

文章编号 : 0253-2239(2001)12-1451-03

V 型原子与光场拉曼相互作用传送未知原子态*

林 秀** 李洪才**

(中国科技大学量子通信与量子计算开放研究实验室, 合肥 230026)
(福建师范大学物理系, 福州 350007)

摘要 : 未知量子态从一个地方到另一个地方的隐形传送在量子信息领域中有非常重要的作用。提出了一种利用简并 V 型三能级原子与振幅很大的单模相干态腔场的拉曼相互作用来传送未知原子态的方案。

关键词 : 隐形传送 ; 拉曼相互作用 ; 振幅大的相干态腔场

中图分类号 : O431.2 文献标识码 : A

1 引 言

近来,利用纠缠态进行量子态的隐形传送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的信息。Davidovich 等人^[1]提出了一种在两个初态为纠缠态的高 Q 光场中传送一个两能级原子的未知原子态的方案;Cirac 等人^[2]建立了另外一种量子电动力学腔场,并利用处于纠缠态两能级原子实现原子态的传输;Almeida 等人^[3]借助于一个光场和 Greenberger-Horne-Zeilinger (GHZ) 态实现原子态的传输;Zheng 等人^[4,5]提出利用拉曼型的 Jaynes-Cummings 模型传送 Λ 型三能级原子的未知原子态和利用共振的 Jaynes-Cummings 模型传送未知原子态。近来,人们也提出方案来实现光场叠加态传送,比如 Zheng 和 Guo^[6]提出了利用非共振的 Jaynes-Cummings 模型来传送光场相干态的未知叠加态;许雪梅等人^[7]提出利用 V 型三能级原子与光场拉曼相互作用传送光场的福克叠加态。在这里提出只需借助于一个振幅很大的单模相干态腔场与一个简并 V 型三能级原子的拉曼相互作用便可实现简并 V 型三能级原子的未知原子态的隐形传送。

2 简并 V 型三能级原子-腔场拉曼相互作用的描述

简并 V 型三能级原子与单模腔场之间的相互作用如图 1 所示。

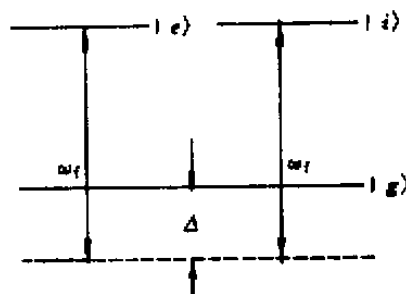


Fig. 1 Schematic diagram of the degenerate V-type three-level atom interaction with the single-mode field
系统有效哈密顿量为^[8]

$$H = \lambda_1 (a^+ |g \ e\rangle + a |e \ g\rangle) + \lambda_2 (a^+ |g \ i\rangle + a |i \ g\rangle), \quad (1)$$

其中 λ_1, λ_2 为原子与场模的耦合常量, a 和 a^+ 分别代表光子的湮没与产生算符, $|g\rangle, |e\rangle, |i\rangle$ 分别代表原子的三个能级, 其中 $|e\rangle, |i\rangle$ 两个较高能级的能量相等。适当选择原子跃迁频率 ω_0 与光场频率 ω_f , 使得原子与场失谐量 $\Delta = |\omega_f - \omega_0|$ 很大, 以至于基态能级 $|g\rangle$ 可绝热消除。在此情况下, 系统有效哈密顿量可表为

$$H_{\text{eff}} = -g a^+ a (|e \ i\rangle + |i \ e\rangle) - a^+ a (\beta_1 |e \ e\rangle + \beta_2 |i \ i\rangle), \quad (2)$$

其中

$$g = \lambda_1 \lambda_2 / \Delta, \quad \beta_1 = \lambda_1^2 / \Delta, \quad \beta_2 = \lambda_2^2 / \Delta.$$

为便于讨论, 假定 $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$ 则 $\beta_1 = \beta_2 = g_0$ 。设原子初始时处于任意叠加态 $\mu |e\rangle + \nu |i\rangle$ (μ 和 ν 为任意叠加系数), 光场处于福克态 $|n\rangle$ 。在相互作用绘景中, 场-原子系统的联合态矢满足如下薛定谔方程:

$$i \frac{d|\psi(t)\rangle}{dt} = H_{\text{eff}} |\psi(t)\rangle. \quad (3)$$

计算可得场-原子系统随时间演化的联合态矢为

* 福建省教委自然科学基金 (JA99150) 资助课题。

** 通讯地址: 福建师范大学物理系物理组, 350007。

收稿日期: 2000-09-06; 收到修改稿日期: 2000-11-29

$$|\psi(t)\rangle = \exp\{i\mu\sin(ngt) + i\nu\cos(ngt)\}|e, n\rangle + [i\mu\cos(ngt) + \nu\sin(ngt)]|i, n\rangle. \quad (4)$$

若在 $t = 0$ 的初始时刻腔场被制备成相干态 $|\alpha\rangle$, 而原子通过一个经典场 M 的作用后被制备在激发态 $|e\rangle$, 则在 $t = 0$ 的初始时刻整个系统的初态为

$$|\psi(0)\rangle = |\alpha\rangle|e\rangle, \quad (5)$$

于是, 由(3)式、(4)式和(5)式可得

$$|\psi(t = \tau)\rangle = \exp(-iH_{\text{eff}}t)|\psi(0)\rangle = \frac{i}{2}\{|\alpha - |-\alpha\rangle\}|e + [|\alpha + |-\alpha\rangle\exp(2ig\tau)]|i\}\}, \quad (6)$$

Table 1. interaction outcome of a degenerate V-type three-level atom interacting with a single mode cavity-field through Raman process, which is initially prepared in the different states. [supposed that the interaction time τ will fulfill Eq.(7)]

initial state	atom	$ e\rangle$	$ e\rangle$	$ i\rangle$	$ i\rangle$
	cavity field	$ \alpha + -\alpha\rangle$	$ \alpha - -\alpha\rangle$	$ \alpha + -\alpha\rangle$	$ \alpha - -\alpha\rangle$
interaction outcome		$\{ \alpha + -\alpha\rangle\} i\rangle$	$\{ \alpha - -\alpha\rangle\} e\rangle$	$\{ \alpha + -\alpha\rangle\} e\rangle$	$\{ \alpha - -\alpha\rangle\} i\rangle$

3 未知原子态的隐形传送

设一个简并的 V 型的三能级原子 A (发送者), 初始时处于两个高能态 $|e_a\rangle$ 和 $|i_a\rangle$ 的叠加态

$$|\psi_a\rangle = c_e|e_a\rangle + c_i|i_a\rangle, \quad (9)$$

其中 c_e 与 c_i 为未知的叠加系数。开始时将一个腔场 C 制备成幅度很大的相干态 $|\alpha\rangle$ 。现在让另一个初始处于 $|e_b\rangle$ 态的简并的 V 型三能级原子 B (接收者) 穿过这个腔场, 适当调整腔场 C 的频率和选择原子 b 的跃迁频率, 使腔场与原子之间发生拉曼相互作用。适当选择原子在腔场中的速度, 使原子通过腔场的时间 τ_b 满足 $g\tau_b = \pi/2$, 可得到

$$|\psi_{b+c}\rangle = \frac{i}{2}\{(|\alpha - |-\alpha\rangle)|e_{b+} + (|\alpha + |-\alpha\rangle)|i_b\} + \frac{i}{\sqrt{2}}(|\alpha - |e_{b+} + |\alpha + |i_b\rangle), \quad (10)$$

其中

$$|\alpha_+\rangle = (|\alpha + |-\alpha\rangle)\sqrt{2}, \\ |\alpha_-\rangle = (|\alpha - |-\alpha\rangle)\sqrt{2},$$

其中 τ 为原子与腔场的相互作用时间。可以通过调节原子的速度, 使 τ 满足下式:

$$g\tau = \frac{\pi}{2}, \quad (7)$$

这样(6)式可表为

$$|\psi(\tau)\rangle = \frac{i}{2}\{(|\alpha - |-\alpha\rangle)|e + (|\alpha + |-\alpha\rangle)|i\}. \quad (8)$$

为了后面讨论问题的方便, 表 1 给出在不同的初态下, 简并 V 型三能级原子与单模腔场发生拉曼相互作用的结果。

当幅度很大, 即 $|\alpha|^2 \gg 1$ 的情况下, 相干态 $|\alpha\rangle$ 和 $|-\alpha\rangle$ 是近似正交的, 即 $\langle\alpha|-\alpha\rangle \approx 0$, 所以 $|\alpha_+\rangle$ 和 $|\alpha_-\rangle$ 也是近似正交的, 即 $\langle\alpha_+|\alpha_-\rangle \approx 0$, 则 $|\psi_{b+c}\rangle$ 是最大纠缠态。这时, 态 $|\psi_a\rangle$ 与 $|\psi_{b+c}\rangle$ 的直积可展开为

$$|\psi_{a+b+c}\rangle = \frac{1}{2}\{|\varphi^+\rangle(c_e|e_b\rangle + c_i|i_b\rangle) + |\varphi^-\rangle(c_e|e_b\rangle - c_i|i_b\rangle) + |\phi^+\rangle(c_e|i_b\rangle + c_i|e_b\rangle) + |\phi^-\rangle(c_e|i_b\rangle - c_i|e_b\rangle)\}, \quad (11)$$

其中 $|\varphi^\pm\rangle$ 与 $|\phi^\pm\rangle$ 为原子与腔模所构成系统的贝耳 (Bell) 基:

$$|\varphi^\pm\rangle = \frac{i}{\sqrt{2}}(|\alpha_-\rangle|e_{a\pm}\rangle + |\alpha_+\rangle|i_a\rangle), \quad (12)$$

$$|\phi^\pm\rangle = \frac{i}{\sqrt{2}}(|\alpha_+\rangle|e_{a\pm}\rangle + |\alpha_-\rangle|i_a\rangle), \quad (13)$$

现在将原子 a 通过腔场 C, 并适当调整腔场频率和选择原子跃迁频率, 使原子 a 与 C 发生拉曼相互作用, 再适当选择原子 a 在腔场 C 中的速度使原子在腔场 C 中的时间 τ_a 满足 $g\tau_a = \pi/2$, 则上述贝耳基演化为

$$|\varphi^\pm\rangle \rightarrow -\frac{1}{\sqrt{2}}(|\alpha_-\rangle|e_{a\pm}\rangle + |\alpha_+\rangle|e_a\rangle) = \begin{cases} -|\alpha_-\rangle|e_a\rangle \\ -|\alpha_+\rangle|e_a\rangle \end{cases}, \quad (14)$$

$$|\phi^\pm\rangle \rightarrow -\frac{1}{\sqrt{2}}(|\alpha_+\rangle|i_{a\pm}\rangle + |\alpha_-\rangle|i_a\rangle) = \begin{cases} -|\alpha_+\rangle|i_a\rangle \\ -|\alpha_-\rangle|i_a\rangle \end{cases}, \quad (15)$$

因为当幅度很大时, $\alpha | - \alpha \approx 0$, 所以可以采用通常的关于正交态的测量方法^[9,10]对腔场进行探测。这样通过对原子 a 和腔场 C 的探测可实现对原子 a 与腔模所构成系统的贝耳基的探测。测得结果为原子 b 将坍缩到相应的纯态。这个态与原子 a 的初态相差一个么正变换。将对原子 a 与腔场 C 的联合探测结果通过一经典信道告诉原子 b 的观察者。他就能对原子 b 作一个相应的么正变换, 使原子 b 处于原子 a 的初态, 这样发送者就成功地将未知信息传送给了接收者。

讨论 本文利用简并 V 型三能级原子与单模相干态腔场的拉曼相互作用实现未知原子态的隐形传送。与文献 4 相比, 文献 4 的方案首先需把腔场制备成真空态 $|0\rangle$ 和 1 光子态 $|1\rangle$ 的相干叠加态, 为了实现对贝耳基的探测又不得不注入与腔场发生单光子共振相互作用的一个二能级原子, 而本文的方案首先只需要将腔场制备成相干态, 而任何一个量子谐振子在经典源的驱动下都将产生相干态光场^[11], 这在实验上要比制备真空态 $|0\rangle$ 和 1 光子态 $|1\rangle$ 的相干叠加态容易得多, 且为了实现贝耳基的探测无须借助另一个原子。与文献 1, 2 的方案比较, 首先本文的方案只需用一个腔, 而文献 1, 2 的方案都需用两个腔; 其次, 我们方案中的步骤比文献 [1, 2] 的步骤少。但为使本文提出的方案容易实现, 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拉曼相互作用所需的足够的时间。另外, 由于冉赛 (Ramsey) 干涉实验技术^[12]的实现, 其结果表明了该方案在不久的将来有可能加以实现。

参 考 文 献

- [1] Davidovich L, Zagury N, Brune M *et al.*. Teleportation of an atomic state between two cavities using nonlocal microwave fields. *Phys. Rev. (A)*, 1994, **50**(2): 895 ~ 898
- [2] Cirac J I, Parkins A S. Schemes for atomic-state teleportation. *Phys. Rev. (A)*, 1994, **50**(6): 4441 ~ 4444
- [3] Almeida N G, Maia L P, Uillas-Boás C J. One-cavity scheme for atomic-state teleportation through GHZ states. *Phys. Lett. (A)*, 1998, **241**(4): 213 ~ 217
- [4] Zheng S B, Guo G C. Teleportation of an unknown atomic state through the Raman atom-cavity-field interaction. *Phys. Lett. (A)*, 1997, **232**(4): 171 ~ 174
- [5] Zheng S B. Teleportation of atomic states via resonant atom-field interaction. *J. Mod. Opt.*, 1999, **167**(5): 111 ~ 113
- [6] Zheng S B, Guo G C. Teleportation of superpositions of macroscopic states of a cavity field. *Phys. Lett. (A)*, 1997, **236**(8): 180 ~ 182
- [7] 许雪梅, 罗文东. 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. *物理学报*, 1999, **48**(12): 2154 ~ 2157
- [8] 郭光灿. *量子光学*. 北京: 高等教育出版社, 1990. 276 ~ 285
- [9] Gerry C C. Preparation of a four-atom Greenberger-Horne-Zeilinger state. *Phys. Rev. (A)*, 1996, **53**(6): 4591 ~ 4593
- [10] Brune M, Haroche S, Raimond J M *et al.*. Manipulation of photons in a cavity by dispersive atom-field coupling: quantum-nondemolition measurements and generation of "Schrödinger cat" states. *Phys. Rev. (A)*, 1992, **45**(2): 5193 ~ 5213
- [11] Sargent III M, Scully M O, Lamb W E. Jr. *Laser Physics*. Morocco: Addison-Wesley, 1974. 249 ~ 270
- [12] Gerry C C. Proposal for a mesoscopic cavity QED realization of the Greenberger-Horne-Zeilinger state. *Phys. Rev. (A)*, 1996, **54**(4): 2529 ~ 2532

Teleporting an Unknown Atomic State via a V-Type Atom Interacting with a Cavity-Field Through Raman Process

Lin Xiu Li Hongcai

(Laboratory of Quantum Communication and Quantum Computation, University of Science and Technology of China, Hefei 230026
Department of Physics, Fujian Teachers University, Fuzhou 350007)

(Received 6 September 2000; revised 29 November 2000)

Abstract: The teleportation of an unknown quantum state from one observer to another is of great importance in quantum information. A scheme is presented for the teleportation of an unknown atomic state through the Raman interaction of V-type three-level atom with a coherent state cavity-field of large amplitude.

Key words: teleportation; the Raman interaction; a coherent state cavity-field of large amplitude