



论文

光子轨道角动量与甲砒霉素和 C₃₂ 卡马西平相互作用的光谱特性实验研究金石琦^{①*}, 郑明^②, 雷波^②, 何翔欣^②, 施文彦^②, 徐刚^②, 叶韧^①, 雷建求^①

① 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201899;

② 上海大学环境与化学工程学院, 上海 200444

*联系人, E-mail: sqjin@mail.shcnc.ac.cn

收稿日期: 2013-10-10; 接受日期: 2013-12-30; 网络出版日期: 2014-07-08

国家自然科学基金资助项目(批准号: 41273141, 41173120)

摘要 光子动量和角动量与物质相互作用后具有不同的光谱特性, 本文分别用光子的动量和角动量与甲砒霉素和 C₃₂ 卡马西平相互作用进行了实验研究, 得到细微不同的光谱特性, 这对用光谱学方法快速检测水质及液体, 空气污染等提供有效快速的实验方法和技术手段.

关键词 光子, 角动量, 甲砒霉素, C₃₂ 卡马西平

PACS: 33.55+b, 42.25.Ja, 42.50.Ct

doi: 10.1360/SSPMA2013-00077

1 引言

频率为 ν 的光子不仅具有能量 $E=h\nu$, 动量 $P=\hbar k$ ($k=2\pi/\lambda$), 还有角动量 $\ell\hbar$, 包括自旋角动量和轨道角动量. 光的线动量具有力学效应, 产生光压. 光的角动量也具有力学效应, 带有角动量的光与粒子相互作用时, 产生轨道角动量传递, 会驱动粒子发生旋转, 这种效应称光学扳手, 或光镊. 光子的自旋量子数为 1, 自旋在动量方向上的投影定义为螺度, 对于自旋为 1 的光子, 螺度可取 +1, 0, -1 三个值. 由于光场是横波, 螺度只能取 ± 1 两个值, 分别对应于右旋 (+1) 和左旋 (-1) 两个圆偏振光.

光波的螺旋相位具有相位结构 $\exp(i\varphi)$ 的光场,

每个光子带有 $\ell\hbar$ 的轨道角动量 (ℓ 是任意整数), φ 是极坐标方位角^[1].

携带轨道角动量的光束由于自由度增加, 大幅度地提高了探测灵敏度, 广泛应用于显微光学^[2], 微观调控^[3], 自由空间通信^[4], 量子信息^[5], 航空航天和潜水通信等高科技领域^[6].

设在实验装置中单光子传播方向为 z , 则光子轨道角动量对应的量子算符为

$$\hat{L}_z = -i\hbar \frac{\partial}{\partial \varphi}. \quad (1)$$

对应的本征方程为

$$\hat{L}_z |\ell\rangle = \ell |\ell\rangle. \quad (2)$$

引用格式: 金石琦, 郑明, 雷波, 等. 光子轨道角动量与甲砒霉素和 C₃₂ 卡马西平相互作用的光谱特性实验研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2014, 44: 810-816
Jin S Q, Zheng M, Lei B, et al. The experimental study spectral characteristics between photon orbital angular momentum and thiamphenicol and C32 carbamazepine (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2014, 44: 810-816, doi: 10.1360/SSPMA2013-00077

(2)式中 $|\ell\rangle$ 是量子化的轨道角动量狄拉克本征态. 具有 ℓ 重螺旋相位的光波在极坐标方位角 φ 的表象下表示为

$$\langle\varphi|\ell\rangle = \exp(i\ell\varphi)/\sqrt{2\pi}. \quad (3)$$

本征方程(2)将光波的宏观相位和光子的微观角动量联系起来^[7], 为在宏观领域探测微观结构提出一条新的技术路径.

实验中的测量结果可以视仪器和量子系统之间耦合的指针换算, 光子与微观粒子相互作用时就能使相互独立的量子系统之间有耦合作用^[8,9], 即光子与粒子之间有耦合作用^[10], 耦合强度减小, 则对应着测量引起的扰动也减小. 光子偏振方向与仪器定位的方向作为测量指针, 改变光子的偏振方向可以区别不同的光子的量子态, 我们能够使用光子的偏振角指针作为测量力学量的输出信息.

本文研究了携带轨道角动量的光子与甲砒霉素和 C_{32} 卡马西平相互作用的光谱特性, 为了更有效地获得相互作用的信息, 对微观粒子运动状态的有效测量, 将在可观测的意义上使粒子原来的运动发生不可逆转的改变^[9]. 我们直接测量单一横向波函数光子, 使用弱测量的平均结果表明^[1]和强测量变量互补的变量, 实验设计中考虑到直接测量从复杂的测量和计算方法中抽出弱测量平均值, 简单地与这一点上波函数的实部和虚部成比例, 相位与波函数之间可表述为^[1,7]

$$\varphi(x) = \arctan \frac{\operatorname{Re}\psi(x)}{\operatorname{Im}\psi(x)}. \quad (4)$$

式中的 $\psi(x)$ 是光子横向波函数.

从方程(1)和(2)知单光子轨道角动量 $L_z, \ell\hbar$, 单光子的角动量与能量比值(动量/能量)可简化为 ℓ/ω . 光子角动量流的平均时间 $\langle\dot{L}_z\rangle$ ^[7]带有角动量的光束投射到靶上, $\langle\dot{L}_z\rangle$ 被吸收导致角动量的改变率 dL_z/dt 称转矩. 转矩与光束功率和光束角频率之间有如下关系式:

$$\frac{\langle\dot{L}_z\rangle}{P} = \frac{1}{\omega_b}. \quad (5)$$

式中的 P 是光束功率, ω_b 是光束角频率.

光子的自旋为1是玻色子, 因此, 光子和光子之间是没有直接相互作用的, 而电子的自旋为1/2是费

米子, 则电子与电子之间是有相互作用的(库仑力). 要想实现光子和光子之间有相互关联作用, 必须经过光与物质的相互作用可以做得^[11-14], 如同空间调制器对局域光调控作用一样^[15,16].

2 实验设计

2.1 理论模型

光与粒子发生相互作用时, 不仅光子的轨道角动量和动量发生变化, 同时粒子本身的轨道角动量和动量也要发生相应的变化^[15-19], 设光子沿 z 轴方向正向传播, 粒子辐射(或吸收)光子, 则粒子的总角动量的量子数 J 改变为

$$\Delta J = J_{\text{final}} - J_{\text{initial}} = -1, 0, +1. \quad (6)$$

粒子辐射右旋圆偏振光 σ^+ , 其磁量子数变化为 $\Delta m_j = -1$, 粒子辐射左旋圆偏振光 σ^- , 其磁量子数变化为 $\Delta m_j = +1$; 粒子吸收右旋圆偏振光 σ^+ , 其磁量子数变化为 $\Delta m_j = +1$, 粒子吸收左旋圆偏振光 σ^- , 其磁量子数变化为 $\Delta m_j = -1$; 粒子辐射或吸收线偏振光 π , 其磁量子数变化为 $\Delta m_j = 0$.

光与物质相互作用时, 光子轨道角动量的转移或产生的干涉效应导致光谱失真, 将甲砒霉素和 C_{32} 卡马西平视为环境, 携带轨道角动量的光子作为量子系统的量子态, 量子系统的量子态和环境(甲砒霉素和 C_{32} 卡马西平)的量子态产生量子纠缠, 光子量子系统的相干性逐步消退出现退相干过程, 此时量子系统由纯态系综退相干到混态系综, 光子量子系统由一个纯态的初态或因相位阻尼衰减或因振幅阻尼衰减以及退极化方式而成为一个混合态.

分子的振动和转动的作用对光子角动量有调控特性^[20], 没有与粒子发生相互作用的光子, 其波函数及波前都没有变化, 而与粒子间有相互作用的光子, 其波前将视相互作用时轨道角动量的转移而发生变化^[21,22], 测得波函数本征态的概率有很大不同, 即, 测量时向本征态坍缩的概率不同, 导致光谱形态发生了很大的改变.

2.2 实验

携带光子的动量和角动量与甲砒霉素和 C_{32} 卡马西平相互作用的实验设置如图1所示. 图中LS: 波长为532 nm, 功率为30 mW的激光器; Slit: 狭缝; Lens:

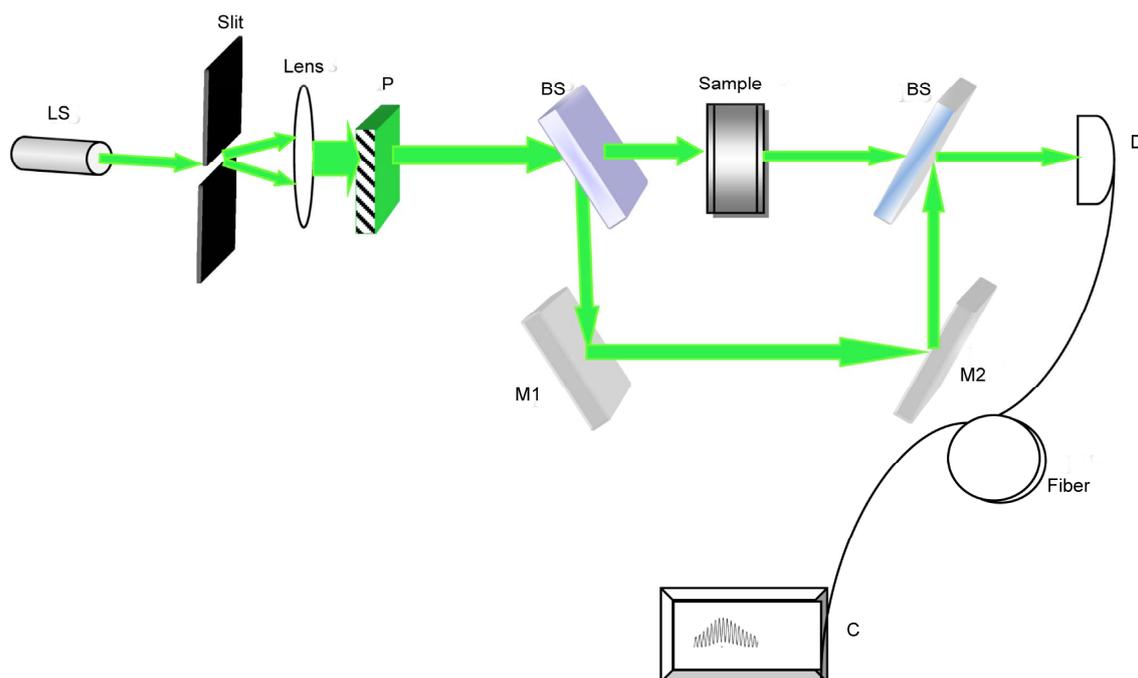


图1 (网络版彩图)携带光子的动量和角动量光束与甲砒霉素和 C₃₂ 卡马西平相互作用的实验布局图. LS: 波长为 532 nm, 功率为 30 mW 的激光器; Slit: 狭缝; Lens: 透镜; P: 起偏器; BS: 半透半反镜; M1, M2: 反射镜; Sample: 样品池; D: 光电探测器; Fiber: 传输光纤; C: 信息和图像处理

Figure 1 (Color online) A sketch of the setup of the photon with momentum and angular momentum interacts with Thiamphenicol and C₃₂ Carbamazepine. LS: wavelength 532 nm, power 30 mW laser; Slit; Lens; P: polarization; BS: beam splitter; M1, M2: mirror; sample; D: photon detector; fiber; C: information and image processor.

透镜; P: 起偏器; BS: 半透半反镜; M1, M2: 反射镜; Sample: 样品池; D: 光电探测器; Fiber: 传输光纤; C: 信息和图像处理器.

波长为 532 nm, 功率为 30 mW 连续可调谐激光器经狭缝, 狭缝位于透镜的焦点上, 激光束经透镜准直后进入起偏器, 带有轨道角动量的光束分成两束, 一束经样品池与样品直接相互作用, 另一束经两次反射产生光程差, 最后与样品相互作用的光束产生干涉, 光电探测器将获得与样品作用后的波前信息及图像信息, 探测信号经光纤传输到信号处理器上进行图像处理.

图 2 是甲砒霉素的分子结构图.

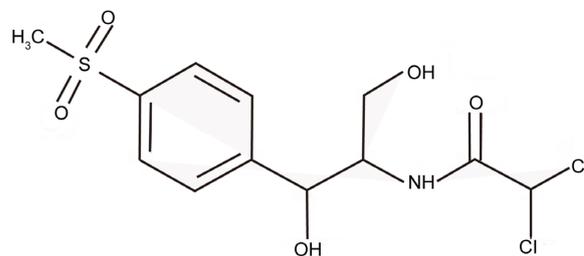


图 2 甲砒霉素分子结构图

Figure 2 Molecular structure of thiamphenicol.

中表示出来.

图 4 是甲砒霉素样品平行放置, 实验中选用甲砒霉素的浓度为 100 mg/L, 波长 532 nm, 功率为 30 mW 的激光进入饱和状态, 携带轨道角动量的光子与甲砒霉素(Thiamphenicol)相互作用时的的光强光谱. 由于是光强的饱和状态, 光谱的线形不能很细致地辨别出微小的变化. 因此实验中必须用滤光片保证光的强度处于非饱和的状态. 设置实验环境的原始光谱波长 532.8 nm 处的峰值为 11684, 波长 534 nm

3 实验系统及测量结果

激光波长 532 nm, 功率 30 mW, 甲砒霉素 100 mg/L, 图 3 是光子轨道角动量与甲砒霉素相互作用时实验环境标定的无样品时光谱形状, 以此为基础的实验数据与其他参数变化时的曲线图分别在图 4-6

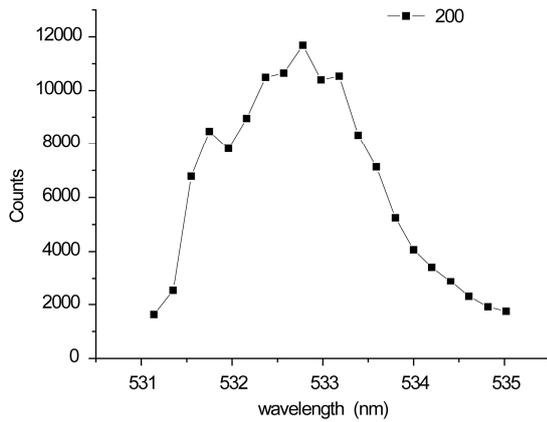


图3 200-532 nm 原始光谱, 激光波长 532 nm, 功率 30 mW
Figure 3 200-532 nm original spectrum, laser wavelength 532 nm, power 30 mW.

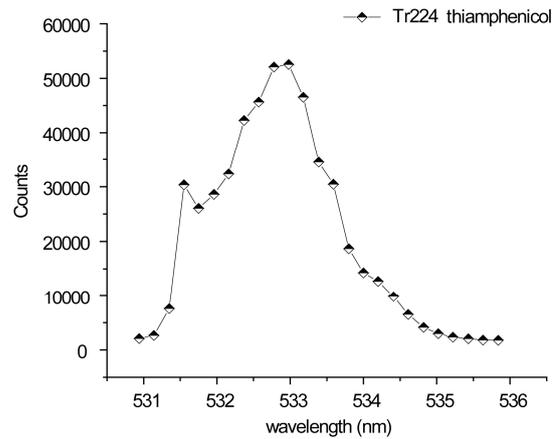


图5 Tr224-甲砒霉素右倾角, 激光波长 532 nm, 功率 30 mW, 甲砒霉素 100 mg/L
Figure 5 Tr224-right inclination thiamphenicol, laser wavelength 532 nm, power 30 mW, thiamphenicol 100 mg/L.

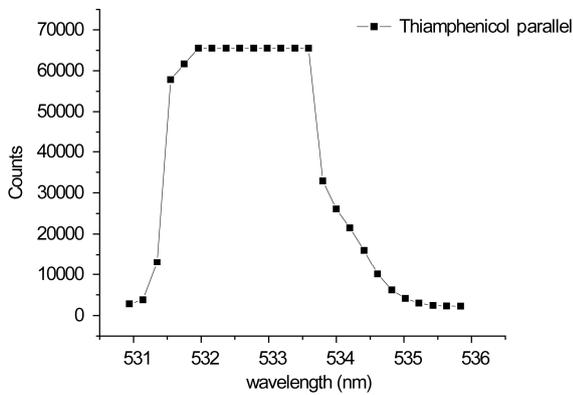


图4 甲砒霉素样品平行放置 P200, 532 nm 饱和光强光谱变化
Figure 4 Thiamphenicol sample is placed in parallel P00, 532 nm saturation intensity spectral changes.

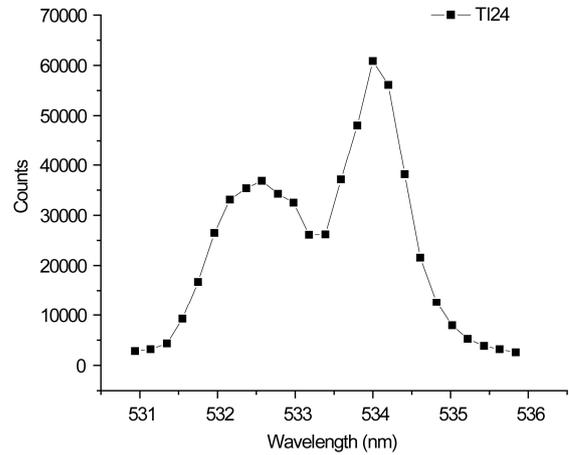


图6 T124-甲砒霉素左向倾斜, 激光波长 532 nm, 功率 30 mW, 甲砒霉素 100 mg/L
Figure 6 T124-left inclination thiamphenicol, laser wavelength 532 nm, power 30 mW, thiamphenicol 100 mg/L.

处的峰值为 4061, 如图 3 所示, 可以说在 534 nm 处波长没有显著特殊的单独峰. 样品甲砒霉素(Thiamphenicol, 100 mg/L)右倾角放置时, 光谱波长 532.98 nm 处的峰值为 52545, 波长 534 nm 处的峰值为 14273, 如图 5 所示. 样品甲砒霉素(Thiamphenicol, 100 mg/L)左倾角放置时, 光谱波长 532.5 nm 处的峰值为 35000, 波长 534 nm 处的峰值为 60866, 如图 6 所示.

原始光谱的最高峰值 11684 在 532.8 nm 处, 右倾角放置的甲砒霉素(Thiamphenicol, 100 mg/L)最大峰值 52545 光谱略有小小的偏移为 532.98 nm, 具有红移现象, 移出了 0.18 nm, 如图 5 所示. 而图 6 所示左倾角放置的甲砒霉素(Thiamphenicol, 100 mg/L)最大峰值 60866 光谱位于 534 nm 处, 红移出 1.2 nm.

图 7-10 是 C₃₂ 卡马西平 20 mg/L 与激光波长 532 nm, 功率 30 mW 相互作用的曲线图.

图 7 定格实验环境的没有加入样品光谱标定, 有两个略显峰值 8046 分别在 532.78 nm 处和 8626 在 534 nm 处. 样品平行放置的光谱峰值分别为 65535 在 532.78 nm 处和 61455 在 534 nm 处, 如图 8 所示. 右倾角和左倾角放置的样品两个峰值并不明显, 只有 534 nm 处的峰值没有改变光谱波长位置, 但峰值量有所改变, 右倾角时 532.78 nm 的峰值 50169, 534 nm 处的峰值班为 65535, 如图 9 所示. 左倾角 532.78 nm

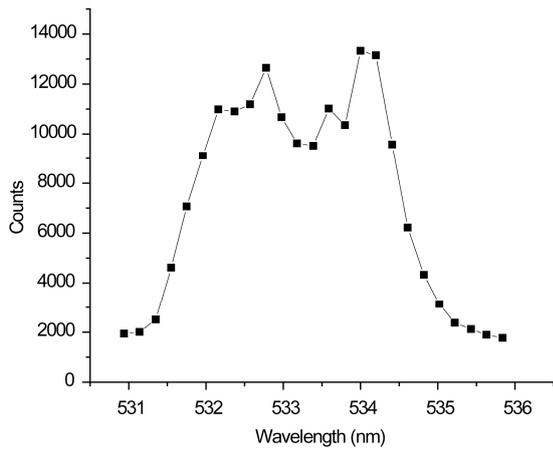


图7 激光波长 532 nm, 功率 30 mW, 无样品
Figure 7 Laser wavelength 532 nm, power 30mW, no sample.

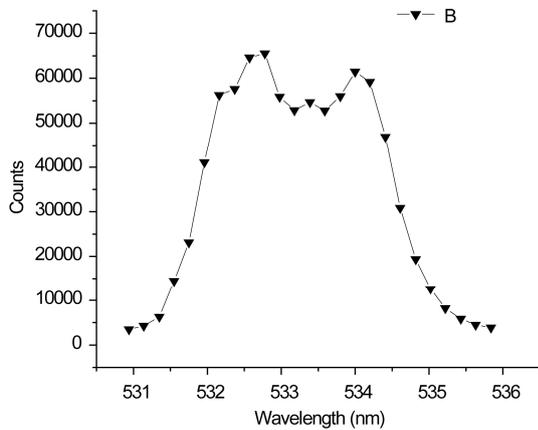


图8 C₃₂卡马西平 20 mg/L, 激光波长 532 nm, 功率 30 mW, B-样品平行
Figure 8 C₃₂ Carbamazepine 20 mg/L, laser wavelength 532 nm, power 30 mW, B-parallel samples.

处的光谱值对应 11319, 不是光谱中的峰值所在处, 左倾放置的光谱峰值仍在 534 nm 波长处, 为 14438, 如图 10 所示.

4 结论

携带轨道角动量的光束传输过程中其波前相位 $\exp(il\varphi)$ 随空间方位角 φ 的改变 $\Delta\varphi$, 轨道角动量正负分量之间的相移体现出透射光强轮廓的旋转^[18]. 光的波动性提供了丰富的形态信息, 本文正是利用波

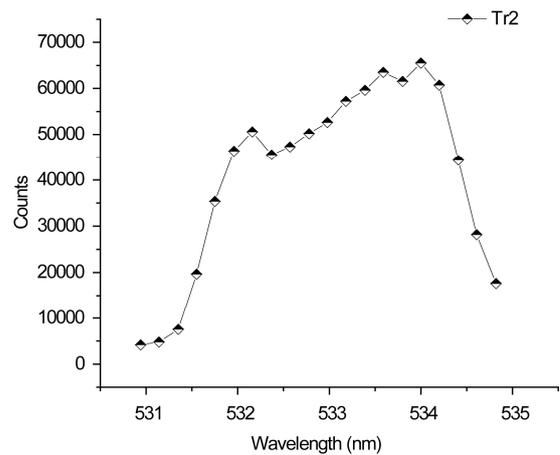


图9 Tr2 右倾角, C₃₂卡马西平 20 mg/L, 激光波长 532 nm, 功率 30 mW

Figure 9 Tr2 right inclination, C₃₂ Carbamazepine 20 mg/L, laser wavelength 532 nm, power 30 mW.

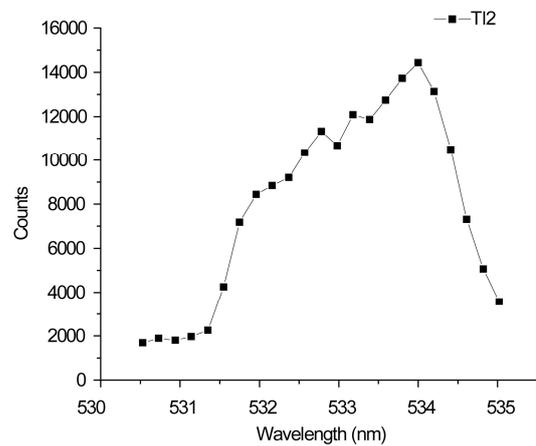


图10 T12 左倾角, C₃₂卡马西平 20 mg/L, 激光波长 532 nm, 功率 30 mW

Figure 10 T12 left inclination, C₃₂ Carbamazepine 20 mg/L, laser wavelength 532 nm, power 30 mW.

前相位随空间方位角的变化和光的波动性特点, 在实验中找到光子轨道角动量与甲砒霉素和 C₃₂ 卡马西平相互作用的光谱特性, 部分光子作用后有红移现象发生.

实验中存在的问题: 受实验条件所限, 没有在光路中加上产生高阶光螺旋的光学元器件, 因而使光子效率下降.

致谢 感谢中国科学院上海光学精密机械研究所韩申生研究员的大力支持.

参考文献

- 1 Lundeen J S, Suthexland B, Patel A, et al. Direct measurement of the quantum wavefunction. *Nature*, 2011, 474: 188–191
- 2 FÜRHPATER S, Jesacher A, Bernet S, et al. Spiral interferometry. *Opt Lett*, 2005, 30: 1953–1955
- 3 Grier D G. A revolution in optical manipulation. *Nature*, 2003, 424: 810–816
- 4 Bowman R, Gibson G, Padgett M. Particle tracking stereomicroscopy in optical tweezers: Control of trap shape. *Opt Express*, 2010, 18: 11785–11790
- 5 姚志欣, 钟建伟, 毛邦宁, 等. 具有不寻常角动量的非常光子. *中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学*, 2009, 39(5): 669–680
- 6 Mair A, Vaziri A, Weins G, et al. Entanglement of the orbital angular momentum states of photons. *Nature*, 2001, 412: 313–316
- 7 Lundeen J S, Bamber C. Procedure for direct measurement of general quantum states using weak measurement. *Phys Rev Lett*, 2012, 108: 070402
- 8 Harris J G E, Mikhail D, Lukin, coherent sensing of a mechanical resonator with a single-spin qubit. *Science*, 2012, 335: 1603–1606
- 9 Zaks B, Liu R B, Sherwin M S. Experimental observation of electron-hole recollisions. *Nature*, 2012, 483: 580–583
- 10 Kippenberg T J, Vahala K J. Cavity optomechanics: Back-action at the mesoscale. *Science*, 2008, 321: 1172–1176
- 11 Demore C E M, Yang Z Y, Volovick A, et al. Mechanical evidence of the orbital angular momentum to energy ratio of vortex beams. *Phys Rev Lett*, 2012, 108: 194301
- 12 Byendu Roy D. Two-photon scattering by a driven three-level emitter in a one-dimensional waveguide and electromagnetically induced transparency. *Phys Rev Lett*, 2011, 106: 053601
- 13 Gao C Q, We G H, Weber H. Orbital angular momentum of the laser beam and the second order intensity moments (in Chinese). *Sci China Ser A*, 2000, 43(12): 1306–1311 [高春清, 魏光辉, Weber H. 光束的轨道角动量及其与光强二阶矩的关系. *中国科学(A 辑)*, 2000, 30(9): 823–827]
- 14 Lü H, Ke X Z. Effects of aperture on the orbital angular momentum of hollow vortex beam (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2011, 41(8): 932–941 [吕宏, 柯熙政. 光阑对暗中空涡旋光束轨道角动量的影响. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2011, 41(8): 932–941]
- 15 Shvedov V, Wieslaw K, Volyar A, et al. Focusing and correlation properties of white-light optical vortices. *Opt Express*, 2005, 13: 7393–7398
- 16 Haaudin F, Rojas R G, Bortolozzo U, et al. Vortex emission accompanies the advection of optical localized structures. *Phys Rev Lett*, 2011, 106: 063901
- 17 Arnold S F, Gibson G, Boyd R W, et al. Rotary photon drag enhanced by a slow-light medium. *Science*, 2011, 333: 65–67
- 18 Delbeiq M R, Schmitt V, Parmentier F D, et al. Coupling a quantum dot, fermionic leads, and a microwave cavity on a chip. *Phys Rev Lett*, 2011, 107: 256804
- 19 Cai X L, Wang J W, Strain M J, et al. Integrated compact optical vortex beam emitters. *Science*, 2012, 338: 363–366
- 20 Ke X Z, Chen J, Lü H. Study of double-slit interference experiment on the orbital angular momentum of LG beam (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2012, 42(10): 996–1002 [柯熙政, 谌娟, 吕宏. 涡旋光束的轨道角动量双缝干涉实验研. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2012, 42: 996–1002]
- 21 Eggleston M, Godat T, Munro E M A, Alonso et al. Ray transfer matrix for a spiral phase plate. *J Opt Soc Am A*, 2013, A30(12), 2526–2530
- 22 Ou J, Jiang Y S, Zhang J H, et al. Reflection of laguerre-gaussian beams carrying orbital angular momentum: A full Taylor expanded solution. *J Opt Soc Am A*, 2013, 30(12): 2561–2571

The experimental study spectral characteristics between photon orbital angular momentum and thiamphenicol and C₃₂ carbamazepine

JIN ShiQi^{1*}, ZHENG Ming², LEI Bo², HE XiangXin², SHI WenYan², XU Gang²,
YE Ren¹ & LEI JianQiu¹

¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics of Chinese Academic of Science, Shanghai 201899, China;

² School of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China

We experimentally demonstrate for the first time that photon with momentum and angular momentum can be affected the materials. The effect of the spectral properties of light is shown by a comparison of the photon with momentum and angular momentum interacted with thiamphenicol and C₃₂ carbamazepine. Using spectroscopic methods in detection of water and liquids, air pollution, etc. can provide fast and effective experimental methods and techniques.

photon, angular momentum, thiamphenicol, C₃₂ Carbamazepine

PACS: 33.55+b, 42.25.Ja, 42.50.Ct

doi: 10.1360/SSPMA2013-00077