

## 光的自旋和轨道角动量

魏功祥 刘晓娟 刘云燕 付圣贵

山东理工大学理学院, 山东 淄博 255049

**摘要** 光具有由偏振性决定的自旋角动量(SAM)和由光场空间分布决定的轨道角动量(OAM)两种不同的物理性质。重点对光的自旋和轨道角动量在光束生成和变换性质、存在形式和描述方法、力学效应、空间相干性和时间相干性、角向多普勒频移效应及参量转换与量子纠缠等方面进行对比,探索它们的现象学差别,以期更好地理解光的本性,为该领域的研究提供启发和拓展思路。总结和分析了轨道角动量的最新研究成果,并展望了该领域的最新研究动态。

**关键词** 物理光学;奇点光学;测量;角动量;光学涡旋;光学微操纵;量子纠缠

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.100004

## Spin and Orbital Angular Momentum of Light

Wei Gongxiang Liu Xiaojuan Liu Yunyan Fu Shenggui

School of Sciences, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255049, China

**Abstract** Spin angular momentum (SAM) and orbital angular momentum (OAM) are two absolutely different physical properties of light which are determined by the polarization and spatial distribution, respectively. The comparison of the two properties is performed in terms of demonstrated about the generation and conversion, existence form and description method, mechanical effect, spatial and time coherence, angular Doppler effect, parameter conversion and quantum entanglement, etc. The phenomenology provides much of the basis for the exploration and exploitation of the field. The progress of OAM development with an eye towards the promising future in the field is reviewed and analyzed.

**Key words** physical optics; singular optics; measurement; angular momentum; optical vortices; optical micromanipulation; quantum entanglement

**OCIS codes** 260.6042; 050.4865; 080.4865; 230.5440

## 1 引言

由经典的麦克斯韦方程组可知光是一种电磁波,具有能量和动量。动量可以分为线动量和角动量,角动量包括由偏振性决定的自旋角动量(SAM)和由光场空间分布决定的轨道角动量(OAM)。光与物质相互作用时不可避免地存在动量的交换。在一些情况下,会表现出较明显的力学效应。

1936年, Beth<sup>[1]</sup>首次实验测量了圆偏振光通过一个半波片产生的扭矩,测量的扭矩大小与波动光学和量子力学的理论结果非常符合,证明了理想圆偏振光具有自旋角动量  $J_z = N\hbar$  和能量  $W = N\hbar\omega$  ( $N$ 为光子数),其比值为  $1/\omega$ 。对椭圆偏度为  $\sigma$  ( $-1 \leq \sigma \leq 1$ ) 的椭圆偏振光,自旋角动量和能量的比值为  $\sigma/\omega$ 。其中  $\sigma = \pm 1$ , 分别代表左旋和右旋圆偏振光,  $\sigma = 0$  为线偏振光。

偏振光除了具有自旋角动量外,还可具有轨道角动量。如何从偏振光能流中检测和区分自旋和轨道角动量是一个困扰研究者的重要问题。测量轨道角动量的第一个实验由 Allen 等<sup>[2]</sup>于 1992 年在荷兰莱顿大学的惠更斯实验室完成。实验采用拉盖尔-高斯(LG)光束,通过一个像散光学系统变换为厄米-高斯(HG)光束时对系统产生的扭矩进行测量。LG 模式光束的复振幅可简写为  $u_0(x, y, z)\exp(-ikz)\exp(+il\theta)$ , 有与方位角

收稿日期: 2014-04-21; 收到修改稿日期: 2014-05-22; 网络出版日期: 2014-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(11304184)、山东省自然科学基金(ZR2013FM007)、山东省高等学校优秀中青年骨干教师国际合作培养项目

作者简介: 魏功祥(1971—),男,博士,副教授,主要从事全息、相干衍射成像和图像识别等方面的研究。

E-mail: weigx@sdut.edu.cn

$\theta = \arctan(y/x)$  成正比的相位项。其中,  $l$  表征涡旋光束的相位  $\varphi$  和方位角  $\theta$  的关系, 称作缠绕数或拓扑荷。涡旋的拓扑荷在数学上定义为路径积分  $l = \frac{1}{2\pi} \oint_C \nabla\varphi \cdot d\mathbf{r}$ , 其中  $C$  为围绕涡旋中心的积分路径,  $d\mathbf{r}$  为无穷小的矢量路径元,  $\nabla\varphi$  为相位梯度。 $l$  为整数时, 光束波前除了轴向上的相位奇点外, 在空间上是连续的, 形成螺旋波面, 具有这种特征的光束通常称为涡旋光束<sup>[3]</sup>。此时, 光子具有确定的轨道角动量  $l\hbar$ , 偏振涡旋光束的角动量和能量的比值为  $J_z'/W = (l \pm \sigma)/\omega$ 。如果没有涡旋相位项  $\exp(il\theta)$ , 光束为普通的平面波, 自旋角动量和能量的比值为  $\hbar\sigma/\hbar\omega$ 。如果  $l$  为非整数, 则光束中存在一个波面不连续的方位角, 会出现一个截断线, 称为分数光学涡旋<sup>[4]</sup>。

对 LG 光束, 半径  $r$  为常数时, 线动量  $\mathbf{p}$  表征的坡印亭矢量(光线方向)指向一个确定倾角的螺旋路径。 $r(z)/w(z)$  为常数时, 坡印亭矢量相对于  $z=0$  的旋转角度为  $\frac{l}{2} \left[ \frac{w(z)}{r(z)} \right]^2 \arctan\left(\frac{z}{z_R}\right)$ 。径向量子数为零的 LG 光束, 强度分布是半径为  $\sqrt{w(z)l/2}$  的环带, 又称为面包圈光束<sup>[5]</sup>。在自由空间中, 坡印亭矢量都平行于波矢,  $\arctan$  项正比于高斯光束中的 Gouy 相移<sup>[6]</sup>。

上述理论是在傍轴近似条件下从麦克斯韦方程组中通过严格的推导得到的。傍轴近似条件只假设光束具有有限的能量,  $u(x, y, z)$  是可规范化的, 没有给出具体的表达式, 因此具有普遍性。可以看出, 即使对于  $\sigma=0$  的线偏振光, 光束依然具有与空间参数拓扑荷  $l$  相关的角动量。在非近轴条件下, 自旋和轨道角动量的分离会更复杂。尽管所有的问题都需要利用量子力学方法进行推导和验证, 但除了量子纠缠等特殊领域<sup>[7]</sup>, 基本上都可以用经典的电磁理论加以解释。

20 世纪 90 年代后, 这些概念性的实验结果促使人们探索近轴光学中自旋和轨道角动量的差别, 催生了对一系列特殊光学现象的观测、探索和开发, 激发了人们对光的本性更深层的思考, 逐渐形成了关于光的轨道角动量的现象学分支。本文对不同情形下的自旋和轨道角动量的行为特征进行了对比, 以期更好地理解光的本性及其基本性质, 拓展光的角动量的应用领域研究。

## 2 光的自旋和轨道角动量的对比

### 2.1 光束生成和变换性质

从激光器中发出的激光, 通常是自然光, 可以简单地通过起偏器和 1/4 波片组成的变换系统转化为具有自旋角动量的圆偏振光。波片只改变入射光的偏振态, 不改变其光强分布。圆偏振光通过半波片后会出射旋向相反的圆偏振光。不考虑光子量子力学效应的情况下, 坡印亭由经典电磁理论预言了圆偏振光能够对波片产生扭矩作用, 并由 Beth<sup>[1]</sup>进行了实验验证和测量。

具有轨道角动量的涡旋光束, 最先实现的是 LG 光束。LG 激光模式的相位  $\exp(il\theta)$  与方位角有关, 其波前是缠绕数为  $l$  的螺旋波前, 与光矢量的偏振态无关。第一次获得高阶 LG 光束是通过柱透镜组成的  $\pi/2$  模式转换器实现的<sup>[8]</sup>。LG 光束不是唯一的具有螺旋波前的激光, 贝塞尔光束<sup>[9]</sup>、马修光束<sup>[10]</sup>和恩斯-高斯光束<sup>[11]</sup>也同样具有轨道角动量。

涡旋光束与平面波的干涉图都具有叉形干涉条纹, 是判断光束涡旋性质最常用的方法。反之, 利用叉形干涉条纹的全息图或衍射光学元件生成涡旋光束也是一种简便的方法<sup>[12]</sup>。衍射光学元件可以是一个简单的衍射光栅, 光栅中包含与入射光光轴共线的相位奇点, 其一级衍射具有环状强度剖面结构, 这是涡旋光束的共同特点。这种光束的光学相位奇点已经得到广泛研究, 也称为光学涡旋。但在之前的光学相位奇点研究中<sup>[13]</sup>, 很少对其角动量特性进行测量。现在, 这种衍射光学元件可以方便地通过计算机全息图进行设计, 并通过液晶空间光调制器显示来控制涡旋光束的生成, 已成为多数实验室采用的普遍方法。虽然实现起来简单, 但这种方法生成的涡旋光束只是近似 LG 模式。最近, 叉型衍射光栅已经应用于显微术中, 通过对其点扩展函数增加一个螺旋相位, 实现图像的边缘增强<sup>[14]</sup>。

螺旋相位板(SPP)是另一种实现涡旋光束的方法。螺旋相位板的光学厚度  $t = \lambda l\theta/(2\pi)$ 。平面波入射到螺旋相位板, 倾斜板面对入射光产生折射。随着相位角的变化, 透射光线产生  $l/k_r$  的倾斜, 形成具有相位  $\exp(il\theta)$  的螺旋波前透射光束。动量为  $\hbar k$  的光子, 透过 SPP 后产生  $l\hbar/r$  的角向分量, 每个光子就具有轨道角

动量  $l\hbar$ 。这是在几何光学模式下非交轴倾射光束所描述的光子的轨道角动量<sup>[15]</sup>。当然,这种螺旋相位板虽然透射率很高,但其制作成本也高。高斯基模光束通过螺旋相位板生成的高斯基模光束会随传输距离的增加沿径向扩展,在保持轨道角动量分布的能力方面逊色于 LG 光束<sup>[16-18]</sup>。

光学涡旋阵列可以通过螺旋相位滤波法<sup>[19]</sup>和基于分数泰伯效应的衍射光学元件<sup>[20]</sup>等方法生成。三束或多束平面波干涉也可以生成光学涡旋阵列<sup>[21]</sup>。这种情况类似于激光照射到粗糙表面时产生的光学散斑,每个黑斑(暗核)对应着一个相位奇点。因为暗核处没有光强,所以既没有能量,也没有动量。但紧邻暗核处的光具有螺旋相位波前,具有能量和轨道角动量。对整个散斑图,顺时针方向和逆时针方向的奇点数是相同的,总角动量为零。这些相位奇点在二维波场中表现为暗斑,在三维波场中则表现为暗线,形成特有的分型和拓扑结构<sup>[22]</sup>。

## 2.2 存在形式和描述方法

圆偏振态是光振动矢量末端运动轨迹为圆的偏振态,与光场的空间分布情况无关。圆偏振光所具有的自旋角动量,只围绕其自身轴,大小正比于局域光强,也称为内禀角动量;而 LG 光束绕光轴的轨道角动量大小正比于绕光轴的环带光强,与光的空间分布相关,不同于自旋角动量,故又称外禀角动量<sup>[23]</sup>。

内禀(自旋)角动量不依赖于光轴的选取,而轨道角动量则与光轴的选取密切相关。但对于一个给定的传播方向  $z$ ,光的横向动量都为零。如果光轴产生偏折, $l$ 和  $\sigma$ 是不变的,所以轨道角动量又可以称为准内禀角动量。对于柱对称情况下的离轴光束,光束的横向动量是非零值, $l$ 是外禀的。

偏振光经过 1/4 波片后的自旋特性可以用数学分析的方法进行解释。同样地,涡旋光束通过柱透镜模式转换器后的行为也可以用数学分析的方法进行解释。实际上,利用邦加球也可以表示任意两种轨道角动量态<sup>[24]</sup>。描述偏振光透过光学系统的琼斯矩阵法在研究轨道角动量通过像散光学器件的传播时也是等价的<sup>[25]</sup>。对具有轨道角动量的偏振光也有相应的联合矩阵表示形式,可以分别乘自旋琼斯矩阵,再乘轨道角动量矩阵;或者反过来,都是正确的。这种情况等价于氢原子波函数的自旋和轨道角动量分量的分离情况。

## 2.3 自旋与轨道角动量的检测

偏振光的琼斯矩阵表示为  $\mathbf{E}_r = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |E_x| \exp(i\varphi_x) \\ |E_y| \exp(i\varphi_x) \end{bmatrix}$ 。内禀 SAM 由光的圆偏振态决定。圆偏振态分为左

旋和右旋圆偏振,其归一化琼斯矢量分别为  $\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix}$  和  $\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix}$ ,两垂直分量的相位差分别为  $\pi/2$  和  $-\pi/2$ 。

SAM 态通常采用检偏器和 1/4 波片的组合系统进行检验。在检偏器前插入 1/4 波片,旋转波片,出现最大透射光强时表明波片快轴方向与检偏器透光轴方向相同。根据出射线偏振光的光矢量所在象限可以分辨其旋向<sup>[26]</sup>。光子的 SAM 态通过二维态空间来描写,提供了一种单量子位的物理实现方法,广泛地应用于量子密钥分配。

除了 SAM 态,单光子还可以具有无限多的正交 OAM 态,可以具有无限多的量子位。现在已经能够生成不同 OAM 态的叠加,可以实现  $N$  维希尔伯特空间的单光子量子态(quNits)。研究表明,光的轨道角动量是可以进行测量的。最常用的方法是用平面光与涡旋光束干涉,根据叉形干涉条纹的分支数判断涡旋光束的拓扑荷。此外,利用球面光与其干涉形成的分支螺旋干涉条纹<sup>[27]</sup>,与其镜像光束干涉产生的  $2l$  径向轮辐干涉图,通过环状多针孔产生的特殊干涉图<sup>[28]</sup>、多针孔相位恢复算法<sup>[29]</sup>、窄环带孔径形成的径向环带分布干涉图<sup>[30]</sup>和透过锥透镜干涉<sup>[31]</sup>,都可以实现 OAM 定量测量。

上述技术虽然都能够分辨 OAM 态,但需要多光子产生干涉图,在测量单光子态时遇到困难。单光子角动量态的测量通常利用计算机全息图与孔径光阑相结合的方法,使涡旋光束通过叉形全息图变为平面光,并使其一级衍射耦合进单模光纤,通过单光子计数器实现单光子特殊 OAM 态的测定<sup>[7]</sup>。这种测量技术可探测具有一定特殊态的光子,更复杂一些的计算全息图可以测量几种不同的  $l$  态,但测量效率不超过  $1/l$ 。还可以用干涉仪中 Gouy 相移的不同来分辨两种不同的模式级<sup>[32]</sup>,但只能分选两种态。利用两个相对旋转角度为  $\alpha/2$  的 DOVE 棱镜的 Mach-Zehnder 干涉仪的级联,可以在原则上以 100% 的效率测量 OAM 态。进一步改进后,可用插入波片的 Mach-Zehnder 干涉仪实现多通道同时测量 SAM 和 OAM,甚至总角动量<sup>[33]</sup>,可应用于高密度信息传递。

## 2.4 自旋和轨道角动量的力学效应

涡旋光束具有确定的轨道角动量,可以造成微小物体沿光轴旋转<sup>[34]</sup>。光的轨道角动量的力学效应可以在光镊系统中进行测量。光镊利用高度聚焦光束的强度梯度力俘获微米量级的介质颗粒。对悬浮于液体中的直径为5  $\mu\text{m}$ 的胶体球,激光强度只需要几毫瓦。利用LG模式激光,可以将角动量传递给介质球,使其围绕光轴旋转。

当具有光吸收特性的粒子被俘获到光轴上时,光镊系统同样表现为两种角动量行为。当光是圆偏振光时,可以使粒子沿顺时针或逆时针方向旋转,这取决于偏振光的旋向 $\sigma = \pm 1$ 。如果光束是拓扑荷 $l = \pm 1$ 的涡旋光束时,它也可以使粒子产生旋转。如果 $\sigma$ 和 $l$ 的符号相同,粒子的角速度正比于 $\sigma + l$ ,如果 $\sigma$ 和 $l$ 的符号相反,粒子会停止旋转,这是由于 $\sigma - l = 0$ 。这表明自旋和轨道角动量的等价性。另一方面,自旋角动量可以与轨道角动量相加或相减,说明光的总角动量为 $(\sigma + l)\hbar$ 。这与角动量流密度理论相符合。可以观测到,在共轴情况下,粒子的质量中心都没有偏移,自旋和轨道角动量都使球沿其自身轴旋转。对离轴情况,粒子的运动状态会发生明显的变化。绕光轴的轨道角动量大小正比于绕光轴的环带光强,使粒子绕环带旋转。而自旋角动量只围绕其自身轴,粒子只能绕自身轴旋转,旋转正比于局域的光强。此时,自旋和轨道表现为完全不同的两种性质,是光的内禀和外禀角动量的具体体现。这些是光镊系统实现的重要研究工作,主要包括微流体泵<sup>[35]</sup>和其他的驱动微机械<sup>[36]</sup>等。

光镊系统中中空的LG光束结构还可以作为“势管”束缚超冷原子<sup>[37]</sup>。在很多场合,特别是螺旋波前,轴上强度为零,它可以囚禁蓝失谐原子<sup>[38]</sup>。剩余散射可以导致奇点尺度的变化。冷却的原子能进一步生成玻色-爱因斯坦凝聚(BEC),还可以产生BEC的旋转<sup>[39-40]</sup>。有轨道角动量的光束与共振原子的相互作用也引起了广泛关注。携带轨道角动量的偏振光使角速度为 $\Omega$ 的原子在共振跃迁时产生频移 $\Omega l$ ,对原子质量中心的扭矩为 $\hbar l$ ,与椭圆度 $\sigma$ 无关<sup>[41]</sup>。

## 2.5 空间相干性和时间相干性

自旋角动量对圆偏振光的时间和空间相干性都没有特殊的要求。但对轨道角动量,情况就有些复杂。轨道角动量对无线电频段到X射线的整个电磁波谱都是有意义的。轨道角动量因为和光束的横截面相位项相联系,因此对其时间相干性没有限制,每个光谱分量都可以具有完整的螺旋相位结构。对于包含多个光谱分量的涡旋光束,可以用常用的叉型衍射光栅生成,色散可以用偏转棱镜<sup>[42]</sup>或补偿光栅<sup>[43]</sup>进行消除。完美的螺旋波前要求光是完全空间相干的,空间相干性的减小会破坏轴上相位奇点和暗核的保真度。如果光是部分相干的,则在透过螺旋相位板或分叉衍射光栅时,产生的光束可以分解为一定范围内不同轨道角动量模式的非相干叠加<sup>[44]</sup>,这些光束称为兰金涡旋<sup>[45]</sup>。研究表明,部分相干涡旋光束的光谱相干度及光强分布与光束的拓扑电荷数、空间相对相干长度及湍流介质的折射率结构常数等因素有关。随着空间相对相干长度的增大,相干涡旋逐渐演化为强度涡旋<sup>[46-47]</sup>。在望远镜中置入螺旋相位板可以作为天文滤波器抑制从一个恒星发出的光,从而探测从其行星上发出的离轴光<sup>[48-50]</sup>。

## 2.6 角向多普勒频移效应

光束沿自身轴以角速度 $\Omega$ 旋转时会产生频移,说明光存在角向多普勒效应<sup>[51]</sup>。这与横向多普勒效应是不同的。对自旋光束,由自旋产生的频移为 $\delta\omega' = \Omega\sigma$ ,对OAM频移量为 $\delta\omega'' = \Omega l$ ,总角动量频移为 $\delta\omega''' = \Omega(l + \sigma)$ 。对具有相同偏振态、不同总角动量的复合光束,产生的频移分量分别为 $\delta\omega_1 = \Omega(\sigma + l_1)$ , $\delta\omega_2 = \Omega(\sigma + l_2)$ 。这是一种与自旋与轨道角动量的和有关的频移效应<sup>[52-53]</sup>。这种现象是因为无法在螺旋相位波前的时间演变过程中将沿光轴的两种旋转因子区分开造成的。光束的总旋转变量使相位变化 $(l + \sigma)$ 周。这种相位和相关的频移也适用于复色光,所有的频谱成分会产生同样大小的频移<sup>[54]</sup>。

## 2.7 角谱性质与测不准关系

自旋和轨道角动量另一个明显的差别是轨道角动量和角位置存在傅里叶变换共轭关系。在柱坐标系中,所有的物理性质都是角位置的周期函数。由于方位角 $\theta$ 是周期变化的,它的傅里叶变换共轭项OAM是离散的,其傅里叶变换关系为<sup>[55]</sup>

$$A_l = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \psi(\theta) \exp(-il\theta) d\theta, \quad (1)$$

$$\psi(\theta) = \sum_{l=-\infty}^{+\infty} A_l \exp(il\theta), \quad (2)$$

(2)式螺旋谐波  $\exp(il\theta)$  的形式给出光模式的简洁表达式。光束角向横截面的限制会改变 OAM 谱,产生新的 OAM 边频带。

在传统单缝或多缝衍射实验中,对光的位置限制导致了多个傅里叶频谱分量间的干涉。角孔径对角向的限制同样会导致多个 OAM 谱分量的干涉,形成角孔衍射<sup>[56]</sup>现象,是角动量和角位置关系的直接展示。实验表明,角位置和轨道角动量同样具有相应的测不准关系<sup>[57-58]</sup>,  $\Delta\theta\Delta l \geq \hbar/2$ 。这种测不准关系最先是在测量动量和位置时提出的。到目前为止,还没有发现关于自旋角动量的共轭量。与轨道角动量相关的测不准关系或许会限制利用轨道角动量所进行的量子纠缠的研究<sup>[59]</sup>。

## 2.8 参量转换与量子纠缠

利用非线性晶体的倍频效应和上转换效应可以实现螺旋相位模式的倍频效应<sup>[59]</sup>。这与自旋角动量是不同的,因为自旋角动量只有  $\pm\hbar$  取值。这也是自旋和轨道角动量的另一个不同点。轨道角动量倍频没有上限,上转换可以改变模式的级次,而圆偏振模式的转换则没有对应项。因为在基频和倍频的波矢方向和坡印亭矢量(光线方向)共线,这种倍频效应是通过严格的相位匹配实现的。波数增加一倍,意味着拓扑荷  $l$  也会相应增加 1 倍。该现象在光场轨道角动量的转换中得到验证<sup>[60]</sup>。这项工作促进了光子参量下转换的研究,直接影响了利用轨道角动量实现高阶量子纠缠的探索<sup>[61-62]</sup>。在参量下转换效应中,轨道角动量的相关运算可以通过两幅全息图来实现。全息图决定给定的抽运拓扑荷  $l_0$  的闲频拓扑荷  $l_1$  和信号拓扑荷  $l_2$ 。对于给定的抽运拓扑荷,闲频和信号拓扑荷可以取一个很大的范围。结合单光子分选技术,轨道角动量的高维希尔伯特空间和大信息容量特性使其可以应用于量子信息处理。参量下转换光束和破坏贝尔不等式的研究表明,轨道角动量是一个量子水平上的有意义的概念,具有真正的光子特性。

## 3 展 望

在最近 30 年的时间里,人们认识到螺旋相位光束具有一个大小为  $l\hbar$  的量子轨道角动量后,在经典和量子体系涡旋光束研究领域得到了迅速发展。轨道角动量可以提供作用力,施加力矩到宏观或者量子尺度的物体上。轨道角动量可以从光传递给微小粒子,也可以传递给原子和玻色爱因斯坦凝聚物。尽管轨道角动量的许多性质仅仅用经典的几何光学内容,依据螺旋相位波前和非轴向坡印亭矢量就可以理解,但轨道角动量也具有单光子的性质。光学轨道角动量的量子方面在参量下转换实验中是显著的,发射的光子对的轨道角动量是相互纠缠的。现在轨道角动量的随机叠加,以及光学角动量态是可以被制造、观察和测量的。

虽然携带轨道角动量的光束的生成和控制已经相当成熟,光的轨道角动量与物体之间相互作用的实验已经得到开发和利用,实现了由轨道角动量扭矩驱动的微型机械,但对轨道角动量的研究仍处在初级阶段。将继续关注以下几方面的研究进展:1) 在量子计算和量子通信领域中,提供了更大数据容量和更高安全等级的高维希尔伯特空间轨道角动量量子许可新协议和量子纠缠;2) 旋转物体造成偏振态的微小旋转揭示的“以太阻力”及旋转多普勒效应;3) 光子轨道角动量与原子角动量的传递与转换时的选择规则和理论解释;4) 低相干光学涡旋在天文观测望远系统和衬度成像显微系统中应用等。在这些方面,仍然有大量的研究工作需要深入探索,相信还会有更多的本质内容被发现。

## 参 考 文 献

- 1 Beth R A. Mechanical detection and measurement of the angular momentum of light[J]. *Physical Review*, 1936, 50(2): 115-123.
- 2 Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, *et al.*. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. *Physical Review A*, 1992, 45(11): 8185-8189.
- 3 Lu Xuanhui, Huang Huiqin, Zhao Chengliang, *et al.*. Optical vortex beams and optical vortices[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, 45(1): 50-56.  
陆璇辉, 黄慧琴, 赵承良, 等. 涡旋光束和光学涡旋[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, 45(1): 50-56.
- 4 Leach J, Yao E, Padgett M. Observation of the vortex structure of a non-integer vortex beam[J]. *New Journal of Physics*, 2004, 6(1): 71.

- 5 Curtis J E, Grier D G. Structure of optical vortices[J]. *Physical Review Letters*, 2003, 90(13): 133901.
- 6 Courtial J. Self-imaging beams and the Guoy effect[J]. *Optics Communications*, 1998, 151(1-3): 1-4.
- 7 Mair A, Vaziri A, Weihs G, *et al.*. Entanglement of the orbital angular momentum states of photons[J]. *Nature*, 2001, 412(6844): 313-316.
- 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(1-3): 123-132.
- 9 Porras M A, Borghi R, Santarsiero M. Relationship between elegant Laguerre- Gauss and Bessel- Gauss beams[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2001, 18(1): 177-184.
- 10 Gutiérrez-Vega J C, Iturbe-Castillo M D, Chévez-Cerda S. Alternative formulation for invariant optical fields: Mathieu beams[J]. *Optics Letters*, 2000, 25(20): 1493-1495.
- 11 Bandres M A, Gutiérrez-Vega J. Ince Gaussian beams[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(2): 144-146.
- 12 Padgett M, Courtial J, Allen L. Light's orbital angular momentum[J]. *Physics Today*, 2004, 57(5): 35-40.
- 13 Berry M V. Singularities in waves and rays[M]. // *Physics of Defects*, Balian R, Kleman M, Poirier J P (eds.). Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1981. 453-543.
- 14 Fühapter S, Jesacher A, Bernet S, *et al.*. Spiral phase contrast imaging in microscopy[J]. *Optics Express*, 2005, 13(3): 689-694.
- 15 Leach J, Keen S, Padgett M J, *et al.*. Direct measurement of the skew angle of the Poynting vector in a helically phased beam[J]. *Optics Express*, 2006, 14(25): 11919-11924.
- 16 Ding Panfeng, Pu Jixiong. Relation of momentum and orbital angular momentum of Gaussian vortex beam with topological charge and their propagation in free space[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2013, 43(6): 725-731.  
丁攀峰, 蒲继雄. 高斯涡旋光束的动量及轨道角动量与拓扑电荷数的关系及其在自由空间中的传输[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2013, 43(6): 725-731.
- 17 Ding Panfeng, Pu Jixiong. Change of the off-center Laguerre- Gaussian vortex beam while propagation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(6): 064103.  
丁攀峰, 蒲继雄. 离轴拉盖尔-高斯涡旋光束传输中的光斑演变[J]. *物理学报*, 2012, 61(6): 064103.
- 18 Ding Panfeng, Pu Jixiong. Research on orbital angular momentum of off axial Gaussian vortex beam[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2014, 44(5): 449-456.  
丁攀峰, 蒲继雄. 离轴高斯涡旋光束的轨道角动量研究[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2014, 44(5): 449-456.
- 19 Guo C, Zhang Y, Han Y, *et al.*. Generation of optical vortices with arbitrary shape and array via helical phase spatial filtering[J]. *Optics Communications*, 2006, 259(2): 449-454.
- 20 Wei G, Lu L, Guo C. Generation of optical vortex array based on the fractional Talbot effect[J]. *Optics Communications*, 2009, 282(14): 2665-2669.
- 21 O'Holleran K, Padgett M J, Dennis M R. Topology of optical vortex lines formed by the interference of three, four, and five plane waves[J]. *Optics Express*, 2006, 14(7): 3039-3044.
- 22 O'Holleran K, Dennis M R, Padgett M J. Topology of light's darkness[J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102(14): 143902.
- 23 O'Neil A T, Macvicar I, Allen L, *et al.*. Intrinsic and extrinsic nature of the orbital angular momentum of a light beam[J]. *Physical Review Letters*, 2002, 88(5): 053601.
- 24 Padgett M J, Courtial J. Poincare-sphere equivalent for light beams containing orbital angular momentum[J]. *Optics Letters*, 1999, 24(7): 430-432.
- 25 Allen L, Courtial J, Padgett M J. Matrix formulation for the propagation of light beams with orbital and spin angular momenta[J]. *Physical Review E*, 1999, 60(6): 7497-7503.
- 26 Yu Daoyin, Tan Hengying. *Engineering Optics*[M]. Beijing: China Machine Press, 2011.  
郁道银, 谈恒英. *工程光学*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- 27 Wei Gongxiang. *On the Generation, Diffractive Properties, and Measurement of Optical Vortices*[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2010.  
魏功祥. *光学涡旋的衍射特性、生成及检测方法的研究*[D]. 济南: 山东师范大学, 2010.
- 28 Berkhout G C G, Beijersbergen M W. Method for probing the orbital angular momentum of optical vortices in electromagnetic waves from astronomical objects[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(10): 100801.

- 29 Guo C, Yue S, Wei G. Measuring the orbital angular momentum of optical vortices using a multipinhole plate[J]. Applied Physics Letters, 2009, 94(23): 231104.
- 30 Guo C, Lu L, Wang H. Characterizing topological charge of optical vortices by using an annular aperture[J]. Optics Letters, 2009, 34(23): 3686–3688.
- 31 Han Y, Zhao G. Measuring the topological charge of optical vortices with an axicon[J]. Optics Letters, 2011, 36(11): 2017–2019.
- 32 Vasnetsov M V, Slyusar V V, Soskin M S. Mode separator for a beam with an off-axis optical vortex[J]. Quantum Electronics, 2001, 31(5): 464–466.
- 33 Leach J, Courtial J, Skeldon K, *et al.*. Interferometric methods to measure orbital and spin, or the total angular momentum of a single photon[J]. Physical Review Letters, 2004, 92(1): 13601.
- 34 Grier D G. A revolution in optical manipulation[J]. Nature, 2003, 424(6950): 810–816.
- 35 Grier D G, Roichman Y. Holographic optical trapping[J]. Applied Optics, 2006, 45(5): 880–887.
- 36 Padgett M J. Optics: Droplets set light in a spin[J]. Nature, 2009, 461(7264): 600–601.
- 37 Tabosa J W R, Barreiro S. Generation of light carrying orbital angular momentum via induced coherence grating in cold atoms[J]. Physical Review Letters, 2003, 90(13): 133001.
- 38 Khaykovich L, Davidson N, Ozeri R. Long spin relaxation times in a single-beam blue-detuned optical trap[J]. Physical Review A, 1999, 59(3): R1750–R1753.
- 39 Ryu C, Cladé P, Natarajan V, *et al.*. Quantized rotation of atoms from photons with orbital angular momentum[J]. Physical Review Letters, 2006, 97(17): 170406.
- 40 Leslie L S, Bigelow N P, Wright K C. Optical control of the internal and external angular momentum of a Bose-Einstein condensate[J]. Physical Review A, 2008, 77(4): 041601.
- 41 Allen L, Babiker M, Power W L. Azimuthal doppler shift in light beams with orbital angular momentum[J]. Optics Communications, 1994, 112(3–4): 141–144.
- 42 Leach J, Padgett M J. Observation of chromatic effects near a white-light vortex[J]. New Journal of Physics, 2003, 5: 154.
- 43 Leach J, Gibson G M, Padgett M J, *et al.*. Generation of achromatic Bessel beams using a compensated spatial light modulator[J]. Optics Express, 2006, 14(12): 5581–5587.
- 44 Maleev I D, Marathay A S, Swartzlander G A, *et al.*. Spatial correlation singularity of a vortex field[J]. Physical Review Letters, 2004, 92(14): 143905.
- 45 Hernandez-Aranda R I, Swartzlander G A. Optical Rankine vortex and anomalous circulation of light[J]. Physical Review Letters, 2007, 99(16): 163901.
- 46 Fu Wenyu, Li Gaoqing, Liu Xiaojun. Propagation of partially coherent vortex beams in the turbulent atmosphere[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(11): 2958–2962.  
付文羽, 李高清, 刘小军. 部分相干涡旋光束在大气湍流中的远场传输特性[J]. 光学学报, 2009, 29(11): 2958–2962.
- 47 Cheng Ke, Zhang Hongrun, Lü Baida. Coherence vortex properties of partially coherent vortex beams[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(1): 246–255.  
程科, 张洪润, 吕百达. 部分相干涡旋光束形成的相干涡旋特性研究[J]. 物理学报, 2010, 59(1): 246–255.
- 48 Swartzlander J G A, Ford E L, Abdul-Malik R S, *et al.*. Astronomical demonstration of an optical vortex coronagraph [J]. Optics Express, 2008, 16(14): 10200–10207.
- 49 Foo G, Palacios D M, Swartzlander J G A. Optical vortex coronagraph[J]. Optics Letters, 2005, 30(24): 3308–3310.
- 50 Lee J H, Foo G, Johnson E G, *et al.*. Experimental verification of an optical vortex coronagraph[J]. Physical Review Letters, 2006, 97(5): 053901.
- 51 Padgett M J. Electromagnetism: Like a speeding watch[J]. Nature, 2006, 443(7114): 924–925.
- 52 Courtial J, Dholakia K, Robertson D A, *et al.*. Measurement of the rotational frequency shift imparted to a rotating light beam possessing orbital angular momentum[J]. Physical Review Letters, 1998, 80(15): 3217–3219.
- 53 Courtial J, Robertson D A, Dholakia K, *et al.*. Rotational frequency shift of a light beam[J]. Physical Review Letters, 1998, 81(22): 4828–4830.
- 54 Skeldon K D, Wilson C, Edgar M, *et al.*. An acoustic spanner and its associated rotational Doppler shift[J]. New Journal of Physics, 2008, 10(1): 013018.

- 55 Yao E, Franke–Arnold S, Courtial J, *et al.*. Fourier relationship between angular position and optical orbital angular momentum[J]. *Optics Express*, 2006, 14(20): 9071–9076.
- 56 Jack B, Padgett M J, Franke–Arnold S. Angular diffraction[J]. *New Journal of Physics*, 2008, 10(10): 103013.
- 57 Padgett M. On the focussing of light, as limited by the uncertainty principle[J]. *Journal of Modern Optics*, 2008, 55(18): 3083–3089.
- 58 Franke–Arnold S, Barnett S M, Yao E, *et al.*. Uncertainty principle for angular position and angular momentum[J]. *New Journal of Physics*, 2004, 6: 103.
- 59 Dholakia K, Simpson N B, Padgett M J, *et al.*. Second–harmonic generation and the orbital angular momentum of light [J]. *Physical Review A*, 1996, 54(5): R3742–R3745.
- 60 Courtial J, Dholakia K, Allen L, *et al.*. Second–harmonic generation and the conservation of orbital angular momentum with high–order Laguerre–Gaussian modes[J]. *Physical Review A*, 1997, 56(5): 4193–4196.
- 61 Torres J P, Osorio C I, Torner L. Orbital angular momentum of entangled counter propagating photons[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(16): 1939–1941.
- 62 Arnaut H H, Barbosa G A. Orbital and intrinsic angular momentum of single photons and entangled pairs of photons generated by parametric down–conversion[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(2): 286–289.