

反射后激光(光子)螺旋性改变的量子论 解释和信息论意义*

郭开惠 姜向东

(西南交通大学应用物理系 成都 610031)

摘要 基于近年来王顺金提出的处理螺旋光纤中激光(光子)传播时的螺旋性变化的理论方法和所得结果,分析了激光(光子)在反射后螺旋性(左旋与右旋)互换这一实验事实,发现激光(光子)反射的瞬间过程会产生一个极高的激光束回转频率,它与激光圆偏振(光子自旋)发生科式惯性力耦合,进而改变激光(光子)的螺旋性. 还发现当激光束回转频率达到极大时,将发生激光(光子)螺旋性(左旋与右旋)互换. 讨论了激光反射后螺旋性互换的信息论含义及其应用.

关键词 激光(光子)反射 螺旋性反转 量子论解释 信息论意义

随着现代光学、光纤技术和激光高科技的迅速发展,特别是激光通讯和光量子通讯的近期成就,以及基于量子光学原理的量子计算的可能性,促使人们深入研究激光和光量子的各个方面,以便加以控制和利用. 其中,激光的偏振和光子自旋的控制和利用就是重要的研究课题.

另一方面,激光通讯和光量子通讯以及光纤传感器,要求充分利用激光和光子作为信息载体储存信息的潜力,而这又涉及激光和光子的动力学自由度的问题. 激光包含光强(振幅或光子数)、相位(光子相位)和极化偏振(光子自旋)三方面的自由度,它们都可以作为信息载体储存信息. 当前,大多数激光通讯只用到光强(光子数)自由度,而激光全息术才用到激光的振幅和相位这两个自由度. 最近,光量子通讯已用到光子的自旋(偏振)自由度^[1],而量子计算专家最近又提出利用激光驱动的原子的几何相位(绝热贝利相位)进行量子计算的建议^[2]. 可见,激光和光子的偏振和自旋的控制及利用已成为当前高科技的急迫课题.

关于激光(光子)圆偏振(自旋)的一个早已被人们发现而后又被人们忽视的实验事实是,激光(光子)在反射过程中其螺旋性要发生反转:左旋与右旋互换^[3]. 经典电磁理论对一现象的解释并不容易,而微观量子论的解释则尚未见到. 原因在于,支配这一过程的因素是转动非惯性系中的科利奥力,而经典电磁理论和量子电磁理论对极高速转动频率

2002-01-28 收稿

* 西南交通大学基础学科研究基金(2002B05)资助

下科式惯性力耦合的描述与处理均存在困难. 因为, 把惯性系中的理论推广到非惯性系会出现一些实质性的困难. 本文基于近年王顺金提出的处理螺旋光纤内激光(光子)传播过程中螺旋性变化的理论方法和所得结果^[4], 把它用于分析激光(光子)在反射后螺旋性(左旋与右旋)互换这一实验, 发现激光(光子)在反射的瞬间过程会产生一个极高的激光束回转频率, 它与激光圆偏振(光子自旋)发生科式惯性力耦合, 进而改变激光(光子)的螺旋性. 当激光束回转频率达到极大时, 将发生激光(光子)螺旋性(左旋与右旋)互换.

按照王顺金的工作^[4], 平面圆形光纤和螺旋光纤内激光(光子)传播过程中螺旋性变化满足

$$i \frac{\partial \psi(t)}{\partial t} = \hat{H}(t) \psi(t), \quad (1)$$

$$\hat{H}(t) = \boldsymbol{\Omega}(t) \cdot \boldsymbol{S}, \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\Omega}(t) = c\boldsymbol{k}(t) = \Omega(\sin\theta\cos\omega t, \sin\theta\sin\omega t, \cos\theta), (\Omega = ck), \quad (3)$$

其中 $\psi(t)$ 是描述激光螺旋性或光子自旋的波函数, 可以是右旋 ($m_s = +1$)、左旋 ($m_s = -1$) 或它们的线性迭加. $\hat{H}(t)$ 来自激光或光子在螺旋光纤中传播时形成的波矢转动非惯系的转动-自旋之间的科利奥力耦合, 它把激光波矢(光子动量)变化与激光极化(光子自旋)方向变化耦合起来; 这样一来, 激光(光子)在弯曲光纤中的非惯性传播自然会带动极化或自旋矢量的变化. \boldsymbol{S} 是自旋为 1 的光子的自旋算符, 其 3 个分量的矩阵表示为:

$$\hat{S}_x = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -i \\ 0 & i & 0 \end{pmatrix}, \quad \hat{S}_y = \begin{pmatrix} 0 & 0 & i \\ 0 & 0 & 0 \\ -i & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \hat{S}_z = \begin{pmatrix} 0 & -i & 0 \\ i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

k 和 Ω 分别为激光(光子)的波矢和频率, θ 为螺旋光纤的坡度角, ω 为激光或光子在螺旋光纤中传播时波矢 $\boldsymbol{k}(t)$ 的转动频率, 如图 1 所示.

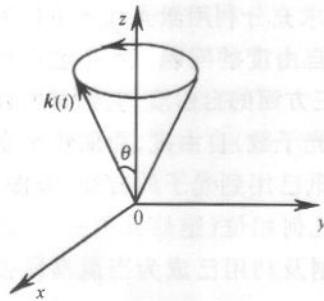


图 1 螺旋光纤中传播的激光波矢的转动

由螺旋光纤的几何尺寸确定

$$\omega = \frac{2\pi c}{\sqrt{d^2 + (2\pi a)^2}}, \quad \text{ctg}\theta = \frac{d}{2\pi a}, \quad (5)$$

其中 a 为螺旋半径, d 为螺距, c 为光速. 方程(1)可以在旋转系中求解, 得

$$\psi(t) = e^{-i\hat{H}(\omega)t} \psi(0), \quad (6)$$

$$\hat{H}(\omega) = \boldsymbol{\Omega}(\bar{\theta}) \cdot \boldsymbol{S}, \quad (7)$$

$$\boldsymbol{\Omega}(\bar{\theta}) = \bar{\Omega}(\sin\bar{\theta}, 0, \cos\bar{\theta}), \quad (8)$$

$$\bar{\Omega} = \gamma\Omega, \quad \gamma = \sqrt{1 - 2\frac{\omega}{\Omega}\cos\theta + \left(\frac{\omega}{\Omega}\right)^2}, \quad (9)$$

$$\sin\bar{\theta} = \sin\theta/\gamma, \quad \cos\bar{\theta} = \left(\cos\theta - \frac{\omega}{\Omega}\right)/\gamma, \quad (10)$$

激光或光子的螺旋性算符为

$$\hat{h} = \frac{\boldsymbol{\Omega}(\bar{\theta}) \cdot \boldsymbol{S}}{\Omega}, \quad (11)$$

其本征态为右旋态 ($m_s = +1$) 和左旋态 ($m_s = -1$) η_+ 和 η_- ,

$$\hat{h}\eta_z = \pm 1\eta_z,$$

若激光(光子)初始极化态为 $\psi(0) = \eta_m (m = \pm 1)$, 则 \hat{S}_z 的平均值为

$$\langle \eta_m(t) | \hat{S}_z | \eta_m(t) \rangle = m \cos \bar{\theta} = m \left(\cos \theta - \frac{\omega}{\Omega} \right) / \sqrt{1 - 2 \frac{\omega}{\Omega} \cos \theta + \left(\frac{\omega}{\Omega} \right)^2}$$

考虑两种情况:

(1) 适当选择 a, d , 使 $a \rightarrow 0, d \rightarrow 0$ 时, $\theta \rightarrow 0, \omega \rightarrow \infty$. 这时, 初态螺旋性为 $m = +1$ 的光子, 通过光纤后螺旋性将变为 $m = -1$. 这是因为

$$\langle \eta_m(t) | \hat{S}_z | \eta_m(t) \rangle = -m, (\omega \rightarrow \infty, \theta \rightarrow 0). \quad (14)$$

(2) 适当选择 a, d , 使 $a \rightarrow 0, d \rightarrow 0$ 时, $\theta \rightarrow \frac{\pi}{2}, \omega \rightarrow \infty$. 这时, 初态螺旋性为 $m = +1$ 的激光或光子, 通过光纤转半周后螺旋性将变为 $m = -1$. 这是因为初态螺旋性沿 x 方向的激光(光子), 进入光纤后, 螺旋性将逐渐趋于 $-z$ 方向, 离开光纤时又逐渐返回到 x 方向, 而波矢已变至 $-x$ 方向, 所以螺旋性变为 $m = -1$. 这种情况相应于螺旋性激光(光子)在镜面反射后螺旋性的变化: 左旋与右旋互换. 螺旋性激光(光子)在镜面上的反射是瞬息过程, 其回转频率 $\omega \rightarrow \infty$.

上述分析表明, 激光(光子)螺旋性在波矢以极大转动频率变化时会发生变化, 其动力学原因是光子自旋与波矢转动系之间的科利奥力耦合. 这是非惯性系中的惯性力效应, 类似引力效应, 超出了电磁相互作用的范围, 必须在非惯性系中表述麦克斯韦方程, 才能恰当描述. 这正是困难所在. 本文基于的理论, 是在螺旋光纤诱导的非惯性系中对麦克斯韦方程的近似和简化处理. 该理论在激光(光子)的非绝热贝利(几何)相位, 激光(光子)在反射过程中螺旋性反转等方面, 得到了符合实验的、正确的结果.

文献[3]给出这一实验现象的经典描述: 偏振态为 $\hat{E}_\lambda = \tilde{E}_0 \begin{pmatrix} 1 \\ \pm i \end{pmatrix}$ 的圆偏振光, 从折射率为 n_i 的介质入射到折射率为 n_r 的介质, 在接近垂直入射时, 其反射光偏振态是

$$\hat{E}_{\bar{\lambda}} = \left(\frac{n_i - n_r}{n_i + n_r} \right) \tilde{E}_0 \begin{pmatrix} 1 \\ \pm i \end{pmatrix}, \quad (15)$$

仍为圆偏振光, 但入射的右旋光变为反射的左旋光, 入射的左旋光变为反射的右旋光, 与上述量子论解释一致.

激光(光子)在反射过程中螺旋性的反转具有深刻而重要的信息论意义. 如果用右旋激光和左旋激光表示 0 和 1, 则镜面反射既可实现激光路径的改变, 又可实现 0 和 1 互换的操作. 再利用旋光材料改变激光路径而不改变其螺旋性, 实现只改变路径不改变 0 和 1 记忆的操作. 进一步使用分光镜后, 就有可能实现用多束圆偏振激光为信息的物理载体的光计算机的网络单元. 另外一个可能的意义, 就是在目前发展极为迅速的偏振态光纤传感器中得到应用.

作者感谢与王顺金教授的有益讨论.

参考文献 (References)

- 1 Muller A, Zbinden H, Gisin N. *Europhys. Lett.*, 1996, **33**:335
- 2 DUAN L M, Ciac J I, Zoller P. *Science*, 2001, **292**:1695
- 3 YUAN Guo-Cai. *Selected Lectures on Optics*. Beijing: Higher Education Press, 1991. 275—278 (in Chinese)
(袁国才. 光学选讲. 北京: 高等教育出版社, 1991. 275—278)
- 4 WANG Shun-Jin. *Z. Phys.*, 1994, **B96**:103

**Quantum Explanation and Information Theoretical Implication
of Helicity Inversion of Laser (Photons) During Reflection ***

GUO Kai-Hui JIANG Xiang-Dong

(Department of Applied Physics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract The experimental phenomenon—the helicity inversion of laser (photons) during reflection has been explained based on the quantum theory of the laser (photons) propagation through an optical helix. It is found that the instant process of the laser (photons) reflection on a mirror will produce an extremely high rotation frequency of the wave vector. The coriolis coupling between the spin of the photon and the rotation of the wave vector is the dynamical factor which dominates the process and causes helicity inversion. The implication of the helicity inversion in information theory is also discussed.

Key words reflection of laser (photons), helicity inversion, quantum explanation, implication in information theory

Received 28 January 2002

* Supported by Foundation Sciences Southwest Jiaotong University (2002B05)