

# 高能涡旋粒子的产生与碰撞：进展、前景及挑战

郭任彤<sup>1</sup>, 马木提江·阿巴拜克热<sup>1</sup>, 卢知为<sup>1</sup>, 徐忠锋<sup>1</sup>, 栗建兴<sup>1,2,\*</sup>

(1. 西安交通大学 物理学院, 陕西 西安 710049; 2. 中国原子能科学研究院 核物理研究所, 北京 102413)

**摘要:** 光子、电子及其他粒子的涡旋(扭曲)态指这些粒子相应的波函数呈螺旋状波前的非平面波解。这些涡旋态在沿着平均传播方向上携带内禀轨道角动量, 这一特性使得它们的波函数具有螺旋形的相位结构, 类似于漩涡状的水流或旋转的陀螺。涡旋粒子因其独特的性质而备受瞩目, 诸如拓扑荷数、横向动量分布以及相位奇点的存在, 为多个科学分支如成像与通信、超材料、光谱分析、原子与核结构、粒子与强子物理乃至天体物理学等, 开启了崭新的探索维度。本文旨在精炼概述各类涡旋粒子产生的实验技术和相应的探测手段, 深入分析它们在各类相互作用中的影响, 如角动量转移、拓展选择定则、调节原子的线性运动、调制微分截面与能量耗散率及光子偏振的转变, 特别是在优化核反应机制、推动粒子加速器技术创新、研究强子内部结构与解析中子星深层构造等方面, 凸显其不可小觑的科学价值与应用潜力。

**关键词:** 涡旋态粒子; 轨道角动量; 拓扑荷

中图分类号: TL11; O571

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2024)06-1169-32

doi: 10.7538/yzk.2024.youxian.0425

## Generation and Collision of High-energy Vortex Particles: Advances, Prospects and Challenges

GUO Rentong<sup>1</sup>, MAMUTJAN Ababekri<sup>1</sup>, LU Zhiwei<sup>1</sup>, XU Zhongfeng<sup>1</sup>, LI Jianxing<sup>1,2,\*</sup>

(1. School of Physics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Department of Nuclear Physics, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

**Abstract:** Vortex states of photons, electrons, and other particles are non-plane-wave solutions of the corresponding wave equation with helicoidal wave fronts. These vortex states carry intrinsic orbital angular momentum along their mean propagation direction, endowing their wave functions with a spiral phase structure akin to whirlpool-like water flows or spinning tops. The distinctive properties of vortex particles, such as their topological charge, transverse momentum distribution, and the presence of phase singularities, have garnered significant attention across various scientific disciplines, including imaging and communication, metamaterials, spectroscopy, atomic and nuclear structure, particle and hadron physics, and even astrophysics, unlocking new dimensions of exploration. This article aims to succinctly outline the experimental techniques for generating various vortex particles and the corresponding detection methods, while delving into their impacts in diverse interactions, including angular momentum transfer, extension of selection rules, modulation of atomic linear motion,

收稿日期: 2024-05-15; 修回日期: 2024-06-05

基金项目: 国家自然科学基金(12022506, U2267204); 中国科学院等离子体物理研究所基础科学与技术基金会(CKYS2021212008); 陕西数理基础科学研究项目(22JSY014); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2024JC-YBQN-0042)

\* 通信作者: 栗建兴

adjustment of differential cross-sections and energy dissipation rates, as well as transformations of photon polarization. Particular emphasis was placed on highlighting their invaluable scientific contributions and application potential, especially in optimizing nuclear reaction mechanisms, propelling innovations in particle accelerator technology, investigating the internal structure of hadrons, and unraveling the deep architecture of neutron stars.

**Key words:** vortex state particles; orbital angular momentum; topological charge

Poynting<sup>[1]</sup>于1909年提出电磁波可能携带自旋角动量 (spin angular momentum, SAM), 线偏振和圆偏振光束可用 SAM 描述, 单个圆偏振光子 SAM 的投影只有 $\pm 1$ 两个值, 代表左旋或右旋。轨道角动量 (orbital angular momentum, OAM) 则是电磁波或粒子波函数的另一种角动量形式, 它体现在波函数的螺旋相位结构上, 即复相位因子  $e^{i(l\phi)}$ , 其中  $l$  被称为拓扑荷或 OAM 量子数, 理论上可取任意整数值, 反映了波前沿传播方向形成的螺旋波结构的圈数, 以及螺旋的方向 (顺时针或逆时针)。光的偏振依赖于 SAM, 横向结构依赖于 OAM。与传统的高斯光束不同, 涡旋光束在中心表现出相位奇点, 这导致了甜甜圈形状的程度分布。波动方程的普适性表明, 奇异光学和光角动量的基本结果应该同样适用于电子<sup>[2]</sup>, 其他非基本粒子的涡旋态也被广泛研究<sup>[3]</sup>。涡旋粒子带来的额外自由度, 作为一种崭新且极具价值的研究工具, 正在被广泛应用至成像通信、超材料、光谱学、原子结构、核物理、粒子物理、强子物理、天体物理等各分支领域。

波动方程在笛卡尔坐标系的解是平面波, 在柱坐标系中是柱面波或贝塞尔波。柱面波不同于平面波, 因为它在运动方向有非零的 OAM 投影, 被称为涡旋(扭曲)态。这两个解均是完整的函数系统, 任何一个函数均可用另一个的叠加来表示, 如柱面波可表示为平面波的叠加, 形成柱面波的平面波的波矢量位于圆锥体的表面, 圆锥体的轴与  $z$  轴对齐, 圆锥体张角的正切值是横向动量和纵向动量比值。张角很小时便对应傍轴近似的情况, 当达到张角为零的极限时, 柱面波退回到平面波。贝塞尔波是一个非常简单和方便的理论结构, 可给出一些基本的结论和预测。由于贝塞尔函数在横向平面的非局域化和非归一化, 可使用具有相同能量但不同横向动量的贝塞尔叠加形式来表征。或利用傍轴近似得到简化的波动方

程, 其柱坐标下的解是拉盖尔-高斯 (Laguerre-Gaussian, LG) 模式<sup>[4-5]</sup>, 它被广泛应用在真实的激光物理中。

本文将首先阐述涡旋光子的产生技术及探测手段, 其次聚焦涡旋电子的产生、探测技术, 再拓展至其他涡旋粒子(中子、原子、分子)的产生策略, 然后探讨高能涡旋粒子生成的最新研究动态, 最后分析涡旋粒子在各类相互作用过程中的角色与机制。涡旋粒子与原子分子相互作用会产生角动量转移, 拓宽选择定则, 通过光谱变化揭示原子、分子内部构造。此外, 涡旋粒子能生成具有 OAM 纠缠的量子态, 为光子-原子量子纠缠及信息编码开辟路径, 并能调控原子集体行为, 如形成涡旋态玻色-爱因斯坦凝聚 (Bose-Einstein condensation, BEC), 为量子流体研究创造条件。涡旋粒子与原子核的相互作用能高效影响核旋转状态, 调整裂变或聚变反应概率及产物分布, 触发核内粒子(如质子、中子或其他重离子)发射, 提取特定多极共振, 对理解核稳定性和衰变机制、揭示核子相互作用强度和壳层结构乃至探索新核素具有深刻意义。在极端环境, 如中子星内部, 涡旋中子与密集核物质的相互作用, 对于揭示这些极端天体的热力学行为、振动特性至关重要, 加深对宇宙基本物理过程的理解<sup>[3-6]</sup>。

## 1 涡旋光子

1990年代初, 人们首次认识到涡旋光束具有意想不到的特性<sup>[7-9]</sup>, 并逐步渗透进诸多前沿科技领域, 如光子集成电路<sup>[10-11]</sup>、微环谐振器<sup>[12]</sup>、超材料<sup>[13]</sup>、等离子体纳米结构<sup>[14-15]</sup>和超表面<sup>[16]</sup>中。在过去的30多年中, 使用基于传统激光技术的多种方法生成了近红外和可见光状态下的涡旋光束<sup>[17-20]</sup>。它作为一种良好的非侵入式光学操作工具展现出巨大的潜力<sup>[21-23]</sup>; 从光学镊子中的生物细胞处理<sup>[24-26]</sup>, 到激光冷却、原子捕获和控制 BEC<sup>[27-30]</sup>

以及量子信息和量子通信<sup>[31-34]</sup>。此外, 涡旋光束也可激发原子中的禁止跃迁<sup>[35-37]</sup>, 克服了与平面波光子相关的跃迁选择规则。作用于原子质心的涡旋光子可产生光致扭矩<sup>[38]</sup>, 导致旋转运动, 而原子受多个涡旋光子的影响, 会揭示出有趣的模式, 包括  $\mu\text{m}$  大小的中性或带电电流环路的产生<sup>[39-40]</sup>。涡旋光束的魅力并未止步于此, 其在极紫外 (extreme ultraviolet, EUV) 至伽马射线更短波长范围内的探索为科学研究开启了全新的机遇。EUV 和 X 射线范围的涡旋光束可用于提高显微镜的对比度<sup>[41]</sup>, 实现新形式的光谱学<sup>[42]</sup>, 改变材料的磁性<sup>[43-44]</sup>、生物材料中的手性<sup>[45]</sup> 以及由于强二色性而导致的材料中的四极性转变<sup>[46]</sup>。涡旋伽马射线可能为光核物理研究开辟新的可能性。从理论上讲它们已被证明可改变光核反应速率<sup>[47]</sup>, 揭示新自旋效应<sup>[48-49]</sup>, 提供分离不同自旋和对偶共振的手段<sup>[50]</sup>, 并使光核反应中的新型多极分析成为可能<sup>[51]</sup>。涡旋伽马射线可能是在极端天体物理环境中产生的<sup>[52-54]</sup>, 其波函数的量子涡旋性质导致了在实验室和天体物理环境中均可观察到“超级踢”(superkick) 效应<sup>[55]</sup>, 有助于揭示宇宙中极端天体的性质。

### 1.1 涡旋光子的产生方法

在过去的数十年间, 随着科学技术的不断进步与发展, 针对涡旋光束的生成技术展开了多样化的探索与实践, 旨在满足日益增长的新兴应用需求。这一过程中, 不仅设计了能在自由空间中

利用空间光调制器、螺旋相位板 (spiral phase plate, SPP)、计算全息术等多种空间产生装置来创造涡旋光束, 且开发了在光纤内利用特殊的光纤器件、微结构光纤或螺旋光纤布拉格光栅等技术来实现<sup>[56]</sup>, 还提出了利用非线性光学的高次谐波产生<sup>[57-61]</sup>。与此同时, 涡旋光束的拓扑荷数也得到了显著提升。现今的技术已能生成拓扑荷数高达 10 010 的涡旋光子<sup>[62]</sup>。这一成就无疑极大地扩展了涡旋光束在量子信息处理、超高密度光存储、超精密光学操控以及其他高级光子学应用领域的潜力。

**1.1.1 空间产生方法** 空间产生方法是通过精密设计并操控光场的空间相位分布来实现复杂的光束结构<sup>[63]</sup>。在平面波通过具有特殊表面结构的空器件时, 这些元件能在其传播路径上施加特定的相位分布, 即在电场分布上塑造出预设的相位轮廓, 产生的光束具有螺旋相位结构。当磁场作用于由磁光材料制成的光学器件时, 能调控光波通过介质时的折射率分布, 进而间接改变光场的空间相位分布<sup>[64-65]</sup>。这些器件包括但不限于圆柱透镜<sup>[66-70]</sup>、SPP<sup>[71-78]</sup>、相位全息图<sup>[79-82]</sup>、空间光调制器<sup>[83-87]</sup> 和 Q-板<sup>[88]</sup> 等。这些方法也存在一些缺点, 如空间器件需较大的体积空间, 入射平面波转换为 OAM 光束的界面处的高折射率差导致的高插入损耗, 每次产生的 OAM 光束数量有限, 以及由于为所需的 OAM 数制造新材料而导致的光学材料制造成本高等。表 1 为几种方法的比较<sup>[56]</sup>。

表 1 OAM 空间生成技术的比较<sup>[56]</sup>

Table 1 Comparison of spatial generation techniques of OAM<sup>[56]</sup>

技术特性	不同空间生成技术特性比较					
	圆柱透镜	SPP	相位全息图	空间光调制器	Q-板	超材料
成本	一般	低	低	高	高	低
OAM 生成模式	单一	单一	单一	单一/多个	单一	单一
灵活性	低	低	低	高	高	低
传输距离	短	短	短	短	短	短
能否承受高功率	是	是	否	否	是	否
加工难度	低	低	高	高	低	高

在针对微型化应用的涡旋光束生成技术中, 至关重要是采用紧凑型元件以有效产生光学涡旋光束。超表面技术为此提供了一种解决方案, 它是一种高度集成的二维光栅结构, 由一系列人

工设计的纳米级元单元(元原子)周期性或非周期性排列在极薄的衬底上, 能精确调控通过光的相位、振幅乃至偏振状态。这些超表面可采用多样化的材料体系构建, 如等离子体纳米结构或介电

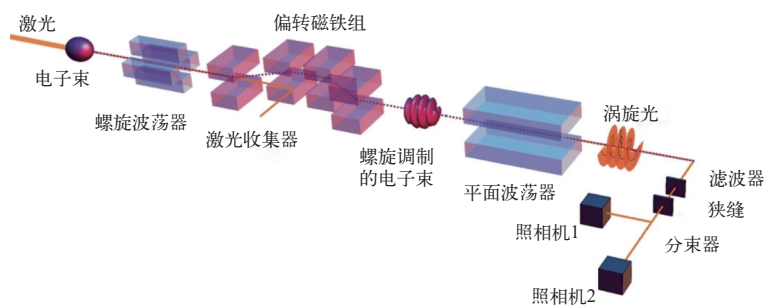
共振纳米结构,它们能在纳米级别上高效操控光场,并实现 OAM 光束的生成。相比于传统依赖于光波传播过程中的相位累积,超表面能在极短的距离内通过表面效应实现光场的空间快速调制和所需要的相位变化。设计超表面的核心手段涵盖了利用几何相位、动态相位以及绕射相位等多种机制,这些设计策略使得超表面上的每个像素都能按照需求精确设定光场分布<sup>[89]</sup>。

**1.1.2 光纤生成方法** 在将传统圆柱形光纤用于生成涡旋光束的过程中,由于其固有的几何对称性限制,入射光的本征模易受到约束,且不同模式间的相互作用可能导致模式耦合及强度分布的不稳定性。因此,在常规光纤内形成的涡旋光束仅能在相对较短的距离内有效维持其特性,故基于此类光纤构造的涡旋光束生成方案迄今为止所取得的实际效果具有局限性<sup>[90]</sup>,然而,采用精心设计的光子晶体光纤则展现出了突破性的潜力。这类光纤因其独特的结构参数可控性,能够打破传统光纤的模式约束障碍<sup>[91]</sup>。特别是那些包含有序或非对称排列气孔结构的光子晶体光纤,在涡旋光束的传输与控制方面表现卓越<sup>[92-93]</sup>。

**1.1.3 高次谐波产生方法** 将光学涡旋的概念延伸至 EUV 乃至 X 射线频谱区域,是在 nm 乃至原子尺度实现其应用的关键拓展步骤。随着相关技术的发展,诸如高次谐波产生 (high harmonic generation, HHG) 等手段极大增强了短波段涡旋光束的产生可行性<sup>[57]</sup>。HHG 的一个显著方面是其完全相干的性质,可将驱动器的特征映射到高频谐波<sup>[57-61]</sup>。这一特性使得通过调控驱动激光场与目标介质间的非线性相互作用来控制 HHG 辐射

的 OAM 属性成为现实,该方法一般基于激光(如气相原子靶与中等强度激光脉冲相互作用以及等离子体与强激光脉冲相互作用)<sup>[58,94]</sup> 或加速器(如同步加速器和自由电子激光器)<sup>[95-98]</sup>。以上方法的结论类似,即在产生圆偏振光的螺旋波动器或静磁摆器中,谐波具有横向的涡旋结构特征,其总角动量 (total angular momentum, TAM) 为  $n$ , 其中  $n$  为谐波数。基于双色波混合安排,HHG 能产生携带任意拓扑荷的涡旋光<sup>[99-100]</sup>。

本文主要介绍自由电子激光器 (free electron laser, FEL) 的作用原理:研究发现处于 FEL 不稳定性影响下的相对论性电子束,在其共振相互作用波长及其谐波处,会在密度和速度上形成微束状<sup>[101]</sup>。这种调制过的电子束随后可用于各种辐射方案,这些方案保留了微束状的特征频率和几何结构<sup>[102]</sup>。因此可设计一种简单的调制器排列,它能生成螺旋微束的电子束,使得电子围绕纵轴排列成螺旋(或多层螺旋)结构,用于产生携带 OAM 的相干光<sup>[103]</sup>。之后 Hemsing 及其团队提出了利用 FEL 基波产生携带 OAM 的 X 射线的方案<sup>[104]</sup>,并完成了述方案的实验验证,如图 1 所示,仅使用电子束作为模式转换器,高斯激光模式可在 FEL 中有效地转换为 OAM 模式,这一突破为实现高亮度涡旋硬 X 射线的产生奠定了基础<sup>[105]</sup>。此外,基于前述理论和技术手段,可通过调整电子束中的微聚束结构来控制涡旋光的时间分布,以产生阿秒脉冲序列的 OAM 光<sup>[106]</sup>,具有高阶空间微聚束的电子束发出的相干跃迁辐射也可作为涡旋光源<sup>[107]</sup>,或者利用 FEL 以两个相反螺旋度的 LG 模的相干叠加形式,在 4 个最低阶产生了波长



未调制的相对论性电子束与螺旋波荡器中的线偏振激光相互作用,根据电子在聚焦激光束中的位置产生能量冲击。然后,电子束穿过纵向色散弯道,该弯道允许具有较高能量的电子赶上具有较低能量的电子(动量压实)。这便导致螺旋微束的电子束在平面波荡器中以基频辐射携带 OAM 的光

图 1 FEL 调制电子束产生涡旋光的实验说明<sup>[105]</sup>

Fig. 1 Experimental illustration of generating vortex light by FEL modulated electron beam<sup>[105]</sup>

约为 458 nm 的叠加涡旋光束<sup>[108]</sup>。

相关研究指出, 强激光沿着静磁摆动器的轴线在真空中传播时, 可以以定义良好的 LG 构型发射涡旋光子, 其中光子涡旋状态由磁摆动结构决定, 频率远大于强激光脉冲的频率, 最终可实现从可见光到 EUV 范围的涡旋光产生<sup>[109]</sup>。另外, 受激拉曼后向散射可将具有单个 OAM 能级的种子脉冲放大到探索相对论性激光-等离子体相互作用所需的强度<sup>[110-112]</sup>, 在长泵浦激光脉冲的作用下, 可以产生峰值功率为 kW 的涡旋光束<sup>[113]</sup>。而将传统的高次谐波产生技术与拉曼散射机制相结合的创新方案, 为研发能输出兼具高 OAM 值和高频特征的新型激光光源提供了可行路径, 这无疑极大地拓宽了先进激光科学与技术的应用领域<sup>[114]</sup>。

## 1.2 涡旋光子的探测方法

同样关键且不可或缺的任务是对涡旋光束特定模式的精准测量与明确判定。涡旋光束的 OAM 检测方法众多, 其中不乏基于干涉原理的技术<sup>[115]</sup>, 通过检查光束与参考光束之间的干涉模式, 使其呈现出叉形干涉图样, 叉数对应着光束的 OAM 量子数<sup>[116-117]</sup>, 且 Mach-Zender 干涉仪作为一种精密测量工具已被广泛应用于高阶拓扑荷的定量评估<sup>[118]</sup>。通常, 基于衍射的 OAM 检测有孔径衍射法和光栅衍射法。孔径衍射法是涡旋光束入射在三角形或方形的孔径上, 其衍射图案展现出离轴焦点的数量和位置, 据此可以推断出 OAM 值<sup>[119]</sup>。光栅衍射法是通过特定设计的光栅结构, 涡旋光束经过衍射后会在特定位置形成亮点或暗点, 亮点的位置或数量与 OAM 值有关<sup>[118, 120-121]</sup>。此外, 一种利用几何坐标变换分离 OAM 模式的检测方法同样表现出高效性, 这种方法的理论基础建立在 OAM 与线性动量之间的转换关系上<sup>[122-123]</sup>。在此过程中, 衍射光学元件能将涡旋光束拓扑荷关联的螺旋相位转化为横向相位梯度, 随后通过透镜将不同拓扑荷的涡旋光束聚焦到各自的横向位置。随着深度学习技术的迅速进步, 基于卷积神经网络的涡旋光束检测技术崭露头角, 并逐步得到广泛应用<sup>[124-125]</sup>, 通过训练模型识别 OAM 光束的特征, 实现自动化、高速和高精度的 OAM 模式识别<sup>[125]</sup>。鉴于表面等离子体激元在操控 nm 级电磁场方面的独特优势, 它在涡旋光束检测领域的应用引发了广泛关注<sup>[14, 126]</sup>, 涡旋光束的拓扑荷会影

响激发的等离子体波的聚焦特性, 通过检测聚焦点的变化即可推断 OAM 值。这种新颖的检测方式极大地丰富了涡旋光束探测技术的多样性与实用性。

## 2 涡旋电子

自从涡旋光束的物理内涵及其广阔的应用前景被深刻认知以来, 已在理论上预见并实验证明了涡旋电子的存在。尽管两者的空间尺度存在显著差异, 在实验条件下, 中压范围(100~300 kV)下的电子显微镜能产生德布罗意波长在 pm 级别的涡旋电子, 相比之下, 光学涡旋在可见光频段则具有数百 nm 级别的波长, 这意味着电子涡旋的应用场景更为精细<sup>[6]</sup>。目前已发现它可实现与手性相关的电子衍射现象<sup>[127]</sup>、磁依赖的电子能量损失谱分析<sup>[128]</sup>以及类似扳手操纵纳米粒子的行为<sup>[129]</sup>等前沿应用。尽管涡旋电子的基本理念源自光学涡旋, 但它却蕴含了诸如电子质量、电荷以及半整数自旋等特有的属性。由于电子是带电粒子, 它们可直接与外部电场、磁场发生相互作用, 从而辐射光子或携带感应磁矩<sup>[3-4, 6, 130]</sup>, 这些特性极大地扩展了涡旋电子物理学的研究内容。涡旋电子的 OAM 和电荷可以提高对局部磁性的灵敏度<sup>[131-132]</sup>, 参与 OAM 的二向性色转移, 为探测内在和外在旋转自由度提供额外的工具<sup>[133]</sup>, 以及促进自旋电子学的应用, 利用 SAM 操纵中产生的几何相位诱导自旋半转, 并将相应的 SAM 变化转换为电子束本身的 OAM<sup>[134]</sup>。

众所周知, 光子作为玻色子由电磁场矢量描述, 而在非相对论框架下, 电子遵循薛定谔方程, 表现为费米子态<sup>[135]</sup>; 进入相对论领域, 高能电子束则以狄拉克旋量形式呈现<sup>[136]</sup>。在相对论区域, 目前实验可以实现的是涡旋电子和激光的相互作用<sup>[137-138]</sup>以及涡旋电子的辐射过程<sup>[139-140]</sup>。研究发现, 涡旋电子与线偏振激光脉冲相互作用过程中会使它出现中心位置的移动, 这种位移伴随着电子概率密度分布的方位依赖性。而当它斜入射到真空和色散介质之间的界面时会发生跃迁辐射, 其中磁矩贡献通过左右角度不对称表现出来, 对于能量 300 keV, 拓扑荷在 100~1 000 之间的涡旋电子, 这种不对称性可达 0.1%~1%, 这是目前的技术可测量的。这些特性在相对论区域的实验中得到观测和量化, 进一步证实了涡旋电子作为研究

电磁辐射物理的新颖工具具有巨大的科学价值和技术潜力<sup>[139]</sup>。

## 2.1 涡旋电子的产生方法

概括来说,电子涡旋束的生成技术大致可划分为3个主要类别:相位板法、衍射光学法以及电子光学法。相位板和衍射光学这两种方法借鉴了产生光学涡旋光束的原理。而电子光学方法则是专门针对电子束特性的新技术,它在灵活性和解决传统全息板效率瓶颈方面展现了优越性<sup>[141]</sup>。初期电子涡旋束的成功制造案例确实倚重于采用特定材料制作的衍射元件和相位板装置。然而,随着技术的发展,电子光学方法因其在设计复杂相位分布和优化电子束性能上的潜能,显得更具发展前景。迄今为止,已成功产生拓扑荷数高达千量级的电子涡旋束<sup>[142]</sup>,不过,要实现更高OAM值的电子涡旋束仍面临挑战,尤其是在器件承受的极限电压方面<sup>[143]</sup>。



图2 利用SPP产生涡旋电子束<sup>[144]</sup>

Fig. 2 Spiral phase plates used to generate vortex electron beams<sup>[144]</sup>

**2.1.2 全息衍射光学** 全息技术的核心涉及衍射和干涉原理,当提到全息掩模时,尤其是二进制计算机生成全息掩模,其设计和制造过程通过算法将复杂的相位和振幅信息转化为二元图案,即由透明和不透明区域组成的阵列。如图3所示,这些掩模能在光波经过时改变其传播路径和相位分布,某研究组利用这种二进制的计算机生成全息掩模,产生了第1个纯涡旋电子束<sup>[128,146]</sup>。然而,二元调幅全息术的一个主要挑战在于其效率较低。由于只有两个离散的状态(完全透过或完全阻挡),大部分入射光能量在非透明区被阻挡而没有得到有效利用,导致输出的衍射光束通常仅包含大约6%的原始入射光强度,这大大限制了有效功率和信号质量<sup>[128,147]</sup>。另外,二元全息掩模产生的衍射图样复杂且多元化,多个衍射级次可能会同时出现,使得针对特定应用所需的某一种衍射模式的分离变得困难<sup>[148]</sup>。在需高纯度和精确

**2.1.1 相位板技术** Uchida的研究工作标志着电子涡旋束实验探索的一个重要里程碑,如图2所示,他们利用由多层石墨片精密堆叠形成的阶梯SPP首次实现了电子涡旋束的实验生成。尽管这一实验并未直接产生具有整数OAM的纯涡旋状态电子束,但它展示了自由空间中电子束存在混合涡旋态的现象,这是该领域内的开创性成果<sup>[144]</sup>。石墨薄片的不规则排列可能导致相位分布出现缺陷。另外,高能电子束对石墨薄片的冲击会引发材料的破坏和变形,从而影响相位板的稳定性与功能。为改进这一问题,有人提出了新的策略,如采用聚焦离子束蚀刻技术在氮化硅膜上制作连续SPP结构<sup>[145]</sup>,尽管这种方法理论上可行,但在实际操作中可能会因为无法精准控制薄膜材料的折射率分布和与其对应的电子波长匹配关系,从而导致非整数涡旋状态的产生。总之,SPP制造工艺面临着诸多挑战。

控制光束特性的场合,如在原子尺度操作中,这种多模式特性会表现出局限性,相比之下,单电子光学方法能更精细地操控单个电子的波前,从而可

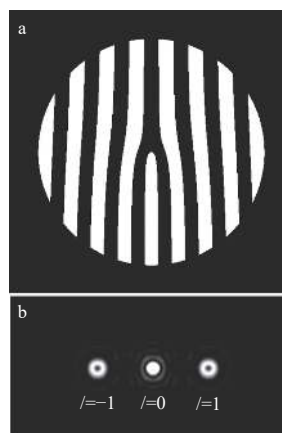


图3 利用全息掩模产生涡旋电子束<sup>[128,146]</sup>

Fig. 3 Holographic masks used to generate vortex electron beams<sup>[128,146]</sup>

能实现原子尺度的纯涡旋束<sup>[149]</sup>。

**2.1.3 电子光学方法** 现代像差校正电子显微镜在提高分辨率和实现新颖功能上取得了重大进展, 特别是在操控电子束的相位和角动量特性方面。一般的电子光学方法包括以下。1) 结构化相移元件。结构化相位板或相位掩模是一种可精确控制电子波前相位分布的元件, 它们能在不改变电子束强度的情况下, 通过相位变化将普通的电子束转化为具有特定 OAM 的电子束<sup>[150]</sup>。2) SAM 到 OAM 转换。利用 SAM 极化电子源和液晶或其他类型的滤波器, 转换为相反 SAM 极化的涡流光束<sup>[151]</sup>。3) 磁单极子场方法<sup>[152]</sup>。受到狄拉克关于磁单极子理论的启发<sup>[153]</sup>, 人们探索了如何利用特殊设计的磁场来直接影响电子波的相位, 从而赋予电子量子化的狄拉克相位和 OAM<sup>[154]</sup>。4) 涡流栅格方法。利用一系列静电棱镜或其他结构, 可设置一种电磁场环境, 使得电子束在其中形成驻波模式。驻波的节点线交叉点可作为涡旋中心, 从而产生多个涡旋电子束。这种方法有利于实现电子束的精细空间排布和多点同时探测<sup>[155]</sup>。5) 光子诱导空间调制。随着电子光学与光子学的交叉融合, 出现了利用光子与自由电子相互作用来实现实时空间调制电子束形状的方法。这种光子诱导的空间调制技术可自动化电子束的优化过程, 从而持续地进行像差校正, 极大改善了电子显微镜的成像质量和数据采集效率, 尤其是在先进成像技术和材料表征方面有着重要影响<sup>[156]</sup>。

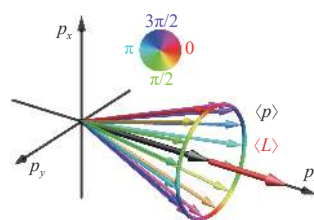
## 2.2 涡旋电子的探测方法

涡旋电子的测量主要包括以下。1) 干涉测量法, 电子全息术、刀口和三角孔径干涉和衍射<sup>[6]</sup>。2) 模式转换分析<sup>[157]</sup>, 它们对拓扑荷单一且小的纯态很有效。3) 图像旋转<sup>[158]</sup>, 对于纯涡旋电子态, 由于其圆对称性, 直接通过图像旋转来识别涡旋结构并不奏效。但在混合态情况下, 由于打破了对称性, 可通过观察电子束横截面上的强度分布不对称性来间接评估涡旋的存在和性质。4) 利用涡旋电子束以原子分辨率探测材料性质来反推<sup>[159]</sup>, 在 300 kV 电压下可产生具有原子分辨率的涡旋电子束, 其探针直径可达到亚埃级别(如 0.087 nm)。这样的高分辨率涡旋束可直接用于探测材料的细微结构和动态行为, 如通过观察电

子束与样品相互作用后的衍射或成像效果来反推出涡旋电子束的性质<sup>[159]</sup>。

## 3 其他涡旋粒子

涡旋光子和涡旋电子的相继发现开启了研究粒子携带 OAM 的新篇章, 其他涡旋粒子作为这一领域的后来者, 尽管其发现相对较晚, 但其潜在价值巨大。粒子的涡旋态在动量空间中的表示如图 4 所示, 与平面波态有很大的不同。因此, 涡旋粒子的研究不仅促进了基础物理学的进步, 还为新技术的发展奠定了理论和实验基础, 并对粒子角动量的精细操控解锁前所未有的科技应用, 预示着一个充满潜力的未来。



圆锥的半径代表了涡旋态的横向动量, 颜色编码了波函数的相位  
图 4 贝塞尔涡旋态在动量空间中的表示<sup>[4-5]</sup>

Fig. 4 Representation of Bessel vortex state in momentum space<sup>[4-5]</sup>

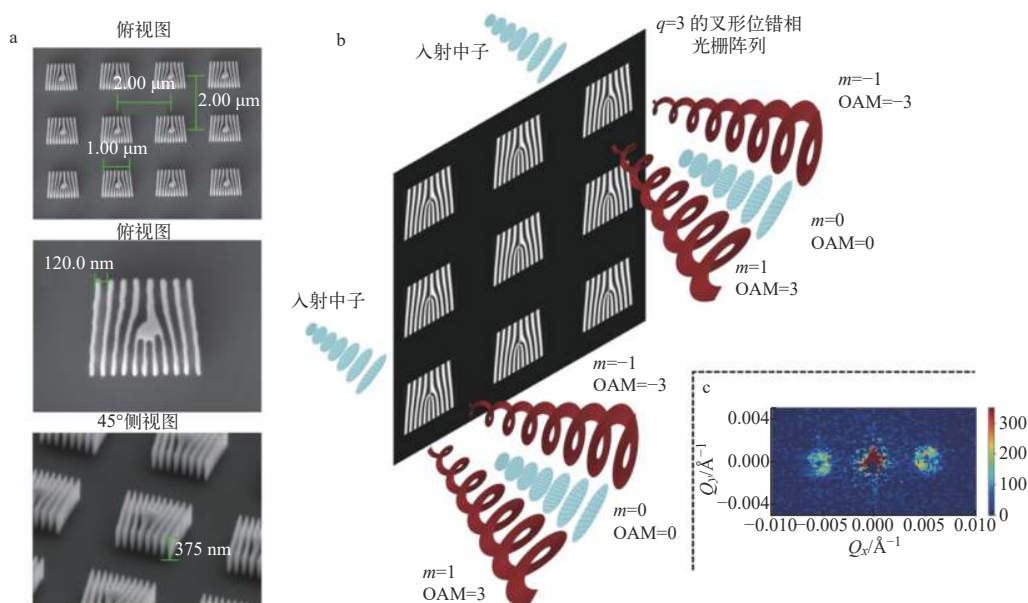
### 3.1 涡旋中子的产生方法

中子作为一种由夸克构成的复合粒子而非基本粒子, 其独特的性质使其在材料科学和量子信息科学中扮演了重要角色。中子由于无电荷且具有合适的波长和能量, 能够穿透许多类型的物质而不受电荷屏蔽效应的影响, 特别适合用于研究凝聚态物质内部的结构和动力学特性, 揭示材料中手性、磁性和超导性等方面的信息<sup>[160-162]</sup>。携带 OAM 的中子束会改进内部电荷分布, 特别是对于夸克和胶子等亚原子粒子在强相互作用下的排列和动态行为<sup>[163]</sup>。然而, 实际操作中, 利用中子的 OAM 态开展研究主要面临两个挑战。其一是分辨率问题, 现有的中子探测技术受限于中子相干长度, 即便是在冷中子实验条件下, 要实现优于  $\mu\text{m}$  级别的二维中子成像分辨率仍相当困难。其二是中子源特性, 目前的中子源多来源于核反应堆或散裂中子源, 这些中子源产生的中子具有较宽的能量分布, 且并非自然具有高度空间相干性。虽然可通过慢化剂和布拉格单色器对中子进行能

量筛选和一定程度的准直,但直接产生和检测具有明确 OAM 状态的中子束依然存在技术难题<sup>[164]</sup>。总体而言,中子 OAM 态的操作和检测技术尚处于发展阶段,若能突破现有技术瓶颈,将极大地丰富和深化对物质内部结构的认知,并可能开启新的研究领域和应用方向,如利用中子 OAM 态进行量子信息处理和量子计算等<sup>[161]</sup>。

2015 年,Clark 及其团队首次成功产生了具有 11 MeV 能量和 0.27 nm 波长的涡旋中子,通过宏观 SPP 对中子的 OAM 进行控制,并运用完美晶体中子干涉仪验证了涡旋中子束的平均 OAM 状态<sup>[164]</sup>。不过,由于中子束的横向相干长度较小,这一研究成果面临着一定的质疑。为解决这一问题,Cappelletti 提出了一些策略:首先,通过在光路中增设针孔并适当调整 SPP 位置,可使中子波函数在传播过程中横向扩展,以覆盖针孔,从而在牺牲一定通量的前提下提高相干性<sup>[165]</sup>。此外,借鉴产生单色中子束的方法也可能有助于提升相干

性<sup>[166]</sup>。进一步的研究中,发展了一种结合核磁共振相干平均和空间控制的技术方案制备脉冲序列来产生晶格,这种方法能有效地将 OAM 状态晶格耦合到两能级系统中<sup>[167]</sup>,在此基础上,借助特殊设计的磁场结构,可针对性地克服中子束低通量和空间相干性不足的问题<sup>[168-169]</sup>。螺旋状中子波的真实实现是通过数百万个衍射光栅组成的微加工阵列,其临界尺寸可与中子相干长度相媲美。如图 5 所示,将这些阵列布置在中子散射目标的  $\text{cm}^2$  区域上,表明了将其他结构波技术直接整合到中子科学的可能性<sup>[170]</sup>。此外,还提出了多种产生单个涡旋中子的途径,如通过四极磁场的中心使自旋和轨道耦合<sup>[171]</sup>,通过电场传输产生横向 OAM<sup>[172]</sup>,或利用磁性沃拉斯顿棱镜构造携带 OAM 的自旋纹理中子束<sup>[173]</sup>。至于涡旋中子的探测方法,可选择利用中子选择规则,如在自旋极化  $^3\text{He}$  的帮助下,通过异常横截面和放射性衰变等方式进行探测和分析<sup>[174]</sup>。



a——利用扫描电子显微镜拍摄的图像,该图像表现了一种特殊的光栅阵列,这种阵列由叉形位错构成,其设计目的是用于产生中子的螺旋波前;b——每个相位光栅产生一个由不同衍射阶组成的衍射光谱;c——收集的小角度中子散射数据的示例

图5 全息方法产生携带明确 OAM 的中子<sup>[170]</sup>

Fig. 5 Holographic approach to generating neutron with carrying well-defined OAM<sup>[170]</sup>

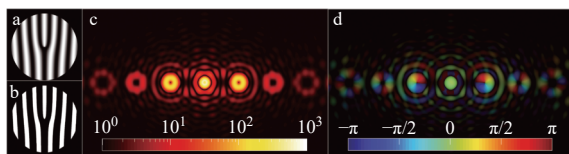
### 3.2 涡旋原子的产生方法

涡旋原子束的产生有下列方法<sup>[175]</sup>。通过设计特殊的原子透镜,能在焦点区域产生空心原子束,可调节原子束的能量以改变其拓扑荷数<sup>[176]</sup>。

或让原子束通过适当定制的具有叉状强度模式的光场(光掩模)衍射<sup>[177]</sup>,导致原子波函数的相位印记<sup>[178]</sup>,不同的衍射阶是具有不同整数 OAM 的原子束<sup>[179]</sup>。研究者还利用 nm 光栅衍射技术对来自



超音速气源的大横向相干长度原子进行操作, 成功观察到了一系列代表氢原子非零 OAM 状态的环形衍射图案, 甚至还发现了涡旋态的亚稳态氦二聚体原子束(这是原子气体在放电后的超音速膨胀中形成的一种分子)。如图 6 所示, 这种方法具有普适性, 理论上适用于任何原子或分子的超音速束, 甚至可能延伸至涡旋离子和质子的产生<sup>[180]</sup>。与此同时, 在原子气体 BEC 体系中, 由于凝聚体内的多体波函数可以较好地近似为相同单粒子波函数的乘积, 因此当 BEC 处于涡旋态时, 每个原子都将携带量子化的 OAM。在钠原子的 BEC 中, 利用 LG 光束的双光子受激拉曼过程产生涡旋原子态, 证明了光子 OAM 向原子的相干转移, 该实验提供了在 BEC 中创建涡旋态的一种新的和可控的方法, 也是原子样品 OAM 相干控制的新工具<sup>[29]</sup>。随后, 也有研究者探讨了在自由空间中运动的 BEC 从陷阱中释放出来, 在一合适的具有螺旋横向轮廓的光掩模中产生原子涡旋束的情况<sup>[181]</sup>。

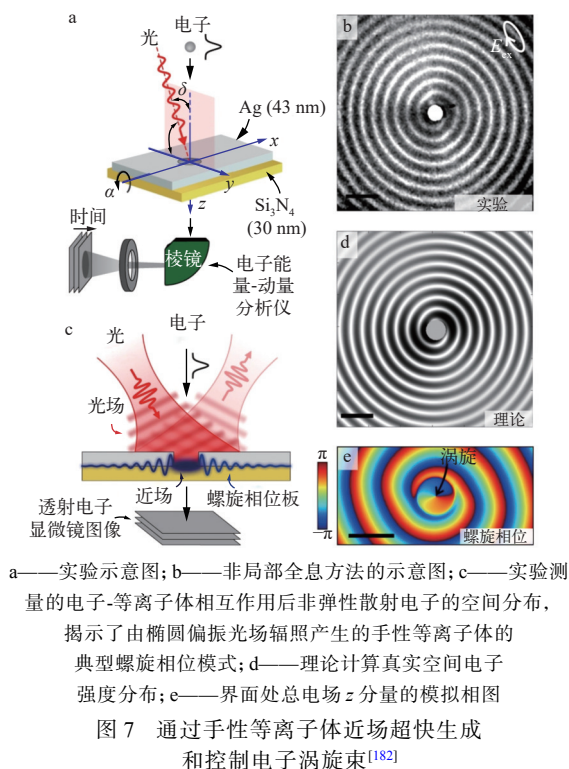


a——产生携带特定拓扑荷的束所需的光栅; b——有分叉的边缘位错, 产生一系列携带拓扑荷的涡旋束; c——在远场波束的强度分布; d——强度分布对应的相位分布

图 6 涡旋束从二进制透射光栅的计算衍射图像<sup>[180]</sup>

Fig. 6 Calculated diffraction image of vortex beams from binary transmission grating<sup>[180]</sup>

实验表明, 超快涡度可通过与集体电子模式维持的强局部电磁场相互作用赋予带电粒子。如图 7 所示, 这是通过超短单电子波包与光激发飞秒手性等等离子体近场相互作用来实现的, 这种相互作用在电子的波函数上引起方位角变化的相移。与使用相位掩模的方法相比, 该方法能在更小的空间尺度上实现可扩展性和高效的动态相位控制, 这源于操纵超快等离子体场的的能力。进一步讨论使用这种技术来塑造带电复合粒子(如质子)的波函数, 预测涡旋质子束将呈现依赖于 OAM 的密度分布, 将反映出它依赖于 SAM 的内在特性, 并可能揭示亚原子物理学中一个长期悬而未决的问题: 质子自旋的起源<sup>[182]</sup>。



a——实验示意图; b——非局部全息方法的示意图; c——实验测量的电子-等离子体相互作用后非弹性散射电子的空间分布, 揭示了由椭圆偏振光场辐照产生的手性等等离子体的典型螺旋相位模式; d——理论计算真实空间电子强度分布; e——界面处总电场  $z$  分量的模拟相图

图 7 通过手性等等离子体近场超快生成和控制电子涡旋束<sup>[182]</sup>

Fig. 7 Ultrafast generation and control of electron vortex beam via chiral plasmonic near fields<sup>[182]</sup>

## 4 高能涡旋粒子

为了研究涡旋粒子在核物理和粒子物理的影响, 能量必须达到 MeV 或 GeV 的范围。目前虽然尚未有实验报道成功实现这一目标, 但已有几种理论方案被提出。

### 4.1 粒子高能加速与涡旋转换

这种情况下, 粒子需具备足够的横向相干长度以便在其接近平面波状态下通过能产生相位涡旋的设备<sup>[183]</sup>。然而, 由于高能粒子的穿透能力强, 传统衍射光栅无法有效发挥作用。随着显微镜技术的进步<sup>[154, 175]</sup>, 如微机电系统技术的引入, 人们开始研发可调谐相位板, 这些相位板可取代显微镜的孔径, 并从电子显微镜外部进行控制<sup>[184-185]</sup> 使产生高能涡旋带电粒子成为可能。

另一技术手段是利用阴极浸在螺线管场中, 阴极的浸没从根本上改变了带电粒子束的动力学。当粒子束在场内产生时, 粒子束只看到螺线管的一半, 因此产生了固有 OAM。Busch 定理描述了螺线管磁场强度、阴极上电子束尺寸与最终在螺线管外部自由传播的电子束所携带的 OAM 之间的关系<sup>[186]</sup>。只要在阴极周围设置一个中等强度的螺线管场(用于电子)或用于离子产生的电

荷剥离介质,就可以产生具有宽 OAM 带宽的束。对于需要在显微镜等应用中产生具有窄 OAM 带宽的纯净模式,可以通过在阴极周围的小体积内使用小直径和高螺线管场的环形阴极来实现,浸没源技术的简单性、高效率 and 极大的灵活性使其成为产生从电子到离子等各种带电粒子涡旋束的解决方案<sup>[187-188]</sup>。此外,进一步的研究分析了带电粒子从(准)均匀磁场进入真空或另一个(准)均匀磁场的螺线管,以及从真空进入螺线管的过程,并提出了产生涡旋正电子的实验方案。在螺线管内部。粒子旋转相位的不确定性随着粒子经过的距离而增加,这种效应源于量子力学的基本原理。基于此,提出了一种基于带电粒子通过(准)均匀磁场获得 OAM 的新方法,该方法简单,只需要一个真正的螺线管,没有额外的粒子源,极大地简化了涡旋粒子的产生<sup>[189]</sup>。这种方法不仅针对电子,还可推广到其它带电粒子,为涡旋粒子束的研究和应用开辟了新的途径。

在相对论框架下,回旋电子与 OAM 微波光子之间的相互作用也被认为是一种可能的途径。电子在吸收不同频率和 OAM 值的微波光子时,可跃迁到具有不同朗道能级的涡旋状态;而在辐射过程中,电子辐射的  $n$  次谐波携带的 TAM 数目为  $n$ <sup>[190]</sup>,这与同步辐射研究的结论相符<sup>[53, 95-96, 105, 191]</sup>。在重离子碰撞中旋转电荷会导致产生相当于同步辐射的光子。这种辐射由电荷的旋转定义,磁场也因上述旋转而出现。由于固有的高涡度和强磁场,可预期其他涡旋粒子的辐射是普遍的<sup>[192]</sup>。此外高能涡旋光子也可由排列晶体中的粒子通道产生,这样得到的涡旋光子处于混合态。在强磁场环境中,磁场可促使粒子在特定方向上产生额外的扭曲,并使具有特定初始角动量的粒子更容易被捕获到通道模式中<sup>[193]</sup>。通过计算晶体表面电子的入射角度,可得知沿平面和轴向通道发射的光子所携带的 OAM 值。研究发现,这些光子的 OAM 与其能量之间存在着周期性的关系,且表现出明显的反射对称性<sup>[194-195]</sup>。

#### 4.2 低能涡旋态的加速研究

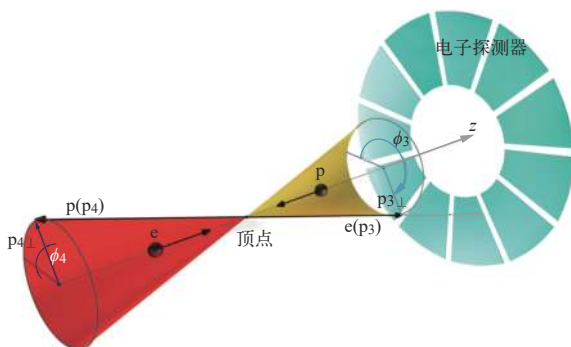
这需在不破坏其 OAM 结构的前提下进行加速(线性加速器或存储环中)<sup>[196]</sup>;在理想状况下,如果电子束保持纯贝塞尔束特性,并沿着均匀的纵向电场传播,则其横向波函数在纵向动量增加

时可以保持不变。已有研究表明,在轴对称的电场和磁透镜场条件下,如在加速器、电子显微镜以及 Penning 阱环境中, OAM 是守恒的,这意味着涡旋束能够被加速、聚焦、操控、捕获,甚至存储在这些对称场或阱结构中<sup>[188]</sup>。相位涡旋是一种拓扑保护性质,确保了涡旋信息的稳定性<sup>[197]</sup>,实验已经证实,即使在如大气湍流这样复杂的环境下,光学涡旋光子也能在长达 143 km 的距离上传输信息<sup>[198]</sup>。然而,它们在更高能量条件下的表现及其对非理想条件(如杂散场)的敏感度,还需要通过深入的数值模拟研究和实验验证。Silenko 等运用洛伦兹变换推导出了涡旋电子在外场中运动的一般动力学方程,并提出了提取和控制特定轨道极化的电子涡旋束的方法<sup>[199]</sup>;后续工作进一步发展了涡旋电子束在任意电场和磁场中的相对论动力学理论,预测了涡旋电子束在磁场中由于辐射导致的轨道极化对其固有 OAM 在磁场方向投影的影响<sup>[200]</sup>;对处于非均匀电场和磁场中的涡旋电子,证明它具有张量磁极化率和可测量的电四极矩,电四极矩影响着本征 OAM 的动力学演化<sup>[201]</sup>。Gallatin 等对近轴涡旋电子在均匀横向磁场中的行为进行了分析发现 OAM 以可预测的方式演变,且可经受多次旋转<sup>[202]</sup>。这些研究成果均深化了对涡旋电子束在外场中的运动演化和操控技术的发展。

#### 4.3 高能碰撞中的 OAM 与能量传递机制

在高能碰撞过程中,能量、动量和角动量守恒定律确保了最终产生的高能粒子也处于涡旋状态。首次通过量子力学方法研究高能涡旋粒子生成的实例是对超相对论性电子与涡旋激光光子的康普顿背向散射过程。其中将涡旋激光光子描述为贝塞尔态,当背向散射后的电子被投射到沿相同  $z$  轴传播的平面波态时,末态光子可以在保持初态涡旋光子 OAM 和横向动量不变的同时,能量被升级到 MeV 或 GeV 级别。这意味着,这一过程可以作为产生高能、准直涡旋光子的一种方式,进而服务于核物理和粒子物理实验。即使不是严格的背向散射,而是发生较小散射角的情况,末态光子仍能保留其涡旋特性<sup>[203-204]</sup>。在此基础上,将这类过程推广至涡旋粒子和平面波粒子间的散射,此时末态生成的两个粒子状态会呈现出 OAM 和横向动量的纠缠特性。这一过程可用于制造各

种性质的 OAM 纠缠粒子对, 例如, 从低能电子到高能质子<sup>[205]</sup>, 涡旋电子的切伦科夫辐射<sup>[140]</sup>。值得注意的是, 这类过程暗含了后选择协议的概念<sup>[206]</sup>, 如图 8 所示, 若不对末态粒子中一个粒子的动量方位角进行测量, 那么另一个粒子将以确定的 OAM 状态出现。这就要求一种理想的宏观探测器, 它能够相干地分析整个  $2\pi$  方位角域内的波函数, 但现有的探测器技术无法实现这一点<sup>[207-208]</sup>。一研究组分别研究了高能电子在重核库仑场的作用下通过韧致辐射产生伽马光子<sup>[209-211]</sup>, 高能光子在库仑场产生正负电子对<sup>[121]</sup> 和高能光子碰撞产生正负电子对的 Breit-Wheeler 等过程<sup>[213]</sup>, 这些过程初末态粒子都采用了贝塞尔函数表示, 以明确揭示散射过程中角动量转移规律。尽管这些研究旨在获得高能涡旋粒子, 但在实际操作中, 要在遵循后选择协议的基础上, 准确识别末态粒子的 OAM 状态, 是一项相当艰巨的实验挑战。



若电子方位角  $\phi_3$  以较大的不确定性测量或根本不测量, 质子会处于涡旋态

图 8 电子 $\rightarrow$ 质子的弹性散射的方位角“何种方式”实验<sup>[207-208]</sup>

Fig. 8 Azimuthal “which-way” experiment with elastic  $ep \rightarrow ep$  scattering<sup>[207-208]</sup>

超强和超短激光脉冲<sup>[214-215]</sup>的发展为通过非线性康普顿散射 (nonlinear Compton scattering, NCS) 产生高能伽马光子<sup>[216-217]</sup> 提供了可能。在 NCS 过程中, 电子在圆偏振激光场中吸收多个低能激光光子并辐射单个高能光子,  $n$  次谐波辐射场携带的 TAM 值为  $n$ , 其中  $n$  为吸收光子 SAM 的数目<sup>[53, 95-96, 218-222]</sup>。在采用经典方法处理这类问题时<sup>[53, 96, 222-223]</sup>, 电子被视为没有固有角动量的点电荷, 由于外部激光场而经历螺旋运动。利用 Lienard-Wiechert 延迟势计算了电子在螺旋运动中辐射的电磁场, 并将其解释为涡旋伽马光子。经

典方法主要适用于量子反冲效应可忽略不计, 辐射能量明显低于电子能量的情况。然而, 随着辐射能量显著增加, 辐射过程的量子性质包括量子反冲和随机效应, 是显著的并且必须加以考虑, 单个伽马光子的本征 OAM 应通过量子方法明确描述<sup>[224-225]</sup>。之后一研究组相继发展了超相对论性平面波电子和涡旋电子在圆偏振激光中的 NCS 过程的量子电动力学理论<sup>[218, 226]</sup>, 明确解决了多光子吸收和角动量传递机制, 讨论了涡旋相位如何传递给辐射光子。前者还研究了有限激光脉冲对辐射涡旋伽马光子角动量和能量分布的影响, 在后选择协议的基础上, 得到了与经典辐射理论相同的角动量传递关系<sup>[218]</sup>。后者主要探讨了涡旋电子的横向动量和 OAM 量子数对辐射过程的具体影响<sup>[226]</sup>, 早先关于激光与涡旋电子相互作用的研究重点更多地落在电子的动力学行为上, 而非辐射本身的特点上<sup>[137-138, 227-228]</sup>。另外, 也有研究关注相对论性高亮度电子束和 OAM 激光脉冲之间通过汤姆逊或康普顿后向散射产生 OAM 与主激光脉冲相关的 X 或伽马光源的可能性<sup>[223]</sup>。

伽马工厂项目位于加速器、原子、核和激光物理之间的边界, 它利用欧洲核子研究中心的先进加速器设施, 专注于研究部分剥离重离子的生产、储存和操作。伽马工厂方案的核心是共振光子散射过程, 在这个过程中, 快速移动的离子先被正面入射的光子激发, 随后随着次级光子的辐射而衰减。由于对撞机(实验室)和离子静止参照系之间的洛伦兹变换, 这种散射过程将产生高能并且良好准直的二次光子束, 可用于各种实验<sup>[229]</sup>。研究发现超相对论性部分剥离离子 (partially stripped ions, PSI) 在与激光光子进行共振弹性散射过程中, 能表现出特殊的物理效应——涡旋转移。当 PSI 位于激光光束的涡旋中心附近时, 发生的共振弹性散射过程如同一个精准的角动量交换仪式。入射光子携带的 TAM 能够转移到散射后的光子上。这意味着, 如果离子恰好处在涡旋轴附近并经历了特定的能级跃迁 (如  $nS_0 \rightarrow n'P_1 \rightarrow nS_0$ ), 散射事件就像一个完美的角动量传输通道, 入射光子的全部角动量被镜像到了后向散射的光子中。相比之下, 离子如果偏离涡旋中心较远, 散射过程中的角动量转移就不再如此直接和纯粹。此时, 散射辐射中的角动量分布不再是

单一值,而是展现了一定的分散性,说明入射光子的角动量在散射过程中被不同程度地分散到了多个散射方向或模式中。这表明离子的空间位置对于能否实现高效且定向的角动量转移至关重要,进一步凸显了实验设计中精确控制离子位置的挑战 and 重要性<sup>[230]</sup>。

此外,PSI还可以作为能量转换器,Tashiro及其团队的研究展示了一种创新方法,通过操控涡旋激光束与加速的类氢离子束的相互作用来产生涡旋光子。研究者精心选择了涡旋激光的能量,确保其能够精确激发类氢离子从基态 $1S_{1/2}$ 跃迁至特定的激发态 $3D_{5/2}(m=5/2)$ ,其中 $m=5/2$ 代表了角动量的磁量子数。当处于激发态的离子通过电四极(electric quadrupole,E2)跃迁返回基态时,它会辐射 $(J_\gamma, M_\gamma)=(2,2)$ 的涡旋光子,这个过程得益于离子的相对论性运动使得辐射的能量得到显著提升,具体表现为能量提升了 $4\gamma_{\text{ion}}^2$ 倍,其中 $\gamma_{\text{ion}}$ 表示离子的洛伦兹增强因子( $\gamma_{\text{ion}} \gg 1$ ),且这些光子沿离子运动方向高度集中,有利于实验的实施。尽管这种方法预期涡旋光子的通量相当大,但仍面临着两个主要的背景噪声问题。其一是从 $3D_{5/2}$ 到 $2P_{3/2}$ 的电偶极(electric dipole,E1)跃迁背景:相比于所需的E2跃迁,E1跃迁发生的概率要高得多,尽管这些背景光子与目标涡旋光子在能量上有显著差异,但仍构成干扰。另一个是非奇异性E2光子背景:即使在E2跃迁中,还存在一种不产生相位奇异性,即来自 $3D_{5/2}(m=3/2)$ 的 $M_\gamma=1$ 光子,它与目标的 $M_\gamma=2$ 光子在性质上有别,同样造成背景干扰。原则上,可以通过施加横向磁场来产生塞曼分裂并选择辐照激光束的能量来抑制这种背景,从而不会发生对 $3D_{5/2}(m=3/2)$ 态的激发,但这种背景抑制导致伽马工厂的碰撞点设计更加复杂<sup>[231]</sup>。基于该研究,他们后来又提出了一种利用高加速类氦的PSI产生涡旋伽马射线的新方法<sup>[232]</sup>,通过两个非涡旋的光学激光器的辐照,不仅加速了PSI,还巧妙地利用了双光子受激拉曼绝热通道技术<sup>[233]</sup>,这是一种高度控制的激发过程,能够将离子精确激发到具有高角动量( $J=2, M=\pm 2$ )的激发态。然后在去激发过程中辐射带有OAM的光子。离子观察到的两个激光光子的能量蓝移了 $2\gamma_{\text{ion}}$ 因子,然后向后辐射的光子的能量是 $2\gamma_{\text{ion}}$ 乘以静止离子的选择能级分裂。这种角动量转移,

结合其远大于背向康普顿散射的横截面,使得基于PSI的共振光子散射成为了在伽马工厂<sup>[229]</sup>等实验设施中生成涡旋X射线或伽马射线的重要手段<sup>[234]</sup>。

## 5 涡旋粒子参与的相互作用过程

涡旋粒子的研究为现代物理学开辟了一个充满挑战与机遇的新领域,它不仅深化了对基本粒子行为的认识,且为探索物质深层次结构提供了新颖视角。低能涡旋粒子实验主要集中在原子、分子及光学物理领域,如当涡旋电子与原子相互作用时,其特有的角动量属性可极大地影响辐射捕获过程<sup>[235-236]</sup>。这种效应在原子物理学中尤为重要,因为它不仅反映了电子自身的量子特性,还揭示了原子内部动力学的微妙差异。高能涡旋粒子的研究是粒子物理学和核物理学中的一个重要分支,如在非偏振涡旋光子碰撞过程中,理论上能探测到宇称破缺效应;而在非偏振涡旋电子-正电子对湮灭实验中,有可能生成近乎100%偏振的介子<sup>[49,237]</sup>。此外,在强子结构的研究层面,通过核子吸收涡旋光子并经历磁偶极子(magnetic dipole,M1)和E2跃迁,可激发产生 $\Delta(1232)$ 重子(SAM量子数为 $3/2$ ),并伴随着角动量选择规则的修改<sup>[238]</sup>。涡旋态粒子与平面波粒子可灵活地出现在多种多样的初始和最终状态中,从而为探索物理现象的多样性提供了丰富的场景。每一种配置都可能揭示新的物理现象。理论上的灵活性要求实验设计同样具备创新性,以应对从精密测量到极端条件下的粒子探测等多方面的挑战。通过对涡旋态粒子的深入探究,不仅丰富了对基本粒子相互作用的理解,也为未来的实验技术和理论研究带来了前所未有的机遇。

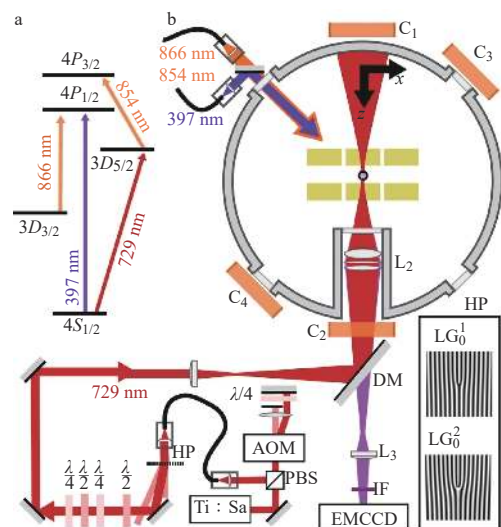
### 5.1 涡旋粒子参与的散射过程

在涡旋光与原子相互作用的背景下,首先要解决的问题之一是OAM交换的可能性。在传统的高斯偏振光与原子的发射和吸收过程中,选择规则是明确且受到严格约束的,但当引入涡旋光时,这些选择规则是否会发生变化成为一个重要的科学问题。针对这个问题,理论分析主要是建立在对E1和E2跃迁矩阵元的研究,以及原子的质心和内部(电子型)运动之间的划分,相关理论和实验方面的研究仍在继续<sup>[239-240]</sup>。在涡旋光与

原子的相互作用中, OAM 的主要交换机制发生在 E1 近似中, 并且只涉及质心运动和光束。内部的“电子型”运动不参与任何 OAM 交换。只有在较弱的 E2 相互作用中, 涉及所有 3 个子系统(光、原子质心和内部运动)的交换才能发生。这意味着在光束和内部运动之间交换一个单位的 OAM, 剩余 OAM 被转移到质心运动中。这些结论排除了任何试图通过 E1 跃迁观察涉及光束和分子系统内部状态的 OAM 交换的实验<sup>[39,241]</sup>。

Schmiegelow 等通过巧妙设计实验, 首次实验证明了 LG 光束驱动  $4^2S_{1/2} \leftrightarrow 3^2D_{5/2}$  四极跃迁过程中 OAM 可直接转移到被捕获离子的价电子运动中(即内部自由度)。通过测量放置在保罗阱中的  $^{40}\text{Ca}^+$  离子的拉比频率, 观察到了显著的选择规则修改, 这表明原子能在单个光子吸收过程中同时获得两个角动量量子: 一个来自 SAM, 另一个来自光束的空间结构。如图 9 所示, 实验设计围绕着 LG 光束的传播轴( $z$  轴)具有旋转对称性, 这样的几何构型确保了沿  $z$  轴方向的角动量守恒, 这意味着只有当光子携带的 TAM 正好等于原子跃迁前后角动量变化时, 跃迁才被允许, 而在实验上确实仅角动量守恒时可观察到相干拉比振荡。捕获单个  $^{40}\text{Ca}^+$  离子并实现其激光冷却至极低温度, 是实验技术上的关键步骤。使用微结构分段保罗阱可极大地限制离子的热运动(热空间扩散仅约 60 nm, 远小于激光束腰), 离子的低温状态确保了其在空间位置上的稳定, 使得激光束能够精确地作用于离子, 从而实现对角动量转移的精确控制和测量<sup>[35]</sup>。Giammanco 等后续的工作使用具有 OAM 和 SAM 不同组合的激光来激发 Rb 原子。根据基态和第一激发双峰态之间 E1 跃迁的选择规则, 选择激光辐射来抑制或增强荧光。实验得到的吸收曲线和荧光信号表明 OAM 在 E1 跃迁中不与原子内部(电子)运动接触<sup>[242]</sup>。这与之前 E1 近似下的理论预测一致。这一发现加深了对 OAM 在不同类型跃迁中作用差异的认识, 同时也为设计基于角动量的精密测量和操控技术提供了重要依据。

在与前述实验相似的实验装置下<sup>[35]</sup>, Afanasev 及其团队专门考察了  $^{40}\text{Ca}^+$  离子相对于涡旋光中心的不同位置处  $b$  的激发行为, 并将其结果与多种 OAM 模式(如贝塞尔、贝塞尔-高斯和拉盖尔-高



a— $^{40}\text{Ca}^+$  的能级图, 利用 729 nm 的四极跃迁来研究光子到单个离子的 OAM 传递, 而接近 397、866、854 nm 的偶极跃迁则分别用于冷却、初始化和探测离子; b——实验装置图, 单个离子被囚禁在一个线性分段的保罗陷阱(黄色)内, 该陷阱位于一个超高真空腔(灰色)中。通过光纤(左上角输入)传输的、与偶极跃迁共振的光线被用于多普勒冷却(397 nm)、探测(866 nm)以及状态重置(854 nm)。接近 397 nm 的受激辐射荧光通过透镜  $L_2$ 、 $L_3$ , 经过一个二向色镜(DM)和干涉滤光片(IF)后, 被成像在一台 EMCCD 相机(右下角)上。为激发四极  $4^2S_{1/2} \leftrightarrow 3^2D_{5/2}$  跃迁, 来自钛宝石激光器(Ti:Sa)的相干光通过声光调制器(AOM)传输, 用于频率和定时控制, 由偏振保持光纤过滤, 并通过全息相位板(HP)转换为所需的涡旋光束。激光束偏振由一系列  $1/4$  波片和半波片设置, 并通过透镜  $L_1$ (焦距  $f=50$  mm)和  $L_2$ (焦距  $f=67$  mm)聚焦到离子上。磁场由线圈  $C_{1-4}$  和垂直方向上的附加线圈(未显示)控制

图 9 光学 OAM 向束缚电子转移的实验示意图<sup>[35]</sup>

Fig. 9 Experimental illustration of transfer of optical OAM to bound electrons<sup>[35]</sup>

斯模式)下的理论预测进行对比, 展示了高度的一致性, 误差在 3% 以内, 这项工作是将涡旋光场的激发研究从单个离子扩展到集合的激发<sup>[36]</sup>。多项研究指出选择规则取决于原子相对于入射涡旋光束中的位置  $b$ <sup>[35, 51, 243-245]</sup>, 这是由原子性质和涡旋光的多极分量间的相互作用引起的<sup>[246-247]</sup>, 因此可以通过调整入射光束来控制原子跃迁<sup>[248]</sup>。电八极跃迁是涡旋光激发的一个特别有趣的情况, 因为这类跃迁通常具备窄线宽特性, 对于高精度光谱学尤为重要, 在使用平面波进行此类跃迁激发时往往需要高强度激光, 且容易产生显著的光频移效应。通过实验证明, 使用  $\text{LG}_{20}$  涡旋模式时, 能够在涡旋光束中心附近观察到 5 倍光位移的有效抑制, 这证实了涡旋光具有减少甚至消除光频移的跃迁激发的潜力<sup>[249]</sup>。关于多电子原子、离子、分子在涡旋光下的散射、激发、电离等都得到

了广泛报道,此处不再赘述<sup>[250-256]</sup>。

涡旋光不仅能改变原子内部的跃迁选择规则,且还可能对原子的线性运动产生显著影响。具体来说,当原子相对涡旋光轴线距离为 $b$ 处时,它在吸收单个涡旋光子后,会获取远大于该光子自身携带的横向动量<sup>[55,257]</sup>。要理解这一现象,可将探测原子视为一个空间尺寸 $\sigma$ 远小于 $b$ 的紧致波包,其动量空间波函数会扩展到 $1/\sigma$ 远大于 $1/b$ 。在初始状态下,波包内的所有平面波成分互相平衡,使得平均横向动量保持为零。然而,涡旋光子的吸收打破了这种平衡状态,从而产生了非零的平均横向动量。涡旋光子的作用并非直接赋予原子一个大的横向动量,而是通过重新排列波包内部各平面波分量的方式实现了所谓的“超级踢”效应<sup>[258]</sup>。“超级踢”效应导致最终状态的动能增加,相应地也会引起各类物理过程阈值能量的调整。尽管在 $\text{eV}\sim\text{MeV}$ 能量范围内的原子和核光诱导反应中可以观测到这种效应,但额外产生的横向反冲效应相对较小。值得注意的是,“超级踢”效应大小与涡旋轴到原子或分子(即相互作用区域)的距离紧密相关。为了精确研究这一效应,实验设计中通常采用局域化、尺寸微小的靶目标<sup>[55]</sup>。随后,Ivanov及其团队在量子场论框架下重新分析了“超级踢”现象<sup>[259]</sup>:将两个初始粒子均视为自由传播的波包,并分别用贝塞尔态和紧致高斯态进行描述,从而证实了Barnett等先前提出的解释及其依赖关系<sup>[258]</sup>。在该研究组的后续工作中,他们以LG波包和紧致高斯波包为对象研究了碰撞过程<sup>[260]</sup>,通过这种方法能够重新推导出“超级踢”效应,而无需诉诸之前工作中使用的人工程序<sup>[259]</sup>,尽管波包的非单色性导致了阈值区域的模糊,但并未在阈值附近观察到明显的增强效应<sup>[260]</sup>。

涡旋电子的弹性散射能够用来探测晶体手性<sup>[127,261]</sup>,与大型磁性样品的弹性相互作用能引起散射波的相移,这种效应可用于研究材料的磁性结构和电子自旋相关的物理现象<sup>[262]</sup>。Karlovets等对玻恩近似进行了扩展,使之适用于非平面波的波包散射情况<sup>[263]</sup>,这一理论进步使得对涡旋电子与原子靶散射的模拟更精确,揭示了出射角分布对涡旋电子的OAM、横向动量及靶物质组成的敏感依赖性,这意味着原子对涡旋电子的散射可以作为诊断这种束的工具<sup>[264]</sup>。Serbo的工作进一

步将研究拓展到了相对论尺度,利用狄拉克方程探讨了涡旋电子在高压条件下的莫特散射,特别关注了与单原子和宏观原子靶的相互作用<sup>[265]</sup>。这种近似对于轻原子系统和入射电子具有相对较大速度时是合理的,但对于重原子对涡旋电子的弹性散射,需引入能全面描述电子与原子相互作用的全阶理论,以深入探究超越一级玻恩近似的高阶效应<sup>[266]</sup>。当两个涡旋电子束发生弹性散射时,会产生一种独特的相位效应,出现干涉条纹并表现为方位角不对称性,这是平面波散射和单涡旋粒子散射所不具备的特征<sup>[267]</sup>。同样,两束涡旋粒子间的散射也会出现类似的效应,这些测量结果在量子物理学中也显示出其价值,特别是在研究介子产生、核子共振以及小角度弹性散射等领域,为探索粒子物理的基本力和粒子结构提供了新的视角和实验验证手段<sup>[50,268-269]</sup>。

涡旋电子与原子体系的非弹性散射过程存在OAM转移的可能性,通过后选择技术,即通过分析散射后电子的OAM和横向动量分布的任何组合,理论上可以从复杂的散射数据中筛选出特定的非弹性跃迁信号。实现横向动量的后选择通常需要借助于探测器的几何结构设计、特定的探测区域孔径和透镜孔径的选择等方式。然而在电子显微镜中实现这种OAM的选择性检测仍面临技术挑战,限制了其广泛应用<sup>[206]</sup>。在一级玻恩近似框架下,多个研究组对 $(e,2e)$ 过程,即一个入射电子与原子或分子相互作用,导致一个电子被电离并产生两个散射电子的现象,进行了深入研究,对比了使用平面波电子束和涡旋电子束作为入射源时的三重微分截面和五重微分截面,为理解电子与原子系统的相互作用提供了新的视角<sup>[270-273]</sup>。此外,涡旋电子在其他基本原子过程中,如轫致辐射和辐射组合中的行为,也得到了全面而深入的相对论性非微扰理论分析。这些研究特别强调了涡旋电子张角对过程结果的显著影响,证明了光子的辐射特性,包括它们的角度分布和偏振状态,会随着涡旋电子不同张角而变化<sup>[274-275]</sup>。这些发现为设计利用电子的OAM进行精密操控的实验和潜在应用提供了理论支撑,如在量子信息处理、高精度测量技术及先进成像技术等领域<sup>[276]</sup>。

Sherwin开展了一系列工作,涉及涡旋中子在正氢和准氢的宏观和介观靶上的散射现象<sup>[277]</sup>,涡

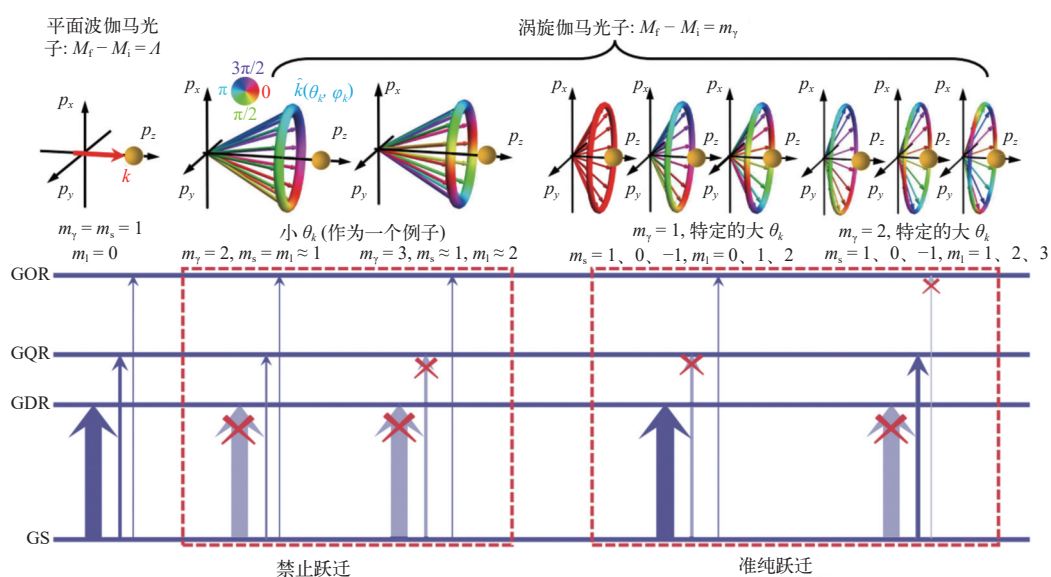
旋正电子与平面波电子碰撞导致的双光子湮灭过程<sup>[278]</sup>, 电子处于静止状态时高能涡旋光子的双康普顿散射<sup>[279]</sup>, 与电子的质能相当的涡旋光子的康普顿散射<sup>[280]</sup>以及任意初始速度的平面波电子和涡旋光子的康普顿散射<sup>[281]</sup>。他的研究揭示了散射光子的角分布和偏振如何依赖于入射涡旋束的张角、OAM 投影等参数, 并研究了涡旋叠加态对这些过程的影响。另外, 在电子静止参考系中探讨涡旋光子的康普顿散射的一项研究表明, 不同 OAM 的涡旋光子叠加时散射光子的角分布不同于纯 OAM 本征态的情况, 在偶极子近似下, 这些差异在  $\Delta m > 2$  时消失, 此结论对于原子物理领域特别有趣, 因为原子和分子系统中也经常涉及到偶极相互作用和多极跃迁<sup>[282]</sup>。使用 LG 函数来表征涡旋光子的康普顿散射研究亦有所展开, 在同时测量末态电子和光子时, 可依据散射结果识别出入射光子的角动量以及 LG 函数的节点数特征, 为涡旋光子的识别和应用开辟了新途径<sup>[54]</sup>。通过激光与高能涡旋电子的逆康普顿散射效应则可以构建具有不同空间结构特征的 X 射线<sup>[283]</sup>。这一系列的研究不仅丰富了对涡旋粒子散射物理的认识, 还为实验技术和未来新型光源的发展提供了理论基础。

## 5.2 涡旋粒子参与的核反应过程

等矢量巨四极共振 (isovector giant quadrupole resonance, IVGQR) 的详细研究能提供核有效质量、核有效相互作用的等矢量部分以及核对称能密度依赖性的宝贵信息, 这些对于核结构理论的发展和核天体物理模型的校验极为重要<sup>[284-285]</sup>。IVGQR 的直接探测之所以困难, 是因为在自然条件下它通常不是核反应的主要输出, 而且其信号经常会被其他更强的核反应模式所掩盖, 特别是 E1 和 M1 跃迁。由于电子与核的相互作用同时涉及多种多极性, 包括 E1、M1、E2 等, 因此从实验数据中准确分离出 IVGQR 的贡献变得复杂, 导致报告的跃迁强度和共振宽度等参数存在较大的分布<sup>[286]</sup>。在光核反应中, IVGQR 只是一个很小的成分, 采用强烈的、单能性好且线偏振的伽马射线束提供了一种可能的解决方案。通过观察 E1-E2 干涉项, 理论上可以提取 IVGQR 的信息, 但这要求极高的实验精确度和对实验条件的精细控制<sup>[286-287]</sup>。然而, 将涡旋光子引入可能会潜在地改

变选择规则, 并使更高的多极激发的单独提取成为可能<sup>[288]</sup>。如图 10 所示, 传统平面波伽马光子的电磁跃迁遵循较为宽松的选择规则  $|J_i - J_f| \leq J \leq J_i + J_f$ ,  $M_f - M_i = A$ 。然而对于 TAM 是  $m_\gamma$  的涡旋伽马光子, 当原子核位于涡旋轴上时, 由于角动量守恒定律, 选择规则修改为  $M_f - M_i = m_\gamma$ , 因此多极电磁跃迁  $J < |m_\gamma|$  被禁止。涡旋光子的张角对跃迁的选择性也有影响, 特定张角会导致  $J = |m_\gamma| + 1$  的跃迁在实验上不可见, 从而使得  $J = |m_\gamma|$  跃迁成为主导, 这为选择性地激发特定多极性的共振提供了可能。通过精确控制涡旋光子的  $m_\gamma$ , 研究者能有针对性地激发并研究特定的高阶多极共振, 比如使用  $m_\gamma = 2$  的涡旋光子能专一性地探测 IVGQR, 而几乎不受 E1 跃迁的干扰。而涡旋伽马光子的诊断可通过测量核光子吸收截面实现<sup>[289]</sup>。涡旋伽马光子的应用不仅为探索高阶多极跃迁提供了新的实验手段, 还为核物理领域带来了革命性的研究方法, 有望深化我们对原子核内部动力学和结构的理解。

Xu 等研究覆盖了 138 种原子核, 这些核素因在核天体物理学和核结构研究中具有重要意义而被选中; 详细探讨了当用涡旋光子激发原子核巨共振的衰变特性, 特别是伽马射线辐射和中子产生的截面如何随涡旋光子的不同张角而变化; 成功地确定了特定多极性的巨共振强度函数, 特别是在较低能量范围内能够提取巨四极共振的强度函数<sup>[290]</sup>。<sup>229</sup>Th 原子核因其独有的低能量跃迁 (仅 8 eV) 使其成为构建下一代超精密核时钟的理想候选者。这类核时钟可以通过调谐到特定频率的真空紫外线 (vacuum ultraviolet, VUV) 光来激发, 这一过程涉及 M1 和 E2 的多极转换, 利用涡旋光束进行驱动可能更加高效。在探索实现这种核时钟的技术路径时, 研究界关注两种主要方法<sup>[291]</sup>。第 1 种方法涉及离子阱中的单离子核钟<sup>[292]</sup>。这种设置对外部场扰动具有很强的抵抗力, 能大幅抑制所有外部场导致的时钟漂移, 包括二次塞曼效应, 并保证了很高的准确性, 然而, 由于每个原子核的激发概率非常低, 这对实验技术和探测灵敏度提出了极高的要求。尽管涡旋光与平面波在总激发效果上可能没有显著差异, 但涡旋光的空间激发模式更为复杂, 为实验设计提供了新的维度。第 2 种方法涉及使用 Th 掺杂的 VUV 透明晶



$m_i$  ( $m_s$ ) 是伽马光子的 OAM(SAM) 在其传播方向上的投影,  $m_i = m_f - m_s$ , 螺旋度  $A=1$ 。  $M_i$  ( $M_f$ ) 是原子核初始(最终)状态伽马光子传播方向上的 TAM 的投影。 将基(GS)与巨偶极共振(GDR)、巨四极共振(GQR)和巨八极共振(GOR)连接起来的箭头分别表示多极性  $J=1, 2, 3$  的电磁跃迁。 禁止跃迁表示禁止具有  $J < |m_i|$  的电磁跃迁(对于所有张角), 而准纯跃迁表示主要由  $J = |m_i|$  贡献的电磁跃迁(对于特定的张角)

图 10 由光束轴上的平面波或涡旋伽马光子激发的偶偶原子核的核响应场景<sup>[289]</sup>

Fig. 10 Scenario of nuclear responses for even-even nuclei excited either by plane wave or vortex gamma photons on beam axis<sup>[289]</sup>

体的固态核钟<sup>[293]</sup>。它可以同时询问大量掺杂的原子核,从而获得优异的信噪比和更高的稳定性。对于单个量子化轴,宏观样品中的涡旋激发可能具有不同的特征,但考虑到所有晶体取向,总体结果与平面波激发相似<sup>[294]</sup>。无论是哪种方法,<sup>229</sup>Th 核时的发展都预示着时间测量精度的巨大飞跃,这将对卫星导航系统的精度提升<sup>[295]</sup>、暗物质的间接探测<sup>[296]</sup>以及基本物理常数是否随时间变化<sup>[297]</sup>等基础科学问题的研究带来革命性的影响。核时钟的精确性是现代科技和基础科学研究不可或缺的工具,它们的发展直接关系到我们对宇宙最深层规律的理解。

总之,涡旋光子的高 OAM 值和相干性使其成为潜在的精密探测工具。在核物理实验中,使用涡旋光子可能提高对核反应参数(如核半衰期、反应截面、衰变分支比等)的测量精度。或者引发一系列非典型核反应,如激发核的高自旋态、引发核形状变换,甚至触发新的核同质异能态生成。这些高角动量核态可能具有不同的放射性性质、衰变模式和能量分布,为核结构研究提供新的窗口。甚至导致核反应产物分布的调控。例如,通过控制入射涡旋光子的 OAM 值,有可能实

现对核裂变碎片的质量分布、发射角度以及伴随粒子的特性进行精细调整。这对于核反应工程、核燃料增殖与嬗变、以及放射性废物管理等领域可能具有重要意义。随着相关技术的发展和实验验证工作的推进,涡旋光子在核反应领域的潜在影响将得到更深入的探索和利用。

自由电子进入高荷重离子束缚态的辐射复合(radiative recombination, RR)是相对论性离子-电子以及离子-原子在存储环上碰撞的主要过程之一。关于涡旋电子与裸离子的 RR 现象,已有非相对论性的研究,这种方法在处理较慢速的轻离子碰撞时显得较为合适,并揭示了角度分布和极化特性对运动学参数(例如横向动量与纵向动量之比)的高度敏感性,这为观察涡旋电子在  $k$  壳层的辐射复合现象提供了更多细节信息<sup>[235]</sup>。然而,面对涉及重核系统的相互作用过程,需全面考虑核结合强度参数  $\alpha Z$  的所有阶次影响的理论模型,通过构建涡旋电子在原子核长程库仑场中的相对论波函数来实现。该波函数的渐近形式结合了自由涡旋波和向外球面波,这一构造使得理论能够推导单个离子偏离涡旋电子传播方向进行辐射复合的概率,并用来考虑宏观靶这一更现实的实验



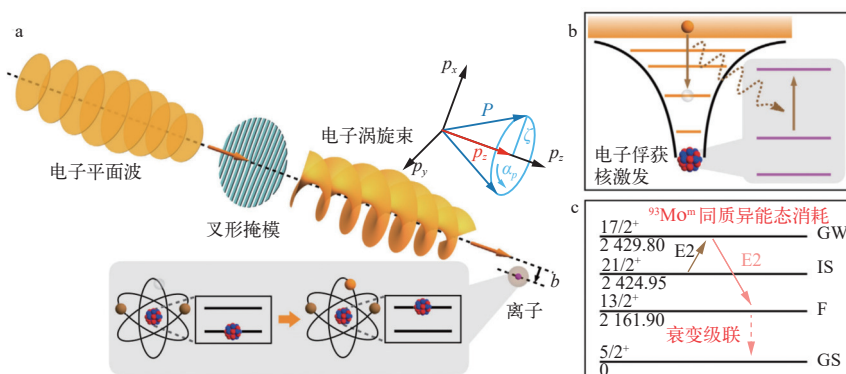
场景。值得注意的是, 研究发现辐射复合过程中光子的偏振特性受涡旋电子张角的影响显著, 甚至在某些条件下光子的线性偏振方向会反转, 即从常规平面波情况下的平行于反应平面变为垂直于反应平面。此外, 针对涡旋电子处于叠加态的情况, 研究还探讨了微分截面角度分布的不对称性, 发现这种不对称性在  $\Delta m = \pm 1$  时最为显著, 并且随着  $\Delta m$  的增加而减弱。这些结果不仅增进了我们对 RR 过程基本物理机制的理解, 也为实验上探测和利用涡旋电子的独特性质提供了理论指导<sup>[236]</sup>。

RR 过程中的偏振测量确实为探究高能领域中电子-光子相互作用的深层次物理提供了独特的视角, 尤其是涉及到相对论效应、多体系统交互、磁相互作用乃至量子电动力学的微妙影响<sup>[298-299]</sup>。通过观察复合光子的线偏振特性, 能够间接监测离子内部的 SAM 排列, 这是由于光子的偏振状态与其生成环境的自旋动力学紧密相关。特别是, 类氢重离子纵向偏振导致的  $k$  壳层复合光子线性偏振转出反应平面的现象, 为研究离子 SAM 状态提供了一个新颖且敏感的方法<sup>[300]</sup>。在此基础上, 涡旋电子的 RR 过程引起了研究者的兴趣, 因为它可能比传统平面波电子在离子束自旋诊断上更为高效。通过分析涡旋电子与重离子  $U^{91+}$  (从类氢态最终演化到类氦态) 的辐射复合过程, 研究者关注了辐射光子的斯托克斯参数。对于非结构化离子束, 利用  $k$  壳层 RR 光子的线偏振转出反应平面的特性, 可以显著提升对离子 SAM 状态的探测灵敏度。而在结构化离子束的案例中, 考虑涡旋电子捕获至  $U^{91+}$  离子基态时, 由于局部强度和磁性亚态分布随离子在束中位置的变化,  $k$ -RR 光子的偏振动态成为了研究离子复杂内部结构的宝贵线索。掌握这种极化动力学机制对于探索高电荷离子中宇称破坏等高级原子物理现象至关重要<sup>[301]</sup>。

相较于对 RR 过程中光子特性的详细了解, 对由涡旋电子捕获产生的离子性质的探索尚处于初级阶段。理论研究聚焦于涡旋电子与裸离子的相互作用, 特别是在未观测到辐射光子的情况下, 深入分析了残余类氢离子的磁性亚态分布。这些研究揭示了一个关键点: 最终离子的磁性亚态分布及其产生概率不仅与离子的精细结构状态有

关, 还显著依赖于入射涡旋电子的 OAM 轴相对于离子的位置参数  $b$ 。这一发现意味着, 通过精确控制涡旋电子的参数, 理论上可定制具有特定内部结构的离子束, 这为合成具有独特性质的离子束提供了新的思路。为更好理解定制离子束的结构, 我们考虑了涡旋电子与铀离子的基态  $1S_{1/2}$  和激发态  $2P_{3/2}$  态复合, 产生的类氢离子束将呈现多环强度分布和复杂的自旋模式, 这样的离子束不仅展示了丰富的物理现象, 也为原子物理、固体物理乃至量子信息科学的研究提供了新颖的实验平台。目前在存储环设施中这类实验是可行的, 产生的离子束可以通过弯曲磁环中的磁体分离, 进一步研究这些结构化离子束在强磁场中的动力学行为<sup>[302]</sup>。除此之外, 还有其他一些涉及离子的相互作用过程被提及, 这些过程在产生高能涡旋光子方面具有一定意义<sup>[192, 229-230, 232, 234]</sup>, 在前面已被提到。

核同质异能态作为能量储存介质的潜力, 为能量释放的精确控制开辟了新的可能性, 它们向较低能级的直接衰变受到强烈抑制。在一些具有有利能级配置的原子核中, 激发到高于同质异能态状态的能级(称为网关态)可以直接导致衰变到低于同质异能态本身的能级, 从而在称为二分异能态耗尽的过程中快速级联衰变达到基态。一典型的例子是 2425 keV 的  $^{93}\text{Mo}^m$  同质异能态, 其半衰期为 6.8 h, 从同质异能态到 2430 keV 的网关态的 4.85 keV 激发应在 4 ns 内释放全部存储的能量。电子俘获核激发 (nuclear excitation by electron capture, NEEC) 作为一种精密的核操控手段, 通过巧妙地利用电子与原子核的相互作用, 实现了对外部驱动向原子核网关状态过渡的高效控制。在 NEEC 过程中, 当一个自由电子被原子吸引并填充到一个高能级的空位时, 这一能量传递是高度选择性的, 意味着电子的动能加上它将要填充的原子轨道的结合能, 必须精确等于原子核从初始同质异能态到目标网关态所需的激发能<sup>[303]</sup>。最近的一些研究表明, 离子的非平衡状态<sup>[304]</sup> 或不同形状的电子波函数<sup>[175]</sup> 会影响 NEEC 截面。为此设计了利用涡旋电子束实现同质异能态核衰变外部控制的方案, 如图 11 所示, 涡旋电子重新组合到同质异能态的原子壳层中, 可以使储存的核能得到有控制的释放。以  $^{93}\text{Mo}^m$  为例, 理论研究表



a——入射到叉形掩模上的平面波电子束产生涡旋电子束,当这些电子以影响参数  $b$  碰撞到离子束上时,电子重新组合成原子空位;  
b——在共振连续电子能量下,NEEC 过程中电子复合(左边为橙色原子壳能级)会伴随着核激发(右边为洋红色核态);c—— $^{99}\text{Mo}$  部分能级结构图。核同质异能态(isomeric, IS)、网关态(gateway, GW)、中间(intermediate, F)和基态(ground state, GS)能级用它们的自旋、宇称和能量(keV)来标记,从 IS 到 GW 以及 GW 到 F 的跃迁均为 E2 类型,能量间隔未按比例绘制

图 11 涡旋电子束对核同质异能态消耗的动态控制<sup>[305]</sup>

Fig. 11 Dynamical control of nuclear isomer depletion via electron vortex beams<sup>[305]</sup>

明,与同质异能态的自发核衰变相比,使用定制的涡旋电子束能使耗散效率提升 4 个数量级。此外,特定的轨道可以使涡旋电子束的组合截面提高多达 6 个数量级<sup>[305]</sup>。这意味着,通过精细调节电子的自旋轨道特性,可精准地触发核同质异能态的衰变,为核能的受控释放提供了一种前所未有的技术路径。

对于涡旋中子参与的过程,我们先介绍最简单的核反应,假设入射的中子或光子束处于涡旋态,推导了质子捕获中子及其逆过程氘核的光衰变相应的跃迁振幅,并深入讨论了涡旋冷中子和光子束实验的意义<sup>[47]</sup>。在施温格过程中,涡旋中子的引入改变了散射截面的角度依赖性,其中振幅的吸收部分是造成横向自旋不对称的关键因素。涡旋叠加态的使用则进一步引入了对中子自旋纵向分量的依赖,丰富了散射过程的复杂性。当考虑了相对于光束轴具有固定横向位置的单个原子核上的散射时,自旋不对称性是由于纵向和横向自旋的共同作用,且与核振幅的实部和吸收部分相关。这些自旋轨道诱导的效应促进了中子束量子层析成像技术的开发,并且能够对依赖于散射角和中子能量的复杂核振幅进行研究<sup>[306]</sup>。对于定域良好的靶和/或高角分辨率的设置,我们证明可能的自旋不对称在百分之几十,而对于宏观靶,经过对原子核位置进行平均后,效应可能降低到  $10^{-6}$ ,现有的研究宇称破坏效应的实验计划在测量更小的  $10^{-8}$  不对称<sup>[307]</sup>,这在现有的中子

设施中是可测量的<sup>[308]</sup>。在实验核物理和核反应理论中,考虑涡旋中子参与的核反应可引出全新的研究方向,如出现非弹性散射通道和奇异的散射角分布、激发原子核内部的高阶多重极态、改变某些核反应过程的概率和产物分布甚至设计新类型的核反应器以优化反应效率或实现新的核能转换机制。

## 6 总结与展望

OAM 作为粒子除 SAM 以外的另一个关键自由度,已在多个前沿科学领域引发了热烈的研究热潮,特别是在量子信息科学、光学通信、物质探测技术、粒子物理以及核物理等学科中,皆展现出前所未有的潜力与挑战。其核心议题集中在提高拓扑荷、优化横向相干长度以及调控 SAM 与 OAM 耦合,这些成为推进各领域前沿发展的关键要素。尽管 OAM 的应用和技术实施面临重重难关,如何高效稳定地产生和操控 OAM 态、如何优化传输与检测机制以及如何将 OAM 概念融入到现有实验设备和技术中,但这些挑战恰恰也为 OAM 在未来科学技术领域的革新和发展提供了无限可能。表 2 所列涡旋粒子的产生技术和其参与的各种散射过程的研究,已经揭示了 OAM 这一自由度所带来的丰富物理效应和新的理论认识。无论是通过精心设计的光学器件实现涡旋光束的产生,还是利用涡旋电子进行原子和分子的精密探测,都在不断地拓宽我们对自然界深层次结构

表 2 当前涡旋粒子研究进展概览  
Table 2 Current progress overview of vortex particle research

研究内容	不同种类粒子的研究进展			
	涡旋光子	涡旋电子	涡旋中子	涡旋原子(分子)
产生方式	涵盖从空间产生方法 <sup>[56]</sup> 、光纤技术 <sup>[92]</sup> 到高次谐波产生策略 <sup>[103]</sup> , 未来集成光子学平台预示着更紧凑高效的产生机制	包括已验证的相位板技术 <sup>[144]</sup> 、全息衍射 <sup>[128]</sup> 、电子光学方法 <sup>[152]</sup> , 及借助手性等等离子体近场实现超快生成 <sup>[182]</sup> , 未来拓扑绝缘体与异质结构的结合可能开辟新方式	相位板技术 <sup>[164]</sup> , 衍射光栅 <sup>[170]</sup> 等方法已经在实验上证实; 高级中子干涉仪, 利用电磁场实现自旋轨道耦合 <sup>[173]</sup> 等方法正在积极探索	已有实验报道通过光栅衍射 <sup>[180]</sup> 产生, 其他理论研究涵盖了利用原子透镜 <sup>[176]</sup> 、叉形掩模 <sup>[177]</sup> 及超冷原子间的相互作用 <sup>[29]</sup> 等策略
探测手段	包括已验证的干涉衍射测量 <sup>[115]</sup> 、坐标转换技术 <sup>[123]</sup> 、深度学习 <sup>[124]</sup> 及等离子体激元法 <sup>[14]</sup> , 未来探测技术将整合超分辨率成像、拓扑光谱分析和量子传感技术, 开启探测手段新纪元	成功应用的手段涵盖了干涉衍射测量 <sup>[6]</sup> 、模式转换分析 <sup>[157]</sup> 、图像旋转 <sup>[158]</sup> 及利用涡旋电子束实现原子级分辨率的材料特性反演 <sup>[159]</sup> , 未来探测技术的前沿或将迎来量子点探测器的应用以及自旋-轨道耦合增强的探测等	诸如干涉法与磁性元件的应用 <sup>[171]</sup> , 已在实验层面获得了实质性的验证; 而借助散射实验对涡旋中子进行的间接探测 <sup>[174]</sup> , 则多半尚处于理论分析与实验规划阶段	干涉与衍射分析法 <sup>[180]</sup> 已在实验上得到了验证, 未来还有可能发展直接成像法、散射分析等
应用场景	在操控原子与分子旋转 <sup>[38]</sup> 、与原分子相互作用 <sup>[35]</sup> 方面已有实验佐证。在核探测与成像、核医学放射疗法等核物理领域的潜力正逐步显露 <sup>[289]</sup>	在电子显微镜下的相关实验得以开展 <sup>[150]</sup> , 其他主要聚集于理论探索层面, 具体涵盖手性分子识别 <sup>[127]</sup> 、局部磁性灵敏度提高 <sup>[132]</sup> , 在外部电磁场的演化 <sup>[137]</sup> , 核激发态的探测 <sup>[305]</sup> 等领域	在超冷原子和分子系统 <sup>[277]</sup> , 磁性材料的拓扑性质和磁结构、与原子核相互作用的深层次机制 <sup>[308]</sup> 、探索核子在核内的运动状态和分布 <sup>[47]</sup> 等研究都处于探索阶段	实验上已经观察到了超冷原子气体中的涡旋激发 <sup>[180]</sup> , 量子纠缠与信息编码、涡旋原子分子参与的相互作用仍在探索阶段
关键参数	涡旋 X 射线的成功标志着重大技术跨越 <sup>[104-105]</sup> , 目前拓扑荷数可达 10 010 <sup>[62]</sup>	涡旋电子的动能可达 300 keV, 并能被聚焦至约 0.1 nm 的焦距尺寸 <sup>[4]</sup> , 其拓扑荷数在千量级 <sup>[142]</sup>	涡旋中子的拓扑荷数可达 7, 横向相干长度在 $\mu\text{m}$ 量级 <sup>[170]</sup> , 具备 11 MeV 的能量及 0.27 nm 的波长 <sup>[164]</sup>	于氦原子而言, 相应的德布罗意波长为 90 pm, 拓扑荷数至 6, 横向相干长度 840 nm <sup>[180]</sup>

和相互作用原理的认知边界。特别是在高能物理领域, 尽管已经建立起描述高能涡旋粒子碰撞的初步理论框架, 并将其应用于诸如量子电动力学的基本散射过程, 但如何在实验上产生和利用高能涡旋粒子, 仍是一个充满挑战且亟待深入研究的课题。通过研究高能涡旋粒子与原子核和强子的相互作用, 能够以全新的视角和手段揭示原子核内部的核子动力学特性, 以及 SAM 和 OAM 对质子自旋贡献等深层物理问题, 这无疑将推动相关领域向前迈出一大步。

涡旋光子的 OAM 特性为信息编码开辟了新维度, 使得单个粒子能够承载多比特信息, 为量子算法的复杂度和量子门操作的丰富性提供强大支撑。研究重点包括涡旋光子在不同介质中的传输特性, 尤其是损耗和色散效应, 以及通过超材料和超表面技术实现光子路径与性质的精确调控, 这些都是实现高效量子通信和长距离光操控的核心。此外, 多涡旋光子间的干涉与 OAM 交换现象, 为开发高级光束操控和编码策略奠定了基础。涡旋电子在强电磁场中的行为, 特别是其辐射模式

的多样性, 为量子电动力学效应提供了新的视角, 涉及到辐射的方向性、偏振态、角动量转移和能谱分布的变化, 这对理解宇宙极端条件下的物理现象至关重要。在磁约束聚变领域, 涡旋电子对等离子体加热、电流驱动及能量传输的潜在贡献, 为提升聚变效率和等离子体稳定性开辟了新路径, 对理解太阳风、磁层物理和实验室等离子体行为有重要意义。此领域的发展需依赖于跨越量子与经典界限的理论模型和精确数值模拟, 以揭示复杂物理过程。涡旋中子以其独特的量子交互能力, 在探索凝聚态物质内部的磁性结构(如斯格明子)和高温超导性方面展现独特优势, 超越了传统中子散射技术的极限, 为深入理解这些复杂现象提供了新颖而深入的视角。涡旋粒子的研究不仅在理论上拓展了我们对自然界基本规律的认知, 也在实践上孕育着量子技术、聚变能源、材料科学等领域革命性的技术进步。未来的研究将集中于更精细的粒子控制、环境适应性优化以及理论模型的深化, 以期解锁更多未知的科学奥秘并推动技术革新。

涡旋粒子在核反应机制研究领域的崭露头角,标志着核物理学的一次重大飞跃,它不仅挑战传统认知,更预示着新科学发现与技术革新的广阔天地。涡旋粒子在核反应中的关键作用之一是其 OAM 的传递。这直接影响反应产物的动能分配、发射角度和自旋状态,为理解核反应的微观光学模型提供了新的视角。通过精确测量这些输出参数,可以揭示反应过程中核力的细节和动态机制。涡旋粒子由于其独特的量子态,可能诱发常规直线碰撞模型之外的核反应路径,如通过特定的角动量耦合或共振效应,为发现新核素和理解极端条件下的核反应机制提供了新途径。具有特定 SAM 和 OAM 的涡旋粒子可以作为精细的探针来激发和研究核同质异能态,包括形状和旋转相关的同质异能,从而深化我们对原子核内部结构和动力学的认识。量子纠缠现象在涡旋粒子与核子或复合核间的出现,是量子信息科学与核物理学的前沿交集,为检验基本量子力学原理在复杂核体系中的应用提供了宝贵的实验平台,同时也对理解和预测核反应的统计特性和动力学行为提出了新的挑战。基于涡旋粒子核相互作用的深入理解,正催生新型粒子束治疗、核材料分析等尖端核技术的发展,这些技术不仅有望在医疗健康、国家安全等领域带来革命性进步,也将为材料科学和能源研究开辟新的路径。此外,涡旋粒子在恒星内部和宇宙射线过程中的潜在作用,使它们成为解开宇宙元素合成之谜和探索星际介质物理条件的关键钥匙。

#### 参考文献:

- [1] POYNTING J H. The wave motion of a revolving shaft, and a suggestion as to the angular momentum in a beam of circularly polarised light[J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 1909, 82(557): 560-567.
- [2] DRAGOMAN D, DRAGOMAN M. Other quantum/classical analogies[M]//Quantum-Classical Analogies. Berlin: Springer, 2004: 279-318.
- [3] BLIOKH K Y, KARIMI E, DENNIS M R, et al. Roadmap on structured waves[J]. *Journal of Optics*, 2023, 25(10): 103001.
- [4] BLIOKH K Y, IVANOV I P, GUZZINATI G, et al. Theory and applications of free-electron vortex states[J]. *Physics Reports*, 2017, 690: 1-70.
- [5] KNYAZEV B A, SERBO V G. Beams of photons with nonzero projections of orbital angular momenta: New results[J]. *Physics-Uspekhi*, 2018, 61(5): 449-479.
- [6] LLOYD S M, BABIKER M, THIRUNAVUKKARASU G, et al. Electron vortices: Beams with orbital angular momentum[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2017, 89(3): 035004.
- [7] ALLEN L, BEIJERSBERGEN M W, SPREEUW R J, et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. *Physical Review A*, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [8] BEIJERSBERGEN M W, ALLEN L, van der VEEN H E L O, et al. Astigmatic laser mode converters and transfer of orbital angular momentum[J]. *Optics Communications*, 1993, 96(1/2/3): 123-132.
- [9] ALLEN L, PADGETT M J, BABIKER M. IV: The orbital angular momentum of light[M]//Progress in Optics. Amsterdam: Elsevier, 1999: 291-372.
- [10] ALAM M S, GNAWALI R, HENDRICKSON J R, et al. Photonic integrated circuit for rapidly tunable orbital angular momentum generation using Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> ultra-low-loss phase change material[J]. *Advanced Optical Materials*, 2022, 10(20): 2200098.
- [11] KUTLUYAROV R V, FATKHIEV D M, STEPANOV I V, et al. Design and modeling of a photonic integrated device for optical vortex generation in a silicon waveguide[J]. *Computer Optics*, 2021, 45(3): 324-330.
- [12] STEPANOV I V, FATKHIEV D M, LYUBOPYTOV V S, et al. Wavelength-tunable vortex beam emitter based on silicon micro-ring with PN depletion diode[J]. *Sensors*, 2022, 22(3): 929.
- [13] CHEN R, ZHOU H, MORETTI M, et al. Orbital angular momentum waves: Generation, detection, and emerging applications[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2020, 22(2): 840-868.
- [14] GENEVET P, LIN J, KATS M A, et al. Holographic detection of the orbital angular momentum of light with plasmonic photodiodes[J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 1278.
- [15] SPEKTOR G, KILBANE D, MAHRO A K, et al. Revealing the subfemtosecond dynamics of orbital angular momentum in nanoplasmonic vortices[J]. *Science*, 2017, 355(6330): 1187-1191.
- [16] AHMED H, KIM H, ZHANG Y, et al. Optical metasurfaces for generating and manipulating optical vortex

- beams[J]. *Nanophotonics*, 2022, 11(5): 941-956.
- [17] HE H, HECKENBERG N R, RUBINSZTEIN-DUNLOP H. Optical particle trapping with higher-order doughnut beams produced using high efficiency computer generated holograms[J]. *Journal of Modern Optics*, 1995, 42(1): 217-223.
- [18] BEIJERSBERGEN M W, COERWINKEL R P C, KRISTENSEN M, et al. Helical-wavefront laser beams produced with a spiral phaseplate[J]. *Optics Communications*, 1994, 112(5/6): 321-327.
- [19] ITO A, KOZAWA Y, SATO S. Generation of hollow scalar and vector beams using a spot-defect mirror[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2010, 27(9): 2072-2077.
- [20] NAIDOO D, ROUX F S, DUDLEY A, et al. Controlled generation of higher-order Poincaré sphere beams from a laser[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10: 327-332.
- [21] FRANKE-ARNOLD S, ALLEN L, PADGETT M. Advances in optical angular momentum[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2008, 2(4): 299-313.
- [22] YAO A M, PADGETT M J. Orbital angular momentum: Origins, behavior and applications[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2011, 3(2): 161-204.
- [23] RUBINSZTEIN-DUNLOP H, FORBES A, BERRY M V, et al. Roadmap on structured light[J]. *Journal of Optics*, 2017, 19(1): 013001.
- [24] SIMPSON N B, ALLEN L, PADGETT M J. Optical tweezers and optical spanners with Laguerre-Gaussian modes[J]. *Journal of Modern Optics*, 1996, 43(12): 2485-2491.
- [25] GRIER D G. A revolution in optical manipulation[J]. *Nature*, 2003, 424: 810-816.
- [26] DASGUPTA R, AHLAWAT S, VERMA R S, et al. Optical orientation and rotation of trapped red blood cells with Laguerre-Gaussian mode[J]. *Optics Express*, 2011, 19(8): 7680-7688.
- [27] KUGA T, TORII Y, SHIOKAWA N, et al. Novel optical trap of atoms with a doughnut beam[J]. *Physical Review Letters*, 1997, 78(25): 4713-4716.
- [28] TABOSA J W R, PETROV D V. Optical pumping of orbital angular momentum of light in cold cesium atoms[J]. *Physical Review Letters*, 1999, 83(24): 4967-4970.
- [29] ANDERSEN M F, RYU C, CLADÉ P, et al. Quantized rotation of atoms from photons with orbital angular momentum[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97(17): 170406.
- [30] WRIGHT K C, LESLIE L S, BIGELOW N P. Optical control of the internal and external angular momentum of a Bose-Einstein condensate[J]. *Physical Review A*, 2008, 77(4): 041601.
- [31] MOLINA-TERRIZA G, TORRES J P, TORNER L. Management of the angular momentum of light: Preparation of photons in multidimensional vector states of angular momentum[J]. *Physical Review Letters*, 2002, 88(1): 013601.
- [32] GIBSON G, COURTIAL J, PADGETT M, et al. Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum[J]. *Optics Express*, 2004, 12(22): 5448-5456.
- [33] NAGALI E, SCIARRINO F, de MARTINI F, et al. Quantum information transfer from spin to orbital angular momentum of photons[J]. *Physical Review Letters*, 2009, 103(1): 013601.
- [34] VALLONE G, D'AMBROSIO V, SPONSELLI A, et al. Free-space quantum key distribution by rotation-invariant twisted photons[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(6): 060503.
- [35] SCHMIEGELOW C T, SCHULZ J, KAUFMANN H, et al. Transfer of optical orbital angular momentum to a bound electron[J]. *Nature Communications*, 2016, 7(1): 12998.
- [36] AFANASEV A, CARLSON C E, SCHMIEGELOW C T, et al. Experimental verification of position-dependent angular-momentum selection rules for absorption of twisted light by a bound electron[J]. *New Journal of Physics*, 2018, 20(2): 023032.
- [37] PICÓN A, MOMPART J, de ALDANA J R V, et al. Photoionization with orbital angular momentum beams[J]. *Optics Express*, 2010, 18(4): 3660-3671.
- [38] BABIKER M, POWER W L, ALLEN L. Light-induced torque on moving atoms[J]. *Physical Review Letters*, 1994, 73(9): 1239-1242.
- [39] BABIKER M, BENNETT C R, ANDREWS D L, et al. Orbital angular momentum exchange in the interaction of twisted light with molecules[J]. *Physical Review Letters*, 2002, 89(14): 143601.
- [40] LEMBESSIS V E, BABIKER M. Enhanced quadrupole effects for atoms in optical vortices[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(8): 083002.
- [41] SAKDINAWAT A, LIU Y. Soft-X-ray microscopy using spiral zone plates[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(18): 2635-2637.
- [42] STAMM C, PONTIUS N, KACHEL T, et al. Femtosec-

- ond X-ray absorption spectroscopy of spin and orbital angular momentum in photoexcited Ni films during ultrafast demagnetization[J]. *Physical Review B*, 2010, 81(10): 104425.
- [43] WATZEL J, PAVLYUKH Y, SCHAFFER A, et al. Optical vortex driven charge current loop and optomagnetism in fullerenes[J]. *Carbon*, 2016, 99: 439-443.
- [44] FUJITA H, SATO M. Ultrafast generation of skyrmionic defects with vortex beams: Printing laser profiles on magnets[J]. *Physical Review B*, 2017, 95(5): 054421.
- [45] RAVAL R. Mirrors in flatland[J]. *Nature*, 2003, 425: 463-464.
- [46] van VEENENDAAL M, McNULTY I. Prediction of strong dichroism induced by X rays carrying orbital momentum[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 98(15): 157401.
- [47] AFANASEV A, SERBO V G, SOLYANIK M. Radiative capture of cold neutrons by protons and deuteron photodisintegration with twisted beams[J]. *Journal of Physics G*, 2018, 45(5): 055102.
- [48] AFANASEV A, CARLSON C E, SOLYANIK M. Circular dichroism of twisted photons in non-chiral atomic matter[J]. *Journal of Optics*, 2017, 19(10): 105401.
- [49] IVANOV I P, KORCHAGIN N, PIMIKOV A, et al. Doing spin physics with unpolarized particles[J]. *Physical Review Letters*, 2020, 124(19): 192001.
- [50] IVANOV I P, KORCHAGIN N, PIMIKOV A, et al. Kinematic surprises in twisted-particle collisions[J]. *Physical Review D*, 2020, 101(1): 016007.
- [51] AFANASEV A, CARLSON C E, SOLYANIK M. Atomic spectroscopy with twisted photons: Separation of M1-E2 mixed multipoles[J]. *Physical Review A*, 2018, 97(2): 023422.
- [52] TAIRA Y, KATOH M. Generation of optical vortices by nonlinear inverse Thomson scattering at arbitrary angle interactions[J]. *The Astrophysical Journal*, 2018, 860(1): 45.
- [53] KATOH M, FUJIMOTO M, KAWAGUCHI H, et al. Angular momentum of twisted radiation from an electron in spiral motion[J]. *Physical Review Letters*, 2017, 118(9): 094801.
- [54] MARUYAMA T, HAYAKAWA T, KAJINO T. Compton scattering of  $\gamma$ -ray vortex with Laguerre Gaussian wave function[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 51.
- [55] AFANASEV A, CARLSON C E, MUKHERJEE A. Recoil momentum effects in quantum processes induced by twisted photons[J]. *Physical Review Research*, 2021, 3(2): 023097.
- [56] OLALEYE T M, RIBEIRO P A, RAPOSO M. Generation of photon orbital angular momentum and its application in space division multiplexing[C]//Proceedings of the Photonics, 2023. [S. l.]: MDPI, 2023.
- [57] HERNÁNDEZ-GARCÍA C, VIEIRA J, MENDONÇA J T, et al. Generation and applications of extreme-ultraviolet vortices[C]//Proceedings of the Photonics, 2023. [S. l.]: MDPI, 2023.
- [58] ZÜRCH M, KERN C, HANSINGER P, et al. Strong-field physics with singular light beams[J]. *Nature Physics*, 2012, 8: 743-746.
- [59] GARIEPY G, LEACH J, KIM K T, et al. Creating high-harmonic beams with controlled orbital angular momentum[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(15): 153901.
- [60] GÉNEAUX R, CAMPER A, AUGUSTE T, et al. Synthesis and characterization of attosecond light vortices in the extreme ultraviolet[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 12583.
- [61] HERNÁNDEZ-GARCÍA C, PICÓN A, SAN ROMÁN J, et al. Attosecond extreme ultraviolet vortices from high-order harmonic generation[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 111(8): 083602.
- [62] FICKLER R, CAMPBELL G, BUCHLER B, et al. Quantum entanglement of angular momentum states with quantum numbers up to 10, 010[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2016, 113(48): 13642-13647.
- [63] BAI X, LIANG X, JIN R, et al. Generation of OAM radio waves with three polarizations using circular horn antenna array[C]//Proceedings of the 2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Lisbon, Portugal: IEEE, 2015: 1-4.
- [64] GARCÍA-MERINO J A, MERCADO-ZÚÑIGA C, HERNÁNDEZ-ACOSTA M A, et al. Magnetic frequency identification by quantum interference in magnetoplasmonic carbon/metal nanostructures[J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2021, 266: 115048.
- [65] HURTADO-AVILES E A, VILA M, VILATELA J J, et al. Structured light using carbon nanostructures driven by Kerr nonlinearities and a magnetic field[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics: PCCP*, 2022, 24(2): 1081-1090.
- [66] KOTLYAR V V, KOVALEV A A, PORFIREV A P, et al. Three different types of astigmatic Hermite-Gaussian beams with orbital angular momentum[J]. *Journal of Optics*, 2019, 21(11): 115601.

- [67] LU J, CAO C, ZHU Z, et al. Flexible measurement of high-order optical orbital angular momentum with a variable cylindrical lens pair[J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 116(20): 201105.
- [68] PAN J, SHEN Y, WAN Z, et al. Index-tunable structured-light beams from a laser with an intracavity astigmatic mode converter[J]. *Physical Review Applied*, 2020, 14(4): 044048.
- [69] VOLYAR A, BRETSKO M, AKIMOVA Y, et al. Measurement of the vortex and orbital angular momentum spectra with a single cylindrical lens[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(21): 5748-5755.
- [70] ZHOU J, ZHANG W, CHEN L. Experimental detection of high-order or fractional orbital angular momentum of light based on a robust mode converter[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(11): 111108.
- [71] CHEN Y, ZHENG S, LI Y, et al. A flat-lensed spiral phase plate based on phase-shifting surface for generation of millimeter-wave OAM beam[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, 15: 1156-1158.
- [72] CHENG L, HONG W, HAO Z C. Design and implementation of planar reflection spiral phase plate for beams with orbital angular momentum[J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2017, 11(2): 260-264.
- [73] HUI X, ZHENG S, HU Y, et al. Ultralow reflectivity spiral phase plate for generation of millimeter-wave OAM beam[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2015, 14: 966-969.
- [74] KHONINA S N, USTINOV A V, LOGACHEV V I, et al. Properties of vortex light fields generated by generalized spiral phase plates[J]. *Physical Review A*, 2020, 101(4): 043829.
- [75] MASSARI M, RUFFATO G, GINTOLI M, et al. Fabrication and characterization of high-quality spiral phase plates for optical applications[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(13): 4077-4083.
- [76] RUFFATO G, MASSARI M, CARLI M, et al. Spiral phase plates with radial discontinuities for the generation of multiring orbital angular momentum beams: Fabrication, characterization, and application[J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(11): 111307.
- [77] STEGENBURGS E, BERTONCINI A, TRICHILI A, et al. Near-infrared OAM communication using 3D-printed microscale spiral phase plates[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2019, 57(8): 65-69.
- [78] WEI W, MAHDJOUBI K, BROUSSEAU C, et al. Horn antennas for generating radio waves bearing orbital angular momentum by using spiral phase plate[J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2016, 10(13): 1420-1427.
- [79] FANG X, REN H, GU M. Orbital angular momentum holography for high-security encryption[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14: 102-108.
- [80] REN H, BRIERE G, FANG X, et al. Metasurface orbital angular momentum holography[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 2986.
- [81] RUFFATO G, ROSSI R, MASSARI M, et al. Design, fabrication and characterization of Computer Generated Holograms for anti-counterfeiting applications using OAM beams as light decoders[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 18011.
- [82] GUO Z Y, QU S L, SUN Z H, et al. Superposition of orbital angular momentum of photons by a combined computer-generated hologram fabricated in silica glass with femtosecond laser pulses[J]. *Chinese Physics B*, 2008, 17(11): 4199-4203.
- [83] ANDERSEN J M, ALPERIN S N, VOITIV A A, et al. Characterizing vortex beams from a spatial light modulator with collinear phase-shifting holography[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(2): 404-409.
- [84] CUNHA A, FIGUEIRA G, ANDRE P. Enabling the study of photons orbital angular momentum for optical communications: Orbital angular momentum carrying beam modulation and demodulation using twisted nematic liquid crystal spatial light modulators[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2016, 48: 1-13.
- [85] FORBES A, DUDLEY A, McLAREN M. Creation and detection of optical modes with spatial light modulators[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2016, 8(2): 200-227.
- [86] LIAN Y, QI X, WANG Y, et al. OAM beam generation in space and its applications: A review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 151: 106923.
- [87] ZHU L, WANG J. Arbitrary manipulation of spatial amplitude and phase using phase-only spatial light modulators[J]. *Scientific Reports*, 2014, 49(1): 7441.
- [88] SLUSSARENKO S, MURASKI A, DU T, et al. Tunable liquid crystal Q-plates with arbitrary topological charge[J]. *Optics Express*, 2011, 19(5): 4085-4090.
- [89] DENG Z L, DENG J, ZHUANG X, et al. Facile meta-grating holograms with broadband and extreme angle tolerance[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7(1): 78.

- [90] WITKOWSKA A, LEON-SAVAL S G, PHAM A, et al. All-fiber LP<sub>11</sub> mode convertors[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(4): 306-308.
- [91] LIAN Y, YU Y, HAN S, et al. OAM beams generation technology in optical fiber: A review[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(5): 3828-3843.
- [92] RUSSELL P. Photonic crystal fibers[J]. *Science*, 2003, 299(5605): 358-362.
- [93] AL-ZAHRANI F A, KABIR M A. Ring-core photonic crystal fiber of terahertz orbital angular momentum modes with excellence guiding properties in optical fiber communication[C]//Proceedings of the Photonics, 2021. [S. l.]: MDPI, 2021.
- [94] PATCHKOVSKII S, SPANNER M. High harmonics with a twist[J]. *Nature Physics*, 2012, 8: 707-708.
- [95] BAHRDT J, HOLLDAK K, KUSKE P, et al. First observation of photons carrying orbital angular momentum in undulator radiation[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 111(3): 034801.
- [96] SASAKI S, McNULTY I. Proposal for generating brilliant X-ray beams carrying orbital angular momentum[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(12): 124801.
- [97] HEMSING E, DUNNING M, HAST C, et al. First characterization of coherent optical vortices from harmonic undulator radiation[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(13): 134803.
- [98] REBERNIK RIBIČ P, RÖSNER B, GAUTHIER D, et al. Extreme-ultraviolet vortices from a free-electron laser[J]. *Physical Review X*, 2017, 7(3): 031036.
- [99] KONG F, ZHANG C, BOUCHARD F, et al. Controlling the orbital angular momentum of high harmonic vortices[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 14970.
- [100] GAUTHIER D, RIBIČ P R, ADHIKARY G, et al. Tunable orbital angular momentum in high-harmonic generation[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 14971.
- [101] LIU P, YAN J, AFANASEV A, et al. Orbital angular momentum beam generation using a free-electron laser oscillator[EB/OL]. 2020, arXiv: 2007.15723. <http://arxiv.org/abs/2007.15723>.
- [102] HEMSING E, KNYAZIK A, O'SHEA F, et al. Experimental observation of helical microbunching of a relativistic electron beam [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, doi: 10.1063/1.3690900.
- [103] HEMSING E, MUSUMECI P, REICHE S, et al. Helical electron-beam microbunching by harmonic coupling in a helical undulator[J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102(17): 174801.
- [104] HEMSING E, MARINELLI A, ROSENZWEIG J. Generating optical orbital angular momentum in a high-gain free-electron laser at the first harmonic[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106(16): 164803.
- [105] HEMSING E, KNYAZIK A, DUNNING M, et al. Coherent optical vortices from relativistic electron beams[J]. *Nature Physics*, 2013, 9: 549-553.
- [106] MORGAN J, McNEIL B W J. X-ray pulse generation with ultra-fast flipping of its orbital angular momentum[J]. *Optics Express*, 2022, 30(17): 31171.
- [107] HEMSING E, ROSENZWEIG J. Coherent transition radiation from a helically microbunched electron beam [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, doi: 10.1063/1.3121207.
- [108] LIU P, YAN J, AFANASEV A, et al. Generation of superposed orbital angular momentum beams using a free-electron laser oscillator[J]. *Optics Express*, 2024, 32(2): 2235-2244.
- [109] MENDONÇA J. Emission of twisted photons from quantum vacuum[J]. *Europhysics Letters*, 2018, 120(6): 61001.
- [110] BRABETZ C, BUSOLD S, COWAN T, et al. Laser-driven ion acceleration with hollow laser beams [J]. *Physics of Plasmas*, 2015, doi: 10.1063/1.4905638.
- [111] MENDONÇA J T, THIDÉ B, THEN H. Stimulated Raman and Brillouin backscattering of collimated beams carrying orbital angular momentum[J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102(18): 185005.
- [112] VIEIRA J, MENDONÇA J. Nonlinear laser driven donut wakefields for positron and electron acceleration[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 112(21): 215001.
- [113] VIEIRA J, TRINES R M G M, ALVES E P, et al. Amplification and generation of ultra-intense twisted laser pulses via stimulated Raman scattering[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 10371.
- [114] VIEIRA J, TRINES R M G M, ALVES E P, et al. High orbital angular momentum harmonic generation[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(26): 265001.
- [115] LEACH J, PADGETT M J, BARNETT S M, et al. Measuring the orbital angular momentum of a single photon[J]. *Physical Review Letters*, 2002, 88(25): 257901.
- [116] HECKENBERG N R, McDUFF R, SMITH C P, et al. Generation of optical phase singularities by computer-generated holograms[J]. *Optics Letters*, 1992, 17(3): 221-223.



- [117] HARRIS M, HILL C A, TAPSTER P R, et al. Laser modes with helical wave fronts[J]. *Physical Review A*, 1994, 49(4): 3119-3122.
- [118] DAI K, GAO C, ZHONG L, et al. Measuring OAM states of light beams with gradually-changing-period gratings[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(4): 562-565.
- [119] HICKMANN J M, FONSECA E J S, SOARES W C, et al. Unveiling a truncated optical lattice associated with a triangular aperture using light's orbital angular momentum[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105(5): 053904.
- [120] MORENO I, DAVIS J A, PASCOGUIN B M, et al. Vortex sensing diffraction gratings[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(19): 2927-2929.
- [121] LEE J C T, ALEXANDER S J, KEVAN S D, et al. Laguerre-Gauss and Hermite-Gauss soft X-ray states generated using diffractive optics[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13: 205-209.
- [122] KOTLYAR V V, KOVALEV A A, PORFIREV A P. Astigmatic transforms of an optical vortex for measurement of its topological charge[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(14): 4095-4104.
- [123] BERKHOUT G C G, LAVERY M P J, COURTIAL J, et al. Efficient sorting of orbital angular momentum states of light[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105(15): 153601.
- [124] DEDO M I, WANG Z, GUO K, et al. OAM mode recognition based on joint scheme of combining the Gerchberg-Saxton (GS) algorithm and convolutional neural network (CNN)[J]. *Optics Communications*, 2020, 456: 124696.
- [125] LI J, ZHANG M, WANG D, et al. Joint atmospheric turbulence detection and adaptive demodulation technique using the CNN for the OAM-FSO communication[J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 10494-10508.
- [126] CHEN J, CHEN X, LI T, et al. On-chip detection of orbital angular momentum beam by plasmonic nanogratings[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2018, 12(8): 1700331.
- [127] JUCHTMANS R, BÉCHÉ A, ABAKUMOV A, et al. Using electron vortex beams to determine chirality of crystals in transmission electron microscopy[J]. *Physical Review B*, 2015, 91(9): 094112.
- [128] VERBEECK J, TIAN H, SCHATTSCHNEIDER P. Production and application of electron vortex beams[J]. *Nature*, 2010, 467: 301-304.
- [129] VERBEECK J, TIAN H, van TENDELOO G. How to manipulate nanoparticles with an electron beam?[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(8): 1114-1117.
- [130] LAROCQUE H, KAMINER I, GRILLO V, et al. "Twisted" electrons[J]. *Contemporary Physics*, 2018, 59(2): 126-144.
- [131] EDSTRÖM A, LUBK A, RUSZ J. Elastic scattering of electron vortex beams in magnetic matter[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(12): 127203.
- [132] GRILLO V, HARVEY T R, VENTURI F, et al. Observation of nanoscale magnetic fields using twisted electron beams[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 689.
- [133] ASENJO-GARCIA A, GARCÍA de ABAJO F. Dichroism in the interaction between vortex electron beams, plasmons, and molecules[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(6): 066102.
- [134] KARIMI E, MARRUCCI L, GRILLO V, et al. Spin-to-orbital angular momentum conversion and spin-polarization filtering in electron beams[J]. *Physical Review Letters*, 2012, 108(4): 044801.
- [135] BLIOKH K Y, BLIOKH Y P, SAVEL'EV S, et al. Semiclassical dynamics of electron wave packet states with phase vortices[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(19): 190404.
- [136] BLIOKH K Y, DENNIS M R, NORI F. Relativistic electron vortex beams: Angular momentum and spin-orbit interaction[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(17): 174802.
- [137] HAYRAPETYAN A G, MATULA O, AIELLO A, et al. Interaction of relativistic electron-vortex beams with few-cycle laser pulses[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 112(13): 134801.
- [138] KARLOVETS D V. Electron with orbital angular momentum in a strong laser wave[J]. *Physical Review A*, 2012, 86(6): 062102.
- [139] IVANOV I P, KARLOVETS D V. Detecting transition radiation from a magnetic moment[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(26): 264801.
- [140] KAMINER I, MUTZAFI M, LEVY A, et al. Quantum Čerenkov radiation: Spectral cutoffs and the role of spin and orbital angular momentum[J]. *Physical Review X*, 2016, 6: 011006.
- [141] YUAN J. Bright electron twistors[J]. *Nature*, 2014, 509: 37-38.
- [142] MAFAKHERI E, TAVABI A H, LU P H, et al. Realization of electron vortices with large orbital angular momentum using miniature holograms fabricated by electron beam lithography[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, doi: 10.1063/1.4977879.

- [143] TAVABI A H, ROSI P, RONCAGLIA A, et al. Generation of electron vortex beams with over 1000 orbital angular momentum quanta using a tunable electrostatic spiral phase plate[J]. *Applied Physics Letters*, 2022, doi: [10.48550/arXiv.2203.00477](https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.00477).
- [144] UCHIDA M, TONOMURA A. Generation of electron beams carrying orbital angular momentum[J]. *Nature*, 2010, 464: 737-739.
- [145] SHILOH R, LEREAH Y, LILACH Y, et al. Sculpturing the electron wave function using nanoscale phase masks[J]. *Ultramicroscopy*, 2014, 144: 26-31.
- [146] GRILLO V, KARIMI E, GAZZADI G C, et al. Generation of nondiffracting electron Bessel beams[J]. *Physical Review X*, 2014, 4: 011013.
- [147] McMORRAN B J, AGRAWAL A, ANDERSON I M, et al. Electron vortex beams with high quanta of orbital angular momentum[J]. *Science*, 2011, 331(6014): 192-195.
- [148] POHL D, RUSZ J, SPIEGELBERG J, et al. Towards atomic magnetic measurements with single electron vortex beams on nanocubes[C]//Proceedings of the European Microscopy Congress 2016. [S. l.]: Wiley Online Library, 2016.
- [149] SHILOH R, TSUR Y, REMEZ R, et al. Unveiling the orbital angular momentum and acceleration of electron beams[J]. *Physical Review Letters*, 2015, 114(9): 096102.
- [150] CLARK L, BÉCHÉ A, GUZZINATI G, et al. Exploiting lens aberrations to create electron-vortex beams[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 111(6): 064801.
- [151] MARRUCCI L, MANZO C, PAPARO D. Optical spin-to-orbital angular momentum conversion in inhomogeneous anisotropic media[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(16): 163905.
- [152] BÉCHÉ A, van BOXEM R, van TENDELOO G, et al. Magnetic monopole field exposed by electrons[J]. *Nature Physics*, 2014, 10: 26-29.
- [153] DIRAC P A M. Quantised singularities in the electromagnetic field[J]. *Proceedings of the Royal Society of London A*, 1931, 133(821): 60-72.
- [154] BÉCHÉ A, JUCHTMANS R, VERBEECK J. Efficient creation of electron vortex beams for high resolution STEM imaging[J]. *Ultramicroscopy*, 2017, 178: 12-19.
- [155] DWYER C, BOOTHROYD C, CHANG S, et al. Three-wave electron vortex lattices for measuring nanofields [J]. *Ultramicroscopy*, 2015, 148: 25-30.
- [156] TSESSES S, DAHAN R, WANG K, et al. Tunable photon-induced spatial modulation of free electrons[J]. *Nature Materials*, 2023, 22: 345-352.
- [157] MCMORRAN B J, AGRAWAL A, ERCIUS P A, et al. Origins and demonstrations of electrons with orbital angular momentum[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2017, 375(2087): 20150434.
- [158] GUZZINATI G, SCHATTSCHEIDER P, BLOKH K Y, et al. Observation of the Larmor and Gouy rotations with electron vortex beams[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(9): 093601.
- [159] ERNI R, ROSSELL M D, KISIELOWSKI C, et al. Atomic-resolution imaging with a sub-50-pm electron probe[J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102(9): 096101.
- [160] PUSHIN D A, HUBER M G, ARIF M, et al. Experimental realization of decoherence-free subspace in neutron interferometry[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(15): 150401.
- [161] KLEPP J, SPONAR S, HASEGAWA Y. Fundamental phenomena of quantum mechanics explored with neutron interferometers[J]. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2014, 2014(8): 082A01.
- [162] ANDERSON I S, MCGREEVY R L, BILHEUX H Z. Neutron imaging and applications: A reference for the imaging community[M]. New York: Springer, 2009.
- [163] LAROCQUE H, KAMINER I, GRILLO V, et al. Twisting neutrons may reveal their internal structure[J]. *Nature Physics*, 2018, 14: 1-2.
- [164] CLARK C W, BARANKOV R, HUBER M G, et al. Controlling neutron orbital angular momentum[J]. *Nature*, 2015, 525: 504-506.
- [165] CAPPELLETTI R L, JACH T, VINSON J. Intrinsic orbital angular momentum states of neutrons[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 120(9): 090402.
- [166] WAGH A G, ABBAS S, TREIMER W. The plain truth about forming a plane wave of neutrons[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2011, 634(1): S41-S45.
- [167] SARENAC D, CORY D G, NSOFINI J, et al. Generation of a lattice of spin-orbit beams via coherent averaging[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(18): 183602.
- [168] SARENAC D, KAPAHI C, CHEN W, et al. Generation and detection of spin-orbit coupled neutron beams[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(41): 20328-20332.
- [169] SARENAC D, NSOFINI J, HINCKS I, et al. Methods for preparation and detection of neutron spin-orbit

- states[J]. *New Journal of Physics*, 2018, 20(10): 103012.
- [170] SARENAC D, HENDERSON M E, EKINCI H, et al. Experimental realization of neutron helical waves[J]. *Science Advances*, 2022, 8(46): eadd2002.
- [171] NSOFINI J, SARENAC D, WOOD C J, et al. Spin-orbit states of neutron wave packets[J]. *Physical Review A*, 2016, 94: 013605.
- [172] GEERITS N, SPONAR S. Twisting neutral particles with electric fields[J]. *Physical Review A*, 2021, 103(2): 022205.
- [173] Le THIEN Q, MCKAY S, PYNN R, et al. Spin-textured neutron beams with orbital angular momentum[J]. *Physical Review B*, 2023, 107(13): 134403.
- [174] JACH T, VINSON J. Method for the definitive detection of orbital angular momentum states in neutrons by spin-polarized He<sub>3</sub>[J]. *Physical Review C*, 2022, 105(6): L061601.
- [175] MADAN I, VANACORE G M, GARGIULO S, et al. The quantum future of microscopy: Wave function engineering of electrons, ions, and nuclei[J]. *Applied Physics Letters*, 2020, doi: [10.1063/1.5143008](https://doi.org/10.1063/1.5143008).
- [176] HELSETH L E. Atomic vortex beams in focal regions[J]. *Physical Review A*, 2004, 69: 015601.
- [177] LEMBESSIS V E, ELLINAS D, BABIKER M, et al. Atom vortex beams[J]. *Physical Review A*, 2014, 89(5): 053616.
- [178] GAJDA M, LEWENSTEIN M, SENGSTOCK K, et al. Optical generation of vortices in trapped Bose-Einstein condensates[J]. *Physical Review A*, 1999, 60(5): R3381-R3384.
- [179] HAYRAPETYAN A G, MATULA O, SURZHYKOV A, et al. Bessel beams of two-level atoms driven by a linearly polarized laser field[J]. *The European Physical Journal D*, 2013, 67: 1-13.
- [180] LUSKI A, SEGEV Y, DAVID R, et al. Vortex beams of atoms and molecules[J]. *Science*, 2021, 373(6559): 1105-1109.
- [181] LEMBESSIS V E. Atomic Ferris wheel beams[J]. *Physical Review A*, 2017, 96: 013622.
- [182] VANACORE G M, BERRUTO G, MADAN I, et al. Ultrafast generation and control of an electron vortex beam via chiral plasmonic near fields[J]. *Nature Materials*, 2019, 18: 573-579.
- [183] KARLOVETS D V, SERBO V G. Effects of the transverse coherence length in relativistic collisions[J]. *Physical Review D*, 2020, 101(7): 076009.
- [184] POZZI G, GRILLO V, LU P H, et al. Design of electrostatic phase elements for sorting the orbital angular momentum of electrons[J]. *Ultramicroscopy*, 2020, 208: 112861.
- [185] TAVABI A H, ROSI P, ROTUNNO E, et al. Experimental demonstration of an electrostatic orbital angular momentum sorter for electron beams[J]. *Physical Review Letters*, 2021, 126(9): 094802.
- [186] BUSCH H. Berechnung der bahn von kathodenstrahlen im axialsymmetrischen elektromagnetischen feld[J]. *Annalen Der Physik*, 1926, 386(25): 974-993.
- [187] FLOETTMANN K, KARLOVETS D. Quantum mechanical formulation of the Busch theorem[J]. *Physical Review A*, 2020, 102(4): 043517.
- [188] KARLOVETS D. Vortex particles in axially symmetric fields and applications of the quantum Busch theorem[J]. *New Journal of Physics*, 2021, 23(3): 033048.
- [189] ZOU L, ZHANG P, SILENKO A J. Production of twisted particles in magnetic fields[J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2024, 57(4): 045401.
- [190] ZHANG C, XU P, JIANG X. Vortex electron generated by microwave photon with orbital angular momentum in a magnetic field[J]. *AIP Advances*, 2020, doi: [10.1063/5.0019899](https://doi.org/10.1063/5.0019899).
- [191] MARUYAMA T, HAYAKAWA T, KAJINO T, et al. Generation of photon vortex by synchrotron radiation from electrons in Landau states under astrophysical magnetic fields[J]. *Physics Letters B*, 2022, 826: 136779.
- [192] ZOU L, ZHANG P, SILENKO A J. Production of twisted particles in heavy-ion collisions[J]. *Journal of Physics G*, 2023, 50(1): 015003.
- [193] EPP V, JANZ J, ZOTOVA M. Angular momentum of radiation at axial channeling[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 2018, 436: 78-83.
- [194] ABDRAHIMOV S V, BOGDANOV O V, KAZINSKI P O, et al. Orbital angular momentum of channeling radiation from relativistic electrons in thin Si crystal[J]. *Physics Letters A*, 2018, 382(42/43): 3141-3145.
- [195] BOGDANOV O V, KAZINSKI P O, TUKHFATULLIN T A. Orbital angular momentum of radiation from relativistic planar channeled in Si crystal electrons[J]. *Physics Letters A*, 2022, 451: 128431.
- [196] BATURIN S S, GROSMAN D V, SIZYKH G K, et al. Evolution of an accelerated charged vortex particle in an inhomogeneous magnetic lens[J]. *Physical Review A*,

- 2022, 106(4): 042211.
- [197] DENNIS M R, O'HOLLERAN K, PADGETT M J. Singular optics: Optical vortices and polarization singularities[M]//Progress in Optics. Amsterdam: Elsevier, 2009: 293-363.
- [198] KRENN M, HANDSTEINER J, FINK M, et al. Twisted light transmission over 143 km[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2016, 113(48): 13648-13653.
- [199] SILENKO A J, ZHANG P, ZOU L. Manipulating twisted electron beams[J]. *Physical Review Letters*, 2017, 119(24): 243903.
- [200] SILENKO A J, ZHANG P, ZOU L. Relativistic quantum dynamics of twisted electron beams in arbitrary electric and magnetic fields[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(4): 043202.
- [201] SILENKO A J, ZHANG P, ZOU L. Electric quadrupole moment and the tensor magnetic polarizability of twisted electrons and a potential for their measurements[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 122(6): 063201.
- [202] GALLATIN G M, McMORRAN B. Propagation of vortex electron wave functions in a magnetic field[J]. *Physical Review A*, 2012, 86: 012701.
- [203] JENTSCHURA U D, SERBO V G. Compton upconversion of twisted photons: Backscattering of particles with non-planar wave functions[J]. *The European Physical Journal C*, 2011, 71(3): 1571.
- [204] JENTSCHURA U D, SERBO V G. Generation of high-energy photons with large orbital angular momentum by Compton backscattering[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106(1): 013001.
- [205] IVANOV I P. Creation of two vortex-entangled beams in a vortex-beam collision with a plane wave[J]. *Physical Review A*, 2012, 85(3): 033813.
- [206] van BOXEM R, PARTOENS B, VERBEECK J. Inelastic electron-vortex-beam scattering[J]. *Physical Review A*, 2015, 91(3): 032703.
- [207] KARLOVETS D V, BATURIN S S, GELONI G, et al. Generation of vortex particles via generalized measurements[J]. *The European Physical Journal C*, 2022, 82(11): 1008.
- [208] KARLOVETS D V, BATURIN S S, GELONI G, et al. Shifting physics of vortex particles to higher energies via quantum entanglement[J]. *The European Physical Journal C*, 2023, 83(5): 372.
- [209] WANG W, LIU S, LEI S, et al. Finite orbital-angular-momentum carried by the final electron and photon in plane-wave electron-nucleus bremsstrahlung[J]. *Physical Review Research*, 2022, 4(2): 023084.
- [210] WANG W, LEI S, GENG X, et al. Triple-vortex bremsstrahlung[J]. *New Journal of Physics*, 2022, 24(4): 043037.
- [211] BU Z, GENG X, LIU S, et al. Twisting relativistic electrons using ultra-intense circularly polarized lasers in the radiation-dominated QED regime[EB/OL]. 2023, arXiv: 2302.05065. <http://arxiv.org/abs/2302.05065>.
- [212] LEI S, BU Z, WANG W, et al. Generation of relativistic positrons carrying intrinsic orbital angular momentum[J]. *Physical Review D*, 2021, 104(7): 076025.
- [213] BU Z, JI L, LEI S, et al. Twisted Breit-Wheeler electron-positron pair creation via vortex gamma photons[J]. *Physical Review Research*, 2021, 3(4): 043159.
- [214] DANSON C N, HAEFNER C, BROMAGE J, et al. Petawatt and exawatt class lasers worldwide[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2019, 7: e54.
- [215] YOON J W, KIM Y G, CHOI I W, et al. Realization of laser intensity over  $10^{23}$  W/cm<sup>2</sup>[J]. *Optica*, 2021, 8(5): 630-634.
- [216] CHEN S, POWERS N, GHEBREGZIABHER I, et al. MeV-energy X rays from inverse Compton scattering with laser-wakefield accelerated electrons[J]. *Physical review letters*, 2013, 110(15): 155003.
- [217] COLE J, BEHM K, GERSTMAYR E, et al. Experimental evidence of radiation reaction in the collision of a high-intensity laser pulse with a laser-wakefield accelerated electron beam[J]. *Physical Review X*, 2018, 8: 011020.
- [218] ABABEKRI M, GUO R T, WAN F, et al. Vortex  $\gamma$  photon generation via spin-to-orbital angular momentum transfer in nonlinear Compton scattering[J]. *Physical Review D*, 2024, 109: 016005.
- [219] BOGDANOV O V, KAZINSKI P O, LAZARENKO G Y. Planar wiggler as a tool for generating hard twisted photons[J]. *Journal of Instrumentation*, 2020, 15(4): C04008.
- [220] BOGDANOV O, KAZINSKI P, LAZARENKO G. Semiclassical probability of radiation of twisted photons in the ultrarelativistic limit[J]. *Physical Review D*, 2019, 99(11): 116016.
- [221] KAZINSKI P O, RYAKIN V A. Radiation of twisted photons in elliptic undulators[J]. *Russian Physics Journal*, 2021, 64(4): 717-727.
- [222] TAIRA Y, HAYAKAWA T, KATOH M. Gamma-ray vortices from nonlinear inverse Thomson scattering of

- circularly polarized light[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 5018.
- [223] PETRILLO V, DATTOLI G, DREBOT I, et al. Compton scattered X-gamma rays with orbital momentum[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(12): 123903.
- [224] Di PIAZZA A, MÜLLER C, HATSAGORTSYAN K Z, et al. Extremely high-intensity laser interactions with fundamental quantum systems[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2012, 84(3): 1177-1228.
- [225] GONOSKOV A, BLACKBURN T G, MARKLUND M, et al. Charged particle motion and radiation in strong electromagnetic fields[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2022, 94(4): 045001.
- [226] GUO R-T, ABABEKRI M, ZHAO Q, et al. Generation of gamma-photons with extremely large orbital angular momenta[EB/OL]. 2023, arXiv: 231016306, 2023.
- [227] BANDYOPADHYAY P, BASU B, CHOWDHURY D. Relativistic electron vortex beams in a laser field[J]. *Physical Review Letters*, 2015, 115(19): 194801.
- [228] ALEKSANDROV I A, TUMAKOV D A, KUDLIS A, et al. Scattering of a twisted electron wavepacket by a finite laser pulse[J]. *Physical Review A*, 2022, 106(3): 033119.
- [229] BUDKER D, CRESPO LÓPEZ-URRUTIA J R, DEREVIANKO A, et al. Atomic physics studies at the gamma factory at CERN[J]. *Annalen Der Physik*, 2020, 532(8): 2000204.
- [230] SERBO V G, SURZHYKOV A, VOLOTKA A. Resonant scattering of plane-wave and twisted photons at the gamma factory[J]. *Annalen Der Physik*, 2022, 534(3): 2100199.
- [231] TANAKA M, SASAO N. Alternative method of generating gamma rays with orbital angular momentum[J]. *International Journal of Modern Physics E*, 2021, 30(6): 2150040.
- [232] TASHIRO M, SASAO N, TANAKA M. Generation of twisted gamma-rays via two-photon transition[J]. *Annalen Der Physik*, 2022, 534(8): 2200168.
- [233] VITANOV N V, RANGELOV A A, SHORE B W, et al. Stimulated Raman adiabatic passage in physics, chemistry, and beyond[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2017, 89(1): 015006.
- [234] KARLOVETS D V, SERBO V G, SURZHYKOV A. Wave function of a photon produced in the resonant scattering of twisted light by relativistic ions[J]. *Physical Review A*, 2021, 104(2): 023101.
- [235] MATULA O, HAYRAPETYAN A G, SERBO V G, et al. Radiative capture of twisted electrons by bare ions[J]. *New Journal of Physics*, 2014, 16(5): 053024.
- [236] ZAYTSEV V A, SERBO V G, SHABAEV V M. Radiative recombination of twisted electrons with bare nuclei: Going beyond the Born approximation[J]. *Physical Review A*, 2017, 95: 012702.
- [237] IVANOV I P, KORCHAGIN N, PIMIKOV A, et al. Twisted particle collisions: A new tool for spin physics[J]. *Physical Review D*, 2020, 101(9): 096010.
- [238] AFANASEV A, CARLSON C E. Delta baryon photo-production with twisted photons[J]. *Annalen Der Physik*, 2022, 534(3): 2100228.
- [239] BABIKER M, ANDREWS D L, LEMBESSIS V E. Atoms in complex twisted light[J]. *Journal of Optics*, 2019, 21(1): 013001.
- [240] PESHKOV A A, BIDASYUK Y M, LANGE R, et al. Interaction of twisted light with a trapped atom: Interplay between electronic and motional degrees of freedom[J]. *Physical Review A*, 2023, 107(2): 023106.
- [241] AFANASEV A, CARLSON C E, MUKHERJEE A. Two properties of twisted-light absorption[J]. *JOSA B*, 2014, 31(11): 2721-2727.
- [242] GIAMMANCO F, PERONA A, MARSILI P, et al. Influence of the photon orbital angular momentum on electric dipole transitions: Negative experimental evidence[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(2): 219-222.
- [243] AFANASEV A, CARLSON C E, MUKHERJEE A. Off-axis excitation of hydrogenlike atoms by twisted photons[J]. *Physical Review A*, 2013, 88(3): 033841.
- [244] PESHKOV A A, SEIPT D, SURZHYKOV A, et al. Photoexcitation of atoms by Laguerre-Gaussian beams[J]. *Physical Review A*, 2017, 96(2): 023407.
- [245] SOLYANIK-GORGONE M, AFANASEV A, CARLSON C E, et al. Excitation of E1-forbidden atomic transitions with electric, magnetic, or mixed multipolarity in light fields carrying orbital and spin angular momentum[J]. *JOSA B*, 2019, 36(3): 565-574.
- [246] SCHULZ S A L, PESHKOV A A, MÜLLER R A, et al. Generalized excitation of atomic multipole transitions by twisted light modes[J]. *Physical Review A*, 2020, 102: 012812.
- [247] SCHULZ S A L, FRITZSCHE S, MÜLLER R A, et al. Modification of multipole transitions by twisted light[J]. *Physical Review A*, 2019, 100(4): 043416.
- [248] DUAN Y, MÜLLER R A, SURZHYKOV A. Selection rules for atomic excitation by twisted light[J]. *Journal of Physics B*, 2019, 52(18): 184002.

- [249] LANGE R, HUNTEMANN N, PESHKOV A, et al. Excitation of an electric octupole transition by twisted light[J]. *Physical Review Letters*, 2022, 129(25): 253901.
- [250] KOSHELEVA V P, ZAYTSEV V A, MÜLLER R A, et al. Resonant two-photon ionization of atoms by twisted and plane-wave light[J]. *Physical Review A*, 2020, 102(6): 063115.
- [251] MATULA O, HAYRAPETYAN A G, SERBO V G, et al. Atomic ionization of hydrogen-like ions by twisted photons: Angular distribution of emitted electrons[J]. *Journal of Physics B*, 2013, 46(20): 205002.
- [252] MÜLLER R A, SEIPT D, BEERWERTH R, et al. Photoionization of neutral atoms by X waves carrying orbital angular momentum[J]. *Physical Review A*, 2016, 94(4): 041402.
- [253] PESHKOV A A, VOLOTKA A V, SURZHYKOV A, et al. Rayleigh scattering of twisted light by hydrogenlike ions[J]. *Physical Review A*, 2018, 97(2): 023802.
- [254] SURZHYKOV A, SEIPT D, SERBO V G, et al. Interaction of twisted light with many-electron atoms and ions[J]. *Physical Review A*, 2015, 91: 013403.
- [255] PESHKOV A A, SERBO V G, FRITZSCHE S, et al. Absorption of twisted light by a mesoscopic atomic target[J]. *Physica Scripta*, 2016, 91(6): 064001.
- [256] SCHOLZ-MARGGRAF H M, FRITZSCHE S, SERBO V G, et al. Absorption of twisted light by hydrogenlike atoms[J]. *Physical Review A*, 2014, 90: 013425.
- [257] BERRY M V. Five momenta[J]. *European Journal of Physics*, 2013, 34(6): 1337-1348.
- [258] BARNETT S M, BERRY M V. Superweak momentum transfer near optical vortices[J]. *Journal of Optics*, 2013, 15(12): 125701.
- [259] IVANOV I P, LIU B, ZHANG P. Observability of the superkick effect within a quantum-field-theoretical approach[J]. *Physical Review A*, 2022, 105: 013522.
- [260] LIU B, IVANOV I P. Threshold effects in high-energy vortex state collisions[J]. *Physical Review A*, 2023, 107(6): 063110.
- [261] JUCHTMANS R, VERBEECK J. Orbital angular momentum in electron diffraction and its use to determine chiral crystal symmetries[J]. *Physical Review B*, 2015, 92(13): 134108.
- [262] GRILLO V, HARVEY T, PIERCE J, et al. The measurement of off-plane magnetic field through electron vortex beams[C]//Proceedings of the European Microscopy Congress 2016. [S. l.]: Wiley Online Library, 2016.
- [263] KARLOVETS D V, KOTKIN G L, SERBO V G. Scattering of wave packets on atoms in the Born approximation[J]. *Physical Review A*, 2015, 92(5): 052703.
- [264] KARLOVETS D V, KOTKIN G, SERBO V, et al. Scattering of twisted electron wave packets by atoms in the Born approximation[J]. *Physical Review A*, 2017, 95(3): 032703.
- [265] SERBO V, IVANOV I P, FRITZSCHE S, et al. Scattering of twisted relativistic electrons by atoms[J]. *Physical Review A*, 2015, 92: 012705.
- [266] KOSHELEVA V P, ZAYTSEV V A, SURZHYKOV A, et al. Elastic scattering of twisted electrons by an atomic target: Going beyond the Born approximation[J]. *Physical Review A*, 2018, 98(2): 022706.
- [267] IVANOV I, SEIPT D, SURZHYKOV A, et al. Elastic scattering of vortex electrons provides direct access to the Coulomb phase[J]. *Physical Review D*, 2016, 94(7): 076001.
- [268] IVANOV I P. Measuring the phase of the scattering amplitude with vortex beams[J]. *Physical Review D*, 2012, 85(7): 076001.
- [269] KARLOVETS D. Probing phase of a scattering amplitude beyond the plane-wave approximation[J]. *Europhysics Letters*, 2016, 116(3): 31001.
- [270] HARRIS A L, PLUMADORE A, SMOZHANYK Z. Ionization of hydrogen by electron vortex beam[J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2019, 52(9): 094001.
- [271] MANDAL A, DHANKHAR N, SÉBILLEAU D, et al. Semirelativistic (e, 2e) study with a twisted electron beam on Cu and Ag[J]. *Physical Review A*, 2021, 104(5): 052818.
- [272] DHANKHAR N, CHOUBISA R. Electron impact single ionization of hydrogen molecule by twisted electron beam[J]. *Journal of Physics B*, 2021, 54(1): 015203.
- [273] SINGH P, CHAMPION C, SHARMA R K. Twisted distorted wave Born approximation as a new tool to investigate collisional processes[J]. *Journal of Physics B*, 2021, 54(19): 195202.
- [274] ZAYTSEV V A, SURZHYKOV A, SERBO V G, et al. Atomic processes with twisted electrons[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1412(5): 052013.
- [275] GROSHEV M E, ZAYTSEV V A, YEROKHIN V A, et al. Bremsstrahlung from twisted electrons in the field of heavy nuclei[J]. *Physical Review A*, 2020, 101: 012708.
- [276] TOLSTIKHIN O I, MORISHITA T. Strong-field ioniza-

- tion, rescattering, and target structure imaging with vortex electrons[J]. *Physical Review A*, 2019, 99(6): 063415.
- [277] SHERWIN J A. Scattering of slow twisted neutrons by ortho- and parahydrogen[J]. *Physics Letters A*, 2022, 437: 128102.
- [278] SHERWIN J A. Two-photon annihilation of twisted positrons[J]. *Physical Review A*, 2018, 98(4): 042108.
- [279] SHERWIN J A. Theoretical study of the double Compton effect with twisted photons[J]. *Physical Review A*, 2017, 95(5): 052101.
- [280] SHERWIN J A. Compton scattering of Bessel light with large recoil parameter[J]. *Physical Review A*, 2017, 96(6): 062120.
- [281] SHERWIN J A. Effect of the electron motion on the Compton scattering of a twisted photon[J]. *Physical Review Research*, 2020, 2(1): 013168.
- [282] STOCK S, SURZHYKOV A, FRITZSCHE S, et al. Compton scattering of twisted light: Angular distribution and polarization of scattered photons[J]. *Physical Review A*, 2015, 92: 013401.
- [283] SEIPT D, SURZHYKOV A, FRITZSCHE S. Structured X-ray beams from twisted electrons by inverse Compton scattering of laser light[J]. *Physical Review A*, 2014, 90(1): 012118.
- [284] BALDO M, BURGIO G F. The nuclear symmetry energy[J]. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 2016, 91: 203-258.
- [285] ROCA-MAZA X, BRENNA M, AGRAWAL B K, et al. Giant quadrupole resonances in  $^{208}\text{Pb}$ , the nuclear symmetry energy, and the neutron skin thickness[J]. *Physical Review C*, 2013, 87(3): 034301.
- [286] HENSHAW S S, AHMED M W, FELDMAN G, et al. New method for precise determination of the isovector giant quadrupole resonances in nuclei[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(22): 222501.
- [287] DALE D S, LASZEWSKI R M, ALARCON R. Isovector E2 resonance in  $^{208}\text{Pb}$ [J]. *Physical Review Letters*, 1992, 68(24): 3507-3510.
- [288] KAZINSKI P O, SOKOLOV A A. Excitation of multipolar transitions in nuclei by twisted photons[EB/OL]. 2023, arXiv: 2312.03803. <http://arxiv.org/abs/2312.03803>.
- [289] LU Z W, GUO L, LI Z Z, et al. Manipulation of giant multipole resonances via vortex  $\gamma$  photons[J]. *Physical Review Letters*, 2023, 131(20): 202502.
- [290] XU Y, BALABANSKI D L, BARAN V, et al. Vortex photon induced nuclear reaction: Mechanism, model, and application to the studies of giant resonance and astrophysical reaction rate[J]. *Physics Letters B*, 2024, 852: 138622.
- [291] PEIK E, OKHAPKIN M. Nuclear clocks based on resonant excitation of  $\gamma$ -transitions[J]. *Comptes Rendus Physique*, 2015, 16(5): 516-523.
- [292] CAMPBELL C J, RADNAEV A G, KUZMICH A, et al. Single-ion nuclear clock for metrology at the 19th decimal place[J]. *Physical Review Letters*, 2012, 108(12): 120802.
- [293] RELLERGERT W G, DeMILLE D, GRECO R R, et al. Constraining the evolution of the fundamental constants with a solid-state optical frequency reference based on the  $^{229}\text{Th}$  nucleus[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(20): 200802.
- [294] KIRSCHBAUM T, SCHUMM T, PÁLFFY A. Photoexcitation of the  $^{229}\text{Th}$  nuclear clock transition using twisted light[EB/OL]. 2023, arXiv: 240413023, 2024.
- [295] THIROLF P G, SEIFERLE B, von der WENSE L. Improving our knowledge on the  $^{229\text{m}}\text{Th}$  isomer: Toward a test bench for time variations of fundamental constants[J]. *Annalen Der Physik*, 2019, 531(5): 1800381.
- [296] TSAI Y D, EBY J, SAFRONOVA M S. Direct detection of ultralight dark matter bound to the sun with space quantum sensors[J]. *Nature Astronomy*, 2023, 7: 113-121.
- [297] FLAMBAUM V V. Enhanced effect of temporal variation of the fine structure constant and the strong interaction in  $^{229}\text{Th}$ [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97(9): 092502.
- [298] EICHLER J, STÖHLKER T. Radiative electron capture in relativistic ion-atom collisions and the photoelectric effect in hydrogen-like high-Z systems[J]. *Physics Reports*, 2007, 439(1/2): 1-99.
- [299] TASHENOV S, STÖHLKER T, BANAŚ D, et al. First measurement of the linear polarization of radiative electron capture transitions[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97(22): 223202.
- [300] SURZHYKOV A, FRITZSCHE S, STÖHLKER T, et al. Application of radiative electron capture for the diagnostics of spin-polarized ion beams at storage rings[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(20): 203202.
- [301] MAIOROVA A V, PESHKOV A A, SURZHYKOV A. Radiative recombination of twisted electrons with hydrogenlike heavy ions: Linear polarization of emitted photons[J]. *Physical Review A*, 2021, 104(2): 022821.

- [302] MAIOROVA A V, PESHKOV A A, SURZHYKOV A. Structured ion beams produced by radiative recombination of twisted electrons[J]. *Physical Review A*, 2020, 101(6): 062704.
- [303] GOLDANSKII V I, NAMIOT V A. On the excitation of isomeric nuclear levels by laser radiation through inverse internal electron conversion[J]. *Physics Letters B*, 1976, 62(4): 393-394.
- [304] WU Y, KEITEL C H, PÁLFFY A. X-ray-assisted nuclear excitation by electron capture in optical laser-generated plasmas[J]. *Physical Review A*, 2019, 100(6): 063420.
- [305] WU Y, GARGIULO S, CARBONE F, et al. Dynamical control of nuclear isomer depletion via electron vortex beams[J]. *Physical Review Letters*, 2022, 128(16): 162501.
- [306] AFANASEV A V, KARLOVETS D, SERBO V. Schwinger scattering of twisted neutrons by nuclei[J]. *Physical Review C*, 2019, 100(5): 051601.
- [307] GERICKE M T, BOWMAN J D, JOHNSON M B. Mott-Schwinger scattering of polarized low energy neutrons up to thermal energies[J]. *Physical Review C*, 2008, 78(4): 044003.
- [308] AFANASEV A V, KARLOVETS D V, SERBO V G. Elastic scattering of twisted neutrons by nuclei[J]. *Physical Review C*, 2021, 103(5): 054612.