

单光子水平上几何位相的实验观察*

李 劬 黄建东 朱亚军 张则斌 陈英礼
(上海交通大学应用物理系, 上海 200030)

摘 要 光在单模光纤中传播时可能获得与单模光纤几何位形有关的附加位相。本文报道了在单光子水平上对这种几何位相的实验观察, 证实了这种几何位相的量子起源。

关键词 几何位相, Berry 位相, 单光子实验。

1984 年 Berry^[1] 指出一个量子系统经历一绝热演化过程再回到其初始状态后, 会获得一个附加的非动力学位相。这一位相与系统状态在参量空间中的几何路径有关系, 此位相被称为 Berry 位相, 几何位相或拓扑位相。随后, Aharonov 和 Anandan^[2] 进一步指出绝热这一条件不是必要的。Samnel 和 Bhandary^[3] 更进一步放宽了几何位相存在的条件。现在已知几何位相存在于从高能物理到光学的许多物理过程中。在光学中迄今为止所报道过的有关几何位相的实验大致可以分为三种不同类型:

- 1) SO(3) 群。相应于电磁波的传播方向改变而其偏振态保持不变^[4]。
- 2) SU(2) 群。相应于光强守恒的线性变换^[5]。
- 3) SU(1, 1) 群。例如在与压缩态有关的实验中^[6]。

本文报道第一种类型的实验研究。Chiao 等在 1986 年发表了在这方面的作品^[4, 7]。他们利用光在单模光纤中的传播来测量几何位相。当光在单模光纤中传播时, 其波矢 \mathbf{k} 几乎沿着光纤的轴线指向传播方向, 当单模光纤被缠绕成某种光滑空间曲线形状时, \mathbf{k} 也随之改变。由于光子是无静止质量的, 自旋为 1 的玻色子, 其螺旋性 $s^* k$ 仅可能为 +1 或 -1, 其中 s 为自旋算符。如果没有外界作用改变其螺旋性符号的话, 它将保持为 +1 或 -1 不变。如果将单模光纤绕成一圈空间螺线, 同时保持其入射端与出射端切线平行, 则在这一段光纤中传播的光波的 \mathbf{k} 矢量的端点将在 \mathbf{k} 空间球面上(半径为 $|\mathbf{k}|$) 划出一封闭曲线。根据 Berry 理论, 这一封闭曲线所包围的球面部分对球心(\mathbf{k} 矢量始端)所张的立体角 $\Omega(c)$ 即为光子经过这一条光纤所获得的几何相位 $r(c)$, 可用下式表示

$$r(c) = -\sigma\Omega(c) \quad (1)$$

其中 c 表示 \mathbf{k} 矢量终端所划的封闭曲线, $\sigma = \pm 1$ 为光子的螺旋性。由于左旋和右旋圆偏振光分别对应于 $\sigma = +1$ 和 $\sigma = -1$, 由(1)式可以预料, 沿着某一绕成一定空间曲线的单模光纤

* 国家自然科学基金资助课题。

收稿日期: 1995 年 10 月 20 日; 收到修改稿日期: 1996 年 10 月 3 日

传播的左旋和右旋圆偏振光将获得符号相反的几何位相,也就是说他们彼此之间将获得一个附加的几何位相差。

如果在光纤的入射端有一线偏振模,则该模式在光纤出射端应仍为线偏振,只是其偏振面应转过 θ 角度,而

$$\theta = r(c) = -\sigma\Omega(c) \quad (2)$$

旋转方向取决于光纤几何路径是左手螺旋还是右手螺旋。Chiao 等人的实验^[7]与 Berry 的理论符合得很好。基于同样的思路,在更一般的实验条件下(例如允许光纤入射端和出射端不平行)作者曾进行了类似的实验,同样得到肯定的结果^[8]。但上述实验都是在经典水平上进行的(光纤中线偏振光场的功率为 mW 级)。在单光子水平上进行上述实验,迄今为止未见报导(Hariharan 等人^[9, 10]曾报导过单光子水平上的实验,不过那是属于 SU(2) 群的,而非 SO(3) 群)。为证实上述几何位相的量子本性,本文在单光子水平上进行了实验验证。

实验装置如图 1 所示。P₁ 为起偏器, P₂ 为检偏器, L₁、L₂ 为显微物镜,用于光纤的输入输出的耦合, A 为光学衰减器, A_p 为一小孔光阑。除激光器和光学衰减器外,整个光路均置于暗箱中以避免杂散光的影响。光纤缠绕在一圆筒 S 上,保证出射端与入射端平行。光纤在缠绕前先插入一根细的 Teflon 管内,光纤可在细管内自由伸展。将 Teflon 管绕成给定的空间曲线形状时,其中的光纤也就沿同样的曲线绕行;同时由于光纤能在管内自由伸展,所以光纤不会因缠绕时的人为扭曲而产生附加的应力双折射^[11]。作者采用文献[12]中所述的方法证实了由光纤的扭曲而产生的应力的确是可以忽略的。在本文的实验中,光纤的弯曲半径均足够大,因而由弯曲产生的双折射也可以忽略。为了避免光纤本征双折射的影响,本文选用了优质单模光纤并对其进行了筛选。实验中所用的光纤在缠绕前均先在自由伸直的状态进行检验。以线偏振光从入射端耦合进自由伸直的光纤,在出射端检验其偏振态。检验结果表明,在本文实验所用的长度范围内,对不同方位的入射线偏振光,出射光仍保持线偏振态,出、入射端消光方位的变化不超过 2°^[11]。

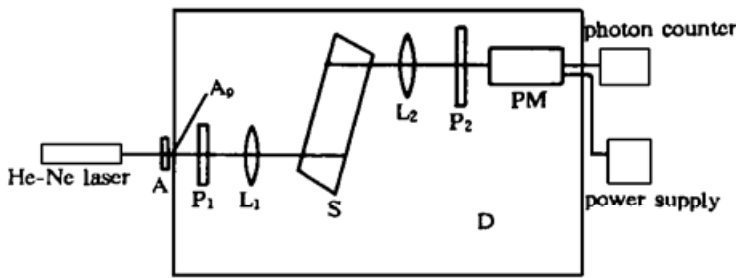


Fig. 1 Experimental Set-up

本文实验中所用的光纤长度为 65 cm, 选用合适的光学衰减器, 使得进入光纤的激光功率为 10^{-13} W 量级, 这样就保证了任一时刻在光纤中同时存在两个或两个以上光子的几率很小(见附录), 保证了实验在单光子水平上进行。

在本文实验中先通过起偏器 P₁ 设定入射端的线偏振方位, 然后在出射端改变 P₂ 透振方位进行光子计数。P₂ 的初始透振方位与 P₁ 的透振方位垂直, 且旋转角度以 ω 表示。实验中利用拉曼谱仪中的光电倍增管及计数装置进行光子计数。典型的实验结果示于图 2。图中 N_d 表示每秒的光子计数。从图 2 中 $N_d \sim \omega$ 曲线的极小值对应的角度可以得到出射端线偏振方位相对于入射端线偏振方位所转过的角度 $\theta(c)$ 。

根据 Berry 理论, 改变光纤缠绕所循曲空间曲线形状将得到不同的 $\Omega(c)$ 和 $\theta(c)$ 值, 图 3 给出 $\theta(c) \sim \Omega(c)$ 曲线, 其中实线为理论曲线, 实心圆点为本实验中在单光子水平下所测得的实验点, 其余为经典水平下所得到的实验结果, 用作比较。在单光子水平上, 实验结果与

理论预言符合得很好, 这说明这种几何位相虽然可在经典情况下表现出来, 但是它确实是起源于单个光子的量子的特性。

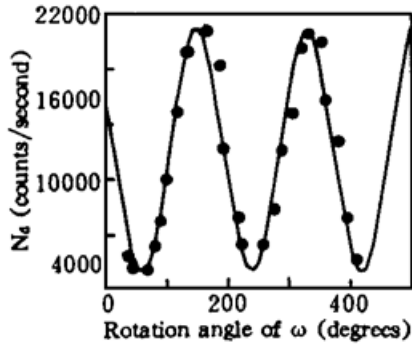


Fig. 2 $N_d \sim \omega$ Curve $\Omega(c) = 240^\circ$

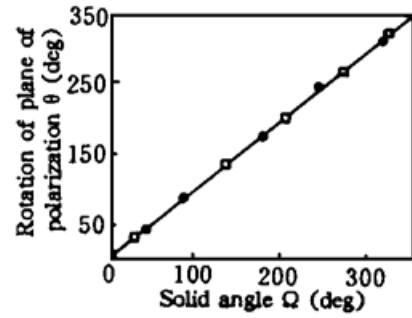


Fig. 3 Measured angle θ of rotation of linearly polarized light vs calculated solid angle Ω in momentum space

参 考 文 献

- [1] M. V. Berry, Quantal phase factors accompanying adiabatic changes. *Proc. Roy. Soc.*, 1984, **A392** (1) : 45~ 47
- [2] Y. Aharonov, J. Anandan, Phase change during a cyclic quantum evolution. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(10) : 1593~ 1596
- [3] J. Samuel, R. Bhandari, General setting for Berry's phase. *Phys. Rev. Lett.*, 1988, **60**(23) : 2339~ 2342
- [4] R. Y. Chiao, Y. S. Wu, Manifestation of Berry's topological phase for the photon. *Phys. Rev. Lett.*, 1986, **57**(8) : 933~ 936
- [5] T. H. Chyba, L. J. Wang, I. L. Mande *et al.*, Measurement of the pancharatnam phase for a light beam. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(7) : 562~ 564
- [6] G. S. Agarwal, Quantum theory of partially polarizing devices and $SU(1, 1)$ Berry phases in polarization optics. *Opt. Commun.*, 1991, **82**(3/4) : 213~ 217
- [7] A. Tomita, R. Y. Chiao, Observation of Berry's topological phase by use of an optical fiber. *Phys. Rev. Lett.*, 1986, **57**(8) : 937~ 940
- [8] Jun Ye, Qu Li, Shaoqing Peng *et al.*, Polarization rotation in optical fibers due to geometric path variance. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(12) : 1724~ 1726
- [9] P. Hariharan, M. Roy, P. A. Robinson *et al.*, The Geometric phase observations at the single-photon level. *J. Mod. Opt.*, 1993, **40**(5) : 871~ 877
- [10] P. G. Kwiat, R. Y. Chiao, Observation of a nonclassical Berry's phase for the photon. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, **66**(5) : 588~ 591
- [11] 李 劬, 叶 军, 彭哨青等, 光纤几何路径引起的圆双折射. *光学学报*, 1990, **10**(5) : 476~ 480
- [12] J. N. Ross, The rotation of the polarization in low birefringence monomode optical fibers due to geometric effects. *Opt. & Quantm. Electron.*, 1984, **16**(3) : 455~ 461

[附录 A]

某一时刻在一段长度为 L 的光路中的平均光子数可表示为 $\langle \hat{n}_L \rangle = LNn/C$, 其中 N 是入射到该光路的光子流。而 n 为介质的折射率。由于激光束中的光子数服从泊松分布, 所以给定时刻在上述给定的光路中不存在光子的几率、存在一个光子的几率和存在一个以上光子的几率分别为

$$P(0) = \exp(-\langle \hat{n}_L \rangle), \quad P(1) = \langle \hat{n}_L \rangle \exp(-\langle \hat{n}_L \rangle), \quad P(n > 1) = 1 - [P(0) + P(1)]$$

在本文的实验中, 光纤长度 $L = 0.65$ m, 设光纤中的光功率为 $I \times 10^{-13}$ W, 则:

$$N \approx 3.2 \times 10^5, \quad \langle n \rangle \approx 0.001, \quad P(0) \approx 0.9989683, \quad P(1) \approx 0.0010312,$$

$$P(n > 1) \approx 0.0000005, \quad P(n > 1)/P(1) \approx 0.00052$$

本文所用的 He-Ne 激光的相干长度 L_c 约为 100 cm, 所以在相干长度以内

$$P(n > 1)/P(1) = 0.00072。$$

可见在本文实验中单光子水平是得到保证的。

[附录 B]

在图 2 所对应的实验中, 光纤中的光功率为 1.2×10^{-13} W, 由此估算出光子流 $N \approx 3.8 \times 10^5$, 光纤出射端与光电倍增管间的透镜和检偏器的总透射率约为 80%, 光电倍增管的量子效率估计为 $\eta = 0.06$, 由此算出计数率应为 $N_d \approx 1.8 \times 10^4/\text{sec}$ 。与图 2 中的实验数据比较, 考虑到较强的本底计数, 表明本文的实验是满足单光子计数条件的。

Experimental Observation of Geometrical Phase at Single-Photon Level

Li Qu Huang Jiandong Zhu Yajun Zhang Zebin Chen Yingli

(Department of Applied Physics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

(Received 20 October 1995; revised 3 October 1996)

Abstract When light propagates in a single-mode fiber, it may acquire additional phase corresponding to the geometrical configuration of the fiber. In this paper we report the observation of such geometrical phase at single-photon level to manifest the quantum origination of the geometrical phase.

Key words geometrical phase, Berry phase, single-photon experiment.