

# 利用 V 型三能级原子与光场 Raman 相互作用传送光场的福克叠加态\*

许雪梅 罗文东

(中南工业大学应用物理与热能工程系, 长沙 410083)  
(1999 年 3 月 8 日收到; 1999 年 4 月 16 日收到修改稿)

提出了利用 V 型三能级原子与光场 Raman 相互作用传送光场的福克叠加态的方法.

PACC: 0365

## 1 引 言

近来, 利用纠缠态进行量子远距传物引起了人们极大的兴趣. 通过对处于纠缠态体系的一个粒子测量, 便可获得另一粒子所携带信息. Davidovich 等<sup>[1]</sup>提出了一种在两个初态为纠缠态的高  $Q$  光场中传送未知原子态传送方案; Cirac 等<sup>[2]</sup>建立了另外一种 quantum electrodynamics(QED) 腔场, 并利用处于纠缠态两能级原子实现原子态的传输; Almeida 等<sup>[3]</sup>借助于一个光场和 Greenberger-Horne-Zeilinger(GHZ) 态实现原子态的传输. 这些方案也可用来实现光场叠加态传送, 比如 Zheng 和 Guo<sup>[4]</sup>提出了利用原子与场的色散作用传送光场相干态的未知叠加态; Moussa<sup>[5]</sup>利用两对处于非最大纠缠态原子实现了光场中三种福克态  $|0\rangle$ ,  $|1\rangle$  和  $|2\rangle$  所组成的任意叠加态的量子远距传物. 最近, Boschi 等<sup>[6]</sup>已经用实验证明了量子远距传物的可行性. 本文利用 V 型三能级原子与光场的 Raman 相互作用来实现光场中  $|0\rangle$  和  $|1\rangle$  所组成的任意叠加态的量子远距传物. 与文献 [5] 不同的是, 我们只需借助于一个光场与一个 V 型三能级原子的 Raman 相互作用及一个两能级原子便可实现另一光场叠加态的量子远距传物.

## 2 简并 V 型三能级原子与光场 Raman 相互作用

简并 V 型三能级原子与单模场相互作用如图 1 所示, 系统有效哈密顿量为<sup>[7]</sup>

$$H = \lambda_1(a^+|g\rangle\langle e_1| + a|e_1\rangle\langle g|) + \lambda_2(a^+|g\rangle\langle e_2| + a|e_2\rangle\langle g|), \quad (1)$$

其中  $\lambda_1, \lambda_2$  是原子与场模的耦合常量,  $a$  与  $a^+$  分别代表光子的湮没与产生算符,  $|g\rangle$ ,  $|e_1\rangle, |e_2\rangle$  分别代表原子的三个能级, 其中  $|e_1\rangle, |e_2\rangle$  两个较高能级的能量相等. 适当调整

\* 国家自然科学基金(批准号: 19674013)和中南工业大学文理基金(批准号: 69807)资助的课题.

原子跃迁频率  $\omega_0$  与光场频率  $\omega_f$ , 使得原子与场失谐量  $\Delta = |\omega_f - \omega_0|$  很大, 以致于基态能级  $|g\rangle$  可绝热消除. 在此情况下, 系统有效哈密顿量可为

$$H' = -ga^\dagger a(|e_1\rangle\langle e_2| + |e_2\rangle\langle e_1|) - a^\dagger a(\beta_1|e_1\rangle\langle e_1| + \beta_2|e_2\rangle\langle e_2|), \quad (2)$$

其中  $g = \lambda_1\lambda_2/\Delta$ ,  $\beta_1 = \lambda_1^2/\Delta$ ,  $\beta_2 = \lambda_2^2/\Delta$ , 为简单起见, 我们假定  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$ , 设原子初始时处于任意叠加态  $u|e_1\rangle + v|e_2\rangle$ , 光场处于福克态  $|n\rangle$ , 经演算可得出系统随时间演化的波函数为

$$|\Phi(t)\rangle = e^{in(\lambda^2/\Delta)t} \{ [u \sin(n\lambda^2 t/\Delta) + iv \cos(n\lambda^2 t/\Delta)] |e_1, n\rangle + [iu \cos(n\lambda^2 t/\Delta) + v \sin(n\lambda^2 t/\Delta)] |e_2, n\rangle \}. \quad (3)$$

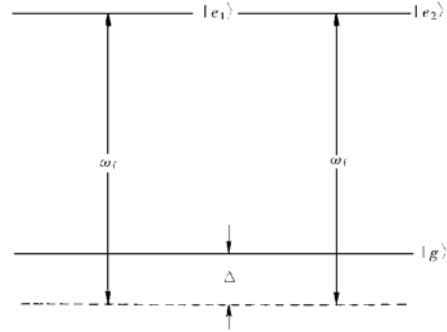


图1 简并 V 型三能级原子与单模场相互作用

### 3 光场福克叠加态的量子远距传物

设第一个光场  $C_1$  (发送者) 处于  $|0\rangle$  和  $|1\rangle$  未知叠加态

$$|\Phi_1\rangle = c|0\rangle_1 + d|1\rangle_1. \quad (4)$$

将一个共振的两能级原子通过第二个光场  $C_2$  (接收者), 适当选择光场与原子的频率及相互作用时间, 便可将  $C_2$  制备在下述叠加态<sup>[8]</sup>:

$$|\Phi_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_2 + |1\rangle_2). \quad (5)$$

接着将一个处于简并态 V 型三能级原子  $a$  通过  $C_2$ , 适当调整光场  $C_2$  的频率与原子  $a$  的跃迁频率, 使光场与原子之间发生 Raman 相互作用, 适当选择原子在光场  $C_2$  中速度, 使原子通过光场  $C_2$  的时间满足  $(\lambda^2/\Delta)t = \pi/2$ , 则原子  $a + C_2$  构成下列纠缠态:

$$|\Phi_{a+2}\rangle = \frac{i}{\sqrt{2}}(|0\rangle_2|e_2\rangle + |1\rangle_2|e_1\rangle). \quad (6)$$

整个系统  $C_1 + C_2 + a$  的波函数可展开为

$$|\Phi_{1+2+a}\rangle = \frac{1}{2} [ |\Phi^+\rangle (c|0\rangle_2 + d|1\rangle_2) + |\Phi^-\rangle (c|0\rangle_2 - d|1\rangle_2) + |\Phi^{\dagger}\rangle (c|1\rangle_2 + d|0\rangle_2) + |\Phi^{\ddagger}\rangle (c|1\rangle_2 - d|0\rangle_2) ], \quad (7)$$

其中  $|\Phi^\pm\rangle$  与  $|\Phi^\dagger\rangle$  为原子  $a + C_1$  的 Bell 基矢

$$|\Phi^\pm\rangle = \frac{i}{\sqrt{2}}(|0\rangle_1|e_2\rangle \pm |1\rangle_1|e_1\rangle), \quad (8)$$

$$|\Phi^\dagger\rangle = \frac{i}{\sqrt{2}}(|0\rangle_1|e_1\rangle \pm |1\rangle_1|e_2\rangle). \quad (9)$$

再将原子  $a$  通过光场  $C_1$ , 并适当调整光场频率与原子跃迁频率, 使原子  $a$  与  $C_1$  发生

Raman 相互作用, 再适当选择原子  $a$  在光场  $C_1$  中的速度使原子在光场  $C_1$  中的时间满足  $(\lambda^2/\Delta)t' = \pi/2$ , 则上述 Bell 基矢演化为

$$|\phi^\pm\rangle \longrightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|e_1\rangle(|0\rangle_1 \pm |1\rangle_1), \quad (10)$$

$$|\varphi^\pm\rangle \longrightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|e_2\rangle(|1\rangle_1 \pm |0\rangle_1). \quad (11)$$

从以上两式可看出, 由于 Raman 相互作用, Bell 基矢由原来纠缠态转化为非纠缠态. 我们再将另一处于共振的两能级原子  $a'$  (设其初态为  $|g\rangle_{a'}$ ) 通过光场  $C_1$ , 适当地选择原子与光场相互作用时间, 使得当光场中含有一个光子时能够吸收此光子并使其通过  $\pi$  的脉冲流. 最后, 让原子  $a'$  通过  $\pi/2$  脉冲流的 Ramsey 区域  $R_1$ , 则原子  $a' + C_1$  演化为

$$\frac{1}{\sqrt{2}}|g\rangle_{a'}(|0\rangle_1 \pm |1\rangle_1) \longrightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|g\rangle_{a'} \pm i|e\rangle_{a'})|0\rangle_1 \longrightarrow \begin{cases} |g\rangle_{a'}|0\rangle_1, \\ -i|e\rangle_{a'}|0\rangle_1; \end{cases} \quad (12)$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}}|g\rangle_{a'}(|1\rangle_1 \pm |0\rangle_1) \longrightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(i|e\rangle_{a'} \pm |g\rangle_{a'})|0\rangle_1 \longrightarrow \begin{cases} i|e\rangle_{a'}|0\rangle_1, \\ -|g\rangle_{a'}|0\rangle_1. \end{cases} \quad (13)$$

可见, Bell 基矢演化可用下式表达:

$$|\phi^\pm\rangle|g\rangle_{a'} \longrightarrow \begin{cases} |e_1\rangle|g\rangle_{a'}|0\rangle_1, \\ -i|e_1\rangle|e\rangle_{a'}|0\rangle_1; \end{cases} \quad (14)$$

$$|\varphi^\pm\rangle|g\rangle_{a'} \longrightarrow \begin{cases} i|e_2\rangle|e\rangle_{a'}|0\rangle_1, \\ -|e_2\rangle|g\rangle_{a'}|0\rangle_1. \end{cases} \quad (15)$$

对原子  $a$  与  $a'$  实行关联测量, 将此测量结果传送给光场  $C_2$  (接受者), 光场  $C_2$  对上述结果进行适当的么正变换后, 便可重新构造出光场  $C_1$  初始态, 这样发送者就成功地将未知信息传送给接受者.

## 4 讨 论

本文利用 V 型三能级原子与光场 Raman 相互作用实现了量子远距传物. 从以上方案中可看出, 我们只需借助于光场与原子的 Raman 相互作用便可将 Bell 基矢转化为非纠缠态, 为了能使此方案容易实现, 必须选择  $Q$  因子很高的光腔, 另外还要求原子跃迁频率与光场频率相差很大, 以满足光场与原子发生 Raman 相互作用有足够的时间, 由于 Ramsey 干涉实验技术<sup>[9]</sup>的实现表明了该方案将不久能实现.

[1] L. Davidovich, N. Zagury, M. Brune, J. M. Raimond, S. Haroche, *Phys. Rev.*, **A50**(1994), R895.

[2] J. I. Cirac, A. S. Parkins, *Phys. Rev.*, **A50**(1994), R4441.

[3] N. G. Almeida, L. P. Maia, C. J. Villas-Boas, M. H. Y. Moussa, *Phys. Lett.*, **A241**(1998), 213.

[4] S. B. Zheng, G. C. Guo, *Phys. Lett.*, **A236**(1997), 180.

[5] M. H. Y. Moussa, *Phys. Rev.*, **A54**(1996), 4661.

[6] D. Boschi, S. Branca, F. De Martini, L. Hardy and S. Popescu, *Phys. Rev. Lett.*, **80**(1998), 1121.

- [7] 郭光灿, 量子光学, (高等教育出版社, 北京, 1990), 第 276 页 [G. C. Guo, Quantum Optics (Higher Education Press, Beijing, 1990), p. 276 (in Chinese)].
- [8] S. L. Branstein, A. Mann and M. Revzen, *Phys. Rev. Lett.*, **68**(1992), 3259.
- [9] C. C. Gerry, *Phys. Rev.*, **A54**(1996), R2529.

## TELEPORTING A FOCK SUPERPOSITION STATE OF THE CAVITY FIELD VIA A V-TYPE THREE-LEVEL ATOM AND TWO CAVITY-FIELDS INTERACTION\*

XU XUE-MEI LUO WEN-DONG

(Department of Applied Physics and Heat-Engineering,  
Central South University of Technology, Changsha 410083)  
(Received 8 March 1999; revised manuscript received 16 April 1999)

### ABSTRACT

A scheme is presented for the teleportation of a Fock superposition state via a degenerate V-type three-level atom and two cavity fields Raman interaction.

**PACC:** 0365

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 19674013) and Liberal Arts Science Foundation of Central South University of Technology, China (Grant No. 69807).