神经网络(CH-MWCNN),进一步提高了成像质量,在采样率为 18.75%的情况下得到了 10 μm 的分辨率。

2018 年的另一项工作同样关注到低剂量成像,该方法由 Kingston 等^[41]提出,在低剂量下实现了三维物体内部成像。其原理是利用空间随机的 X 射线从不同角度照射样品,在每个投影方向上进行二维关联成像,将得到的多幅二维投影图像再进行三维重构。由于该方法借用了计算机断层扫描(CT)技术,这种方法也被称为鬼断层扫描技术(GT)。实验装置如图 5(a)所示,该实验采用的光源为同步辐射光源,能量为 26 keV,采用 1 mm 厚的 Ni 作为散射屏产生散斑场,通过散射屏的移动进行不同的采样,采用晶体分光的方法实现分束。实验的样本是一个直径为 5.60 mm 的铝圆柱体,钻入两个直径分别为 1.98 mm 和 1.50 mm 的圆柱体孔,该样品被固定在一个旋转工作台上。实验以步长 $\Delta\theta = 111.25^\circ$ 取 14 个旋转角度,每个角度取 2000 幅图像。为了提高图像质量,通过 Landweber 算法和平滑先验进行计算^[42],得到的重构三维图像如图 5(d)所示。该实验展示了 X 射线关联成像在

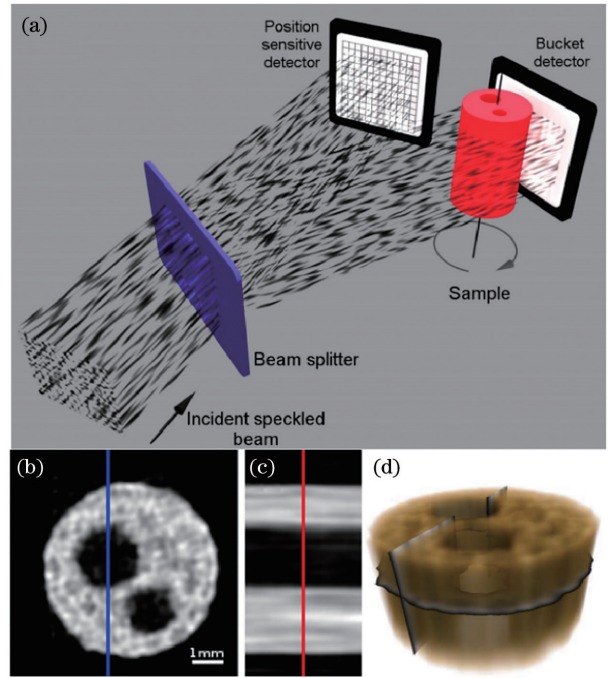


图 5 X 射线 GT 实验装置及实验结果^[41]。(a)X 射线 GT 实验装置;(b)(c)用于重建三维 X 射线 GT 的物体水平和竖直方向的二维切片;(d)3D GT 重建对象的半透明渲染图

Fig. 5 Experimental setup for X-ray GT and the results^[41]. (a) Experimental setup for X-ray GT; (b)(c) horizontal and vertical 2D slices of the 3D X-ray GT reconstructed object; (d) a semitransparent rendering of the 3D GT reconstructed object

三维成像领域的潜力,相比于传统 X 射线三维成像,能够最大化地利用光强信息来提高图像质量并降低辐射剂量。

2020 年, Kim 等^[43]利用透射光栅对远紫外线(XUV)自由电子激光进行分束完成了实空间关联成像实验验证,并分析了非均匀背景、散斑大小等因素对成像质量的影响。实验装置如图 6 所示,实验

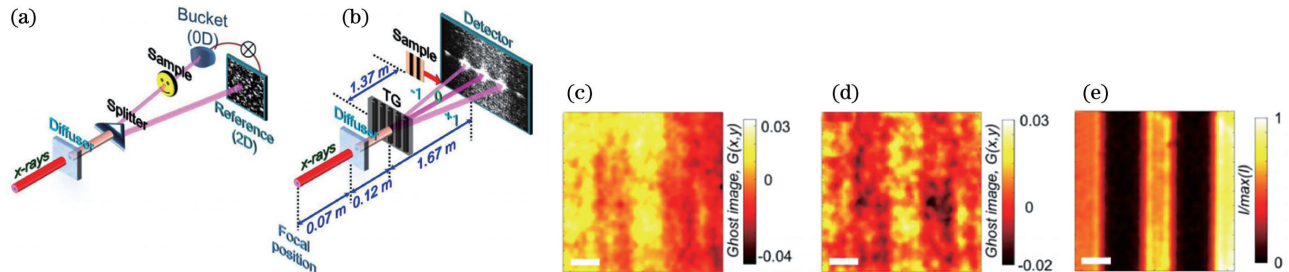


图 6 基于 FLASH 装置的关联成像原理及实验结果^[43]。(a)关联成像实验原理图;(b)基于 FLASH 装置的关联成像原理图;(c)(d)强度未归一化和归一化后的参考信号;(e)桶探测器获得的平均图像

Fig. 6 Schematic setup of ghost imaging used at FLASH and the results^[43]. (a) Conceptual layout of a ghost imaging experiment; (b) schematic setup of ghost imaging used at FLASH; (c) (d) reference signal without and with intensity normalization; (e) averaged image obtained by the bucket detector

同样在 FLASH 装置的 PG2 线站进行,能量为 92.5 eV 的射线穿过由直径约为 200 nm 的二氧化硅纳米球^[34]制成的散射屏后形成散斑场,再经过间隔为 17 μm 的透射光栅 (TG) 进行分束。所采用的样品是具有双缝结构的物体,将物体置于一级衍射光束中以获得探测信号。探测器 CCD 像素大小为 13 $\mu\text{m} \times 13 \mu\text{m}$,面阵大小为 2048 \times 2048,参考信号和探测信号均对应其中 80 \times 80 的像素区域。为了实现关联成像,该小组选择了受光束影响较小的区域,利用随机相位场方法^[44]取样 20000 次,得到了模糊的双峰结构,又通过减去背景和归一化处理进一步改善了图像质量。

2.3 纠缠源 X 射线关联成像

真实热光源 X 射线成像实验和赝热光源 X 射线成像实验均是采用经典光源实现的,而关联成像

最初是利用纠缠源实现的,也称为量子成像^[20]。量子物理的一些概念如无相互作用测量^[45]和亚散粒噪声测量^[46],为 X 射线成像技术中减少与样品相互作用、提高分辨率、避免辐射损伤^[45]提供了非常有价值的思路。2018 年, Schori 等^[47]利用参量下转换 (PDC) 得到的 X 射线光子对完成了关联成像实验。实验在 Spring-8 的 BL19LXU 线站进行,实验装置如图 7(a) 所示。该研究团队使用的泵浦光能量为 22.3 keV,使用 C(660) 产生纠缠光子对。实验中只选取了参考臂光束中能量范围为 11 eV \sim 11.5 keV 的光子,成功重构出了大小为 2 mm 和 4 mm 的狭缝图像,如图 7(b) 和图 7(c) 所示。由于较窄的带宽,探测器平均符合计数只有每小时 7 对光子对,并且背景几乎为零,这说明该方案对于低计数率的情况是可行的,同时对于各种量子光学实验具有参考价值。

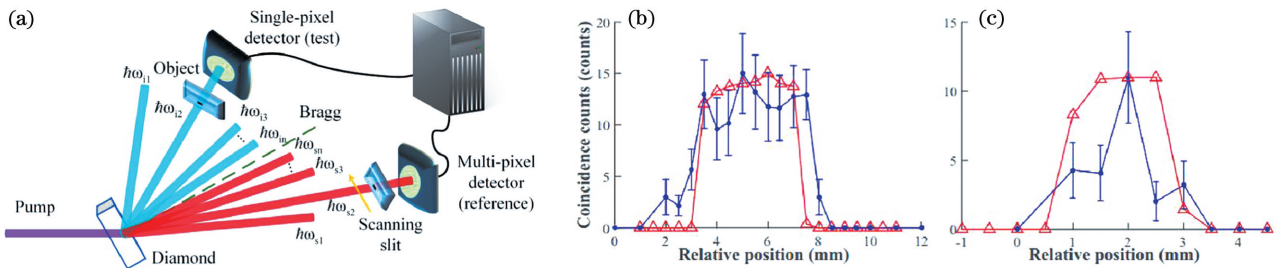


图 7 X 射线纠缠光子对强度关联成像实验装置及结果^[47]。(a) X 射线纠缠光子对强度关联成像实验装置示意图; (b)(c) 4 mm 狭缝和 2 mm 狭缝的关联成像重建图像,其中圆圈为重建图像的数据,三角为通过对物体后面的狭缝进行直接测量得到的数据

Fig. 7 Experimental setup for GI with paired X-ray entangled photons and the results^[47]. (a) Experimental setup for GI with paired X-ray entangled photons; (b)(c) ghost imaging of 4-mm and 2-mm slits, in which the circles represent the data of the reconstructed image and the triangles represent data obtained by direct measurement through a scanning slit behind the object

使用纠缠光子对进行关联成像时,图像的背底噪声较小,这一成像方式主要受限于纠缠光子对的产生效率。而真实热光源所得到的结果往往信噪比较低,图像质量较差。相比而言,赝热光源相干时间可控,并且可以进行光场调控,能够获得较好的图像质量,目前是关联成像的主要成像光源。

3 粒子关联成像研究进展

X 射线作为玻色子,可以得到高简并的相干光源,而原子、中子和电子等粒子为费米子,原则上来说高亮度的相干源难以获取,从而给费米子成像应用带来了较大的困难。但是,与 X 射线类似,这些粒子同样具有高阶涨落特性,因此利用关联成像技术有望极大地拓展费米子成像应用范围。目前,原子、中子和电子关联成像均已有关报道。

3.1 原子关联成像

2016 年, Khakimov 等^[29]实现了原子关联成像,实验原理如图 8 所示。利用超冷原子的 s 波散射^[48-49],能够产生二阶关联函数峰值远大于 2 的粒子源,与自发参量下转换 (SPDC) 类似,这种粒子源可以展示量子关联^[50]和验证贝尔不等式^[51]。然而为了能够获得对比度较高的二阶关联函数,需要在一次测量中仅探测少量的原子数,这就需要大量的数据采集时间。为了克服这一问题,采用高阶 Kapitza-Dirac 衍射^[52-54]同时产生多个不同的粒子源,实现多路同时探测,能够将数据采集速度提升 10 倍以上。实验中采用稳定状态的氦原子形成的波色-爱因斯坦凝聚 (BEC)^[55],通过 Kapitza-Dirac 衍射光束,可以将 BEC 中的原子激发到不同的动量方向。通过计算得到的二阶关联函数的峰值大约

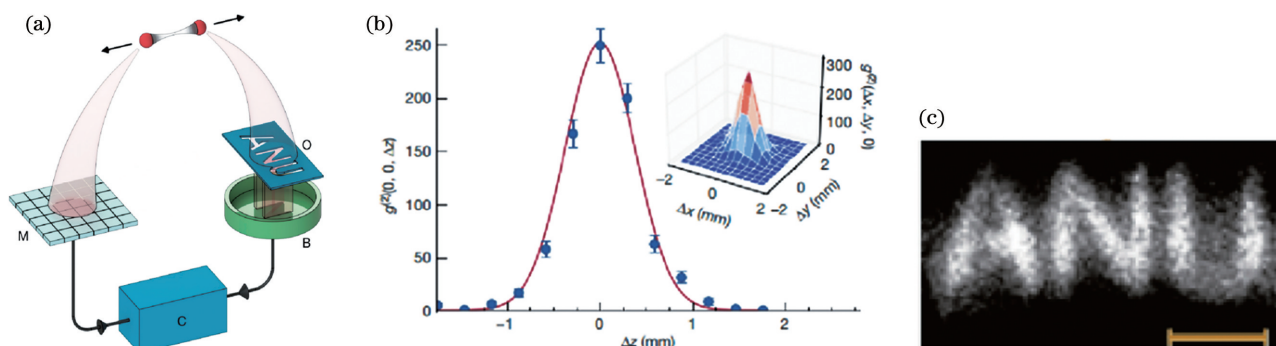


图 8 原子关联成像原理图及实验结果^[29]。(a)原子关联成像原理图;(b)二阶关联函数;(c)实验结果

Fig. 8 Schematic for atomic ghost imaging and the results^[29]. (a) Schematic for atomic ghost imaging; (b) correlation function; (c) experimental result

为 250 ($g^{(2)}(0, 0, 0) \approx 250$), 如图 8(b) 所示, z 轴方向的二阶关联函数的宽度约为 0.37 mm。实验中使用这样的粒子源进行原子关联成像, 成功恢复了线宽约为 0.75 mm 的字母“ANU”, 如图 8(c) 所示, 采样次数为 68835。

2019 年, 该研究团队又完成了更高阶的强度关联成像^[56], 实验中主要考虑了两种情况: 第一种情况探测臂只有一个原子, 此时可见度随着关联阶数的增加而提高; 第二种情况参考臂只有一个原子, 此时可见度会随着关联阶数的增加而降低。在这两种情况下, 成像分辨率均不会产生较大的变化。

3.2 中子关联成像

中子仅与原子核发生相互作用, 更容易被某些轻质材料(如氢、硼和锂等)衰减, 但对许多重质材料(如铁和铅等)具有较强的穿透性, 所以中子成像技术可以用于重金属内部含氢材料的检测等。此外, 中子对于某些不同同位素的反应截面存在较大差

异, 还可以用来分辨特定类型的不同同位素。然而, 传统中子成像能够达到的空间分辨率较低^[57]。结合关联成像的特点, 有望进一步拓展中子成像的应用范围, 降低对实验条件的严苛要求。目前, 实空间中子关联成像已经在实验上实现, 傅里叶变换中子关联成像的理论研究也已有报道^[58], 理论上能够获得波长量级的空间分辨率。

2020 年, Kingston 等^[28] 在澳大利亚核散射中心(ACNS)^[59], 采用多能的中子粒子源实现了中子关联成像, 如图 9 所示。实验中所采用的散射屏为圆筒形的结构, 由碘化后的平均直径为 1.3 mm 的氯化钠晶体颗粒构造而成。除了使用氯化钠颗粒, 使用合金粉末^[60]、沙子^[61]以及海绵也可以获得散斑场。实验中所用到的样品有两个, 一个为镉模板, 刻有 5 mm、3 mm 和 1 mm 的空洞, 另一个为分辨率板。为了提高图像质量, 实验中采用计算关联成像的方法, 通过旋转散射屏至 1716 个确定的位置,

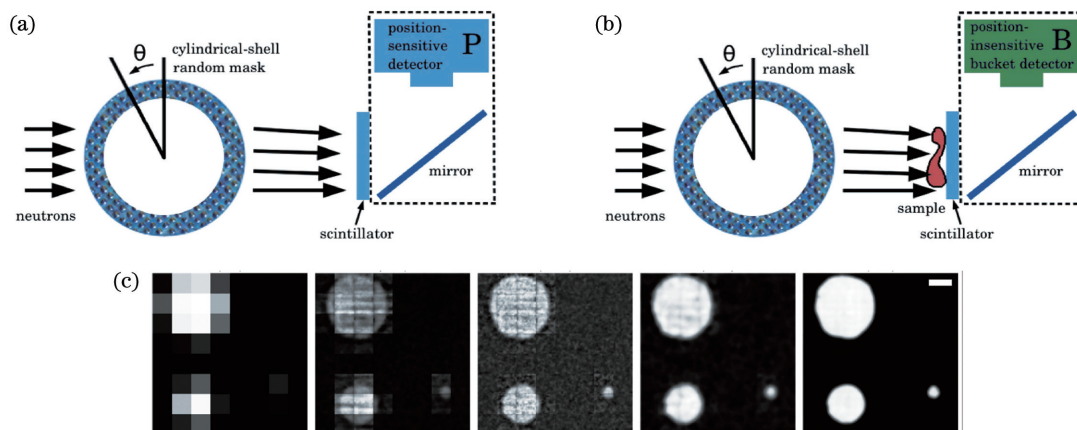


图 9 中子强度关联成像原理图及其实验结果^[28]。(a)空间随机散斑场的记录;(b)桶探测信号的记录;(c)中子强度关联成像实验结果

Fig. 9 Schematic for neutron ghost imaging and the imaging results^[28]. (a) Record of spatially random illumination patterns; (b) record of bucket signals; (c) results for neutron ghost imaging

得到参考图像,同时采用 Landweber 迭代^[62]的办法来提高重构图像的质量,如图 9(c)所示。

国内的研究小组也开展了中子关联成像技术研究^[63],其基本原理与上述实验相似,主要的不同之处在于所使用的散射屏为哈达玛调制板。考虑到中子的吸收截面与散射截面等各方面因素,实验中采用了 Gd_2O_3 粉末作为核心调制材料,在两片单晶硅上刻蚀了 1024 幅哈达玛图案,每个包含 32×32 个正方形图案,像素尺寸为 $100 \mu m$,刻蚀深度大约为 $300 \mu m$ 。该实验在中国散裂中子源 20 号束线上进行,实验中样品的空间分辨率约为 $100 \mu m$,同时当中子流强度低至每次采样计数为 1000(弱计数情况)时,仍然能够获得较好的实验结果,如图 10 所示。图像重构过程包括对涨落信号进行归一化,通过计算二阶关联得到物体的初步图像,再进一步利用卷积神经网络(CNN)进行图像增强。

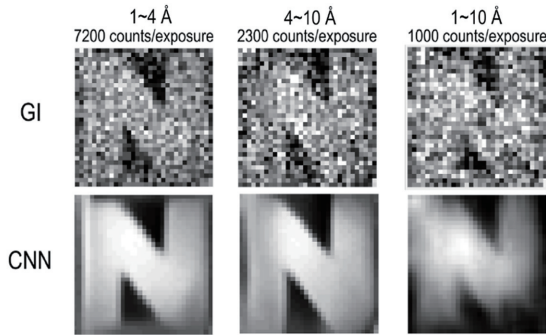


图 10 中子鬼成像实验结果及 CNN 的重建结果^[63]
Fig. 10 Experimental results of neutron ghost imaging and reconstruction results after CNN^[63]

传统中子成像通常采用面阵探测器,为了提高探测灵敏度,需要增加敏感层的厚度,使探测器的空间分辨率降低。而中子关联成像解耦了探测和成像过程,可以采用单像素探测器接收信号,能够提高系统探测灵敏度,改善探测信噪比,同时并不影响系统的空间分辨率。中子关联成像由于其独特的优势,有望推动整个中子成像学科领域的发展,并在生物和材料科学研究领域发挥重要作用。

3.3 电子关联成像

电子同样可以作为成像的载体,在科学研究中发挥作用,基于电子与物质相互作用的电子显微镜在病理分析、肿瘤诊断等生物医学领域具有十分重要的应用价值^[64]。2018 年, Li 等^[30]实现了电子强度关联成像,从而为电子成像开辟了新的道路。

实验在加利福尼亚大学洛杉矶分校(UCLA)的 Pegasus 线站^[15]进行。实验光路如图 11 所示。使

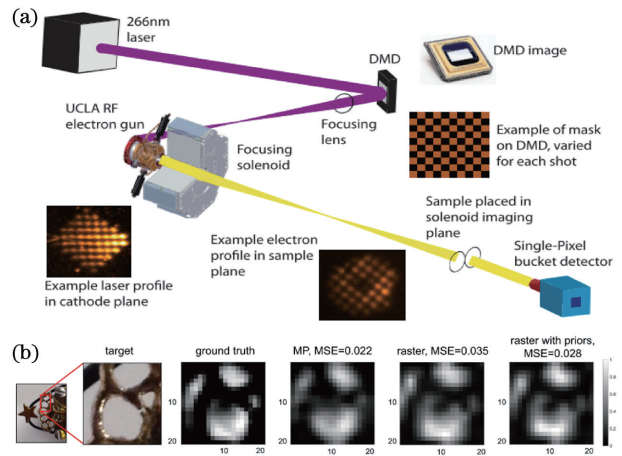


图 11 电子强度关联成像实验光路图及其实验结果^[30]。

(a) 电子强度关联成像实验光路图; (b) 实验结果

Fig. 11 Light path diagram of the electron ghost imaging experiment and the results^[30] .

(a) Light path diagram of the electron ghost imaging experiment; (b) experimental results

用波长为 266 nm 的紫外激光照射 TI DLP-7000 DMD^[65],在数字微反射镜(DMD)上对光场进行调制,通过一个聚焦透镜将调制后的紫外光聚焦到阴极从而产生了高亮度的电子束(3.2 MeV)^[66],电子束通过物体后被桶探测器接收。实验中采用了 DMD 对光场进行调制,是一种计算关联成像的方法,结合压缩感知算法,可以缩短采集时间,降低辐射损伤。重构过程中采用交替方向乘法(ADMM)^[67]。从原理上讲,关联成像这一方法可以拓展到所有激光驱动的粒子成像中,如激光等离子体源^[68]、冷电子和离子源^[69-70]等。

4 结束语

关联成像技术由于其独特的性质为 X 射线及粒子成像带来了新的生机,主要介绍了基于热光源、赝热光源和纠缠光源的 X 射线关联成像技术,以及利用原子、中子、电子等费米子实现关联成像的相关研究进展。目前,实现 X 射线及粒子关联成像技术的实际应用还存在一些需要解决的问题,如辐射场的精准调控,探测器的性能提升,以及高质量、高可靠性的图像重建等。

关联成像与传统的成像不同,是一种所见非所得的成像方式,由探测器记录到的光场涨落来获取物体信息。如何产生稳定可控的光场涨落是一个十分关键的问题。主要分为两种方式,一是随机涨落,二是编码光场。早期的关联成像理论^[25]中采用的是真实的热光场,属于随机涨落,其光场复振幅分布

满足零均值圆复高斯分布^[71]。在实际成像过程中,真实热光场的相干时间往往非常短,远小于现有探测器的响应时间。为了能够记录下光场涨落,又发展出了赝热光源^[72-73]。在可见光波段,通常采用激光照射旋转的毛玻璃来产生相干时间可控的赝热光源^[74],获取随机散斑场。在 X 射线及粒子成像中,赝热光源的产生则相对较为困难。例如,文献[34]采用的是直径为 200 nm 的二氧化硅颗粒,文献[27]采用的是金膜加工的二值孔屏^[75],其制备工艺流程均较为复杂。与此同时,近年来随着压缩感知技术^[76]的发展,计算关联成像发展迅速^[77]。在可见光波段,已经将傅里叶编码^[78-79]、哈达玛编码^[80]等编码方式引入到关联成像中。相比于随机散斑场,编码散斑场具有更高的可控性,能够降低采样时间和提高图像质量。在台式 X 射线关联成像^[40]以及中子关联成像^[63]中,已经引入了哈达玛编码,但编码调制精度受限于器件工艺水平,成像分辨率还有待进一步提高。此外,利用关联成像闲置的参考光路可以实现样品的非局域编码^[81],从而在不增加样品辐射剂量的前提下获取更多的样品信息,目前这种编码调制方式还未能在 X 射线及粒子成像中实际应用。

探测系统的性能提升对于 X 射线及粒子关联成像同样重要。在传统 X 射线及中子成像中,由于 X 射线和中子的穿透性,探测效率的提升需通过增加探测敏感层的厚度来实现,而这往往会导致面阵探测空间分辨率降低。关联成像技术采用单像素探测器收集样品信息,仅利用单像素探测就能对强度、极化(偏振)及动量方向等多个参量进行解耦,实现多参量成像,有望在不损失空间分辨率的前提下提高信噪比。但这种单像素探测的成像方式,对探测器的响应范围提出了更高的要求,单光子及单粒子探测技术将是未来高精度探测的重要技术手段。

图像重构技术也是关联成像的一个重要发展方向。从传统的关联运算到压缩感知重构^[82-83],再到深度学习重构^[84-86],关联成像的采样要求不断降低,重构图像质量也在逐步提高。关联重构通过关联运算来得到图像,在采样较少的情况下图像质量较差。在压缩感知重构中,利用散斑场的随机特性和信号的稀疏性,可以在较少的测量次数下获取物体图像,但是这类方法需要进行感知方程求解,重构速度较慢。深度学习图像重构利用神经网络强大的表达能力来提升成像质量^[40,85,87-88],通常要求训练过程和测试过程的照明光场保持一致,但在 X 射线及粒子

成像实验中,照明光场的精确预置较为困难。同时,以实际样品获取网络训练数据的代价高昂。文献[89]提出动态散斑场照明下的端对端深度学习重构方法,采用模拟数据训练网络,学习散斑场的统计特性,在训练集与测试集散斑场输入不一致的情况下依然可以得到较好的图像。未来随着 X 射线及粒子关联成像技术的发展,成像质量进一步提高,X 射线及粒子关联成像技术有望在多学科领域广泛应用。

参 考 文 献

- [1] Yuan Q X, Deng B, Guan Y, et al. Novel developments and applications of nanoscale synchrotron radiation microscopy[J]. *Physics*, 2019, 48(4): 205-218.
袁清习, 邓彪, 关勇, 等. 同步辐射纳米成像技术的发展与应用[J]. *物理*, 2019, 48(4): 205-218.
- [2] Röntgen W C. On a new kind of rays[J]. *Science*, 1896, 3(59): 227-231.
- [3] Davis T J, Gao D, Gureyev T E, et al. Phase-contrast imaging of weakly absorbing materials using hard X-rays[J]. *Nature*, 1995, 373(6515): 595-598.
- [4] Endrizzi M. X-ray phase-contrast imaging [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2018, 878: 88-98.
- [5] Takeda T. Phase-contrast and fluorescent X-ray imaging for biomedical researches [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2005, 548(1/2): 38-46.
- [6] Mancuso A P, Yefanov O M, Vartanyants I A. Coherent diffractive imaging of biological samples at synchrotron and free electron laser facilities [J]. *Journal of Biotechnology*, 2010, 149(4): 229-237.
- [7] Jiang H D. Cryo-coherent diffractive imaging of biological samples with X-ray free-electron lasers[J]. *Acta Crystallographica. Section A, Foundations and Advances*, 2016, 72(Pt 2): 177-178.
- [8] Nishino Y, Takahashi Y, Imamoto N, et al. Three-dimensional visualization of a human chromosome using coherent X-ray diffraction[J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102: 018101.
- [9] Fan J D, Jiang H D. Coherent X-ray diffraction imaging and its applications in materials science and biology [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(21): 218702.
范家东, 江怀东. 相干 X 射线衍射成像技术及在材

- 科学和生物学中的应用[J]. 物理学报, 2012, 61(21): 218702.
- [10] Bilheux H Z, McGreevy R, Anderson I S. Neutron imaging and applications [M]. Boston: Springer, 2009.
- [11] Siegel J B, Lin X F, Stefanopoulou A G, et al. Neutron imaging of lithium concentration in LFP pouch cell battery[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2011, 158(5): A523.
- [12] Grünzweig C, David C, Bunk O, et al. Neutron decoherence imaging for visualizing bulk magnetic domain structures [J]. Physical Review Letters, 2008, 101(2): 025504.
- [13] Kardjilov N, Manke I, Woracek R, et al. Advances in neutron imaging[J]. Materials Today, 2018, 21(6): 652-672.
- [14] Woracek R, Santisteban J, Fedrigo A, et al. Diffraction in neutron imaging: a review[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2018, 878: 141-158.
- [15] Haguenau F, Hawkes P W, Hutchison J L, et al. Key events in the history of electron microscopy[J]. Microscopy and Microanalysis, 2003, 9(2): 96-138.
- [16] Twiss R Q, Brown R H. The question of correlation between photons in coherent beams of light [J]. Nature, 1957, 179(4570): 1128-1129.
- [17] Brown R H, Twiss R Q. A test of a new type of stellar interferometer on Sirius [J]. Nature, 1956, 178(4541): 1046-1048.
- [18] Glauber R J. The quantum theory of optical coherence[J]. Physical Review, 1963, 130(6): 2529-2539.
- [19] Glauber R J. Coherent and incoherent states of the radiation field[J]. Physical Review, 1963, 131(6): 2766-2788.
- [20] Pittman T B, Shih Y H, Strekalov D V, et al. Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement[J]. Physical Review A, 1995, 52(5): R3429-R3432.
- [21] Shih Y. The physics of ghost imaging: nonlocal interference or local intensity fluctuation correlation? [J]. Quantum Information Processing, 2012, 11(4): 995-1001.
- [22] Strekalov D V, Sergienko A V, Klyshko D N, et al. Observation of two-photon "ghost" interference and diffraction[J]. Physical Review Letters, 1995, 74(18): 3600-3603.
- [23] Gatti A, Brambilla E, Bache M, et al. Ghost imaging with thermal light: comparing entanglement and classical correlation[J]. Physical Review Letters, 2004, 93(9): 093602.
- [24] Gong W L, Han S S. Phase-retrieval ghost imaging of complex-valued objects [J]. Physical Review A, 2010, 82(2): 023828.
- [25] Cheng J, Han S S. Incoherent coincidence imaging and its applicability in X-ray diffraction[J]. Physical Review Letters, 2004, 92(9): 093903.
- [26] Pelliccia D, Rack A, Scheel M, et al. Experimental X-ray ghost imaging [J]. Physical Review Letters, 2016, 117(11): 113902.
- [27] Yu H, Lu R H, Han S S, et al. Fourier-transform ghost imaging with hard X-rays[J]. Physical Review Letters, 2016, 117(11): 113901.
- [28] Kingston A M, Myers G R, Pelliccia D, et al. Neutron ghost imaging [J]. Physical Review A, 2020, 101(5): 053844.
- [29] Khakimov R I, Henson B M, Shin D K, et al. Ghost imaging with atoms[J]. Nature, 2016, 540(7631): 100-103.
- [30] Li S, Cropp F, Kabra K, et al. Electron ghost imaging [J]. Physical Review Letters, 2018, 121(11): 114801.
- [31] Bonse U, Hart M. An X-ray interferometer [J]. Applied Physics Letters, 1965, 6(8): 155-156.
- [32] Liu H L, Shen X, Zhu D M, et al. Fourier-transform ghost imaging with pure far-field correlated thermal light[J]. Physical Review A, 2007, 76(5): 053808.
- [33] Wang H, Han S S. Coherent ghost imaging based on sparsity constraint without phase-sensitive detection [J]. Europhysics Letters, 2012, 98(2): 24003.
- [34] Schneider R, Mehringer T, Mercurio G, et al. Quantum imaging with incoherently scattered light from a free-electron laser[J]. Nature Physics, 2018, 14(2): 126-129.
- [35] Oppel S, Büttner T, Kok P, et al. Superresolving multiphoton interferences with independent light sources [J]. Physical Review Letters, 2012, 109(23): 233603.
- [36] Classen A, Waldmann F, Giebel S, et al. Superresolving imaging of arbitrary one-dimensional arrays of thermal light sources using multiphoton interference[J]. Physical Review Letters, 2016, 117(25): 253601.
- [37] Thiel C, Bastin T, Martin J, et al. Quantum imaging with incoherent photons [J]. Physical Review Letters, 2007, 99(13): 133603.
- [38] Zhang A X, He Y H, Wu L G, et al. Tabletop X-ray ghost imaging with ultra-low radiation[J]. Optica, 2018, 5(4): 374-377.
- [39] Maddox B R, Park H S, Remington B A, et al.

- High-energy X-ray backlighter spectrum measurements using calibrated image plates [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2011, 82 (2): 023111.
- [40] He Y H, Zhang A X, Li M F, et al. High-resolution sub-sampling incoherent X-ray imaging with a single-pixel detector [J]. *APL Photonics*, 2020, 5 (5): 056102.
- [41] Kingston A M, Pelliccia D, Rack A, et al. Ghost tomography[J]. *Optica*, 2018, 5(12): 1516-1520.
- [42] Kingston A M, Myers G R, Pelliccia D, et al. X-ray ghost-tomography: artefacts, dose distribution, and mask considerations[J]. *IEEE Transactions on Computational Imaging*, 2019, 5(1): 136-149.
- [43] Kim Y Y, Gelisio L, Mercurio G, et al. Ghost imaging at an XUV free-electron laser[J]. *Physical Review A*, 2020, 101: 013820.
- [44] Pfeifer T, Jiang Y H, Dusterer S, et al. Partial-coherence method to model experimental free-electron laser pulse statistics[J]. *Optics Letters*, 2010, 35 (20): 3441-3443.
- [45] Lemos G B, Borish V, Cole G D, et al. Quantum imaging with undetected photons[J]. *Nature*, 2014, 512(7515): 409-412.
- [46] Brida G, Genovese M, Berchera I R. Experimental realization of sub-shot-noise quantum imaging [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(4): 227-230.
- [47] Schori A, Borodin D, Tamasaku K, et al. Ghost imaging with paired X-ray photons [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics, May 13-18, 2018, San Jose, California. Washington, D. C.: OSA, 2018: JTh2A.7.
- [48] Jaskula J C, Bonneau M, Partridge G B, et al. Sub-Poissonian number differences in four-wave mixing of matter waves [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105(19): 190402.
- [49] Perrin A, Chang H, Krachmalnicoff V, et al. Observation of atom pairs in spontaneous four-wave mixing of two colliding Bose-Einstein condensates [J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99 (15): 150405.
- [50] Lewis-Swan R J. Proposal for demonstrating the Hong-Ou-Mandel effect with matter waves [M] // Lewis-Swan R J. *Ultracold atoms for foundational tests of quantum mechanics*. Cham: Springer, 2016: 45-55.
- [51] Lewis-Swan R J, Kheruntsyan K V. Proposal for a motional-state Bell inequality test with ultracold atoms [J]. *Physical Review A*, 2015, 91 (5): 052114.
- [52] Kapitza P L, Dirac P A M. The reflection of electrons from standing light waves[J]. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 1933, 29(2): 297-300.
- [53] Ovchinnikov Y B, Müller J H, Doery M R, et al. Diffraction of a released Bose-Einstein condensate by a pulsed standing light wave [J]. *Physical Review Letters*, 1999, 83(2): 284-287.
- [54] Gould P L, Ruff G A, Pritchard D E. Diffraction of atoms by light: the near-resonant Kapitza-Dirac effect[J]. *Physical Review Letters*, 1986, 56 (8): 827-830.
- [55] Vassen W, Cohen-Tannoudji C, Leduc M, et al. Cold and trapped metastable noble gases[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2012, 84(1): 175-210.
- [56] Hodgman S S, Bu W, Mann S B, et al. Higher-order quantum ghost imaging with ultracold atoms [J]. *Physical Review Letters*, 2019, 122(23): 233601.
- [57] Trtik P, Hovind J, Grünzweig C, et al. Improving the spatial resolution of neutron imaging at Paul Scherrer Institut: the neutron microscope project[J]. *Physics Procedia*, 2015, 69: 169-176.
- [58] Chen K, Han S S. Microscopy for atomic and magnetic structures based on thermal neutron Fourier-transform ghost imaging [EB/OL]. (2018-01-29) [2021-03-01]. <https://arxiv.org/abs/1801.10046v1>.
- [59] Garbe U, Ahuja Y, Ibrahim R, et al. Industrial application experiments on the neutron imaging instrument DINGO[J]. *Physics Procedia*, 2017, 88: 13-18.
- [60] Song G, Lin J, Bilheux J C, et al. Characterization of crystallographic structures using Bragg-edge neutron imaging at the spallation neutron source[J]. *Journal of Imaging*, 2017, 3(4): 65.
- [61] Kim F H, Penumadu D, Gregor J, et al. High-resolution neutron and X-ray imaging of granular materials[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, 139(5): 715-723.
- [62] Landweber L. An iteration formula for fredholm integral equations of the first kind [J]. *American Journal of Mathematics*, 1951, 73(3): 615-624.
- [63] He Y H, Huang Y Y, Zeng Z R, et al. Single-pixel imaging with neutrons[J]. *Science Bulletin*, 2021, 66 (2): 133-138.
- [64] Santoro F, Zhao W T, Joubert L M, et al. Revealing the cell-material interface with nanometer resolution by focused ion beam/scanning electron microscopy [J]. *ACS Nano*, 2017, 11(8): 8320-8328.
- [65] Li S, Alverson S, Bohler D, et al. Ultraviolet laser transverse profile shaping for improving X-ray free

- electron laser performance [J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2017, 20(8): 080704.
- [66] Alesini D, Battisti A, Ferrario M, et al. New technology based on clamping for high gradient radio frequency photogun [J]. *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams*, 2015, 18 (9): 092001.
- [67] Boyd S, Parikh N, Chu E, et al. Distributed optimization and statistical learning via the alternating direction method of multipliers [J]. *Foundations and Trends[®] in Machine Learning*, 2011, 3(1): 1-122.
- [68] Faure J, Rechatin C, Norlin A, et al. Controlled injection and acceleration of electrons in plasma wakefields by colliding laser pulses [J]. *Nature*, 2006, 444(7120): 737-739.
- [69] McCulloch A J, Sheludko D V, Saliba S D, et al. Arbitrarily shaped high-coherence electron bunches from cold atoms [J]. *Nature Physics*, 2011, 7(10): 785-788.
- [70] Reijnders M P, van Kruisbergen P A, Taban G, et al. Low-energy-spread ion bunches from a trapped atomic gas [J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102 (3): 034802.
- [71] Goodman J W. *Statistical optics* [M]. New York: John Wiley & Sons, 2015.
- [72] Tian N, Guo Q, Wang A, et al. Fluorescence ghost imaging with pseudothermal light [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(16): 3302-3304.
- [73] Martienssen W, Spiller E. Coherence and fluctuations in light beams [J]. *American Journal of Physics*, 1964, 32(12): 919-926.
- [74] Zhang M H, Wei Q, Shen X, et al. Lensless Fourier-transform ghost imaging with classical incoherent light [J]. *Physical Review A*, 2007, 75 (2): 021803.
- [75] Zhao X, Yu H, Lu R H, et al. Research on pseudothermal source of X-ray Fourier-transform ghost imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37 (5): 0511001.
赵鑫, 喻虹, 陆荣华, 等. X 光傅里叶变换关联成像赝热光源研究 [J]. *光学学报*, 2017, 37 (5): 0511001.
- [76] Candes E J, Wakin M B. An introduction to compressive sampling [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, 25(2): 21-30.
- [77] Shapiro J H. Computational ghost imaging [J]. *Physical Review A*, 2008, 78(6): 061802.
- [78] Zhang Z, Ma X, Zhong J. Single-pixel imaging by means of Fourier spectrum acquisition [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 6225.
- [79] Khamoushi S M, Nosrati Y, Tavassoli S H. Sinusoidal ghost imaging [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(15): 3452-3455.
- [80] Lane T J, Ratner D. What are the advantages of ghost imaging? Multiplexing for X-ray and electron imaging [J]. *Optics Express*, 2020, 28 (5): 5898-5918.
- [81] Tan Z, Yu H, Lu R, et al. Non-locally coded Fourier-transform ghost imaging [J]. *Optics Express*, 2019, 27(3): 2937-2948.
- [82] Katz O, Bromberg Y, Silberberg Y. Compressive ghost imaging [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95 (13): 131110.
- [83] Zhu R G, Yu H, Lu R H, et al. Spatial multiplexing reconstruction for Fourier-transform ghost imaging via sparsity constraints [J]. *Optics Express*, 2018, 26(3): 2181-2190.
- [84] Liu P J, Zhang H Z, Zhang K, et al. Multi-level wavelet-CNN for image restoration [C]//2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), June 18-22, 2018, Salt Lake City, UT, USA. New York: IEEE Press, 2018: 886.
- [85] Lyu M, Wang W, Wang H, et al. Deep-learning-based ghost imaging [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7 (1): 17865.
- [86] Sinha A, Lee J, Li S, et al. Lensless computational imaging through deep learning [J]. *Optica*, 2017, 4 (9): 1117-1125.
- [87] Shimobaba T, Endo Y, Nishitsuji T, et al. Computational ghost imaging using deep learning [J]. *Optics Communications*, 2018, 413: 147-151.
- [88] Wang F, Wang H, Wang H C, et al. Learning from simulation: an end-to-end deep-learning approach for computational ghost imaging [J]. *Optics Express*, 2019, 27(18): 25560-25572.
- [89] Zhu R G, Yu H, Tan Z J, et al. Ghost imaging based on Y-Net: a dynamic coding and decoding approach [J]. *Optics Express*, 2020, 28(12): 17556-17569.