DOI: 10.13718/j. cnki. xdzk. 2014. 09. 017

双模耗散腔中原子-光子纠缠的制备[。]

常俊丽

西南大学 物理科学与技术学院,重庆 400715

摘要:考虑处于双模耗散腔中的一个 Λ 型三能级原子,由于耗散腔场受外界噪声场驱动,使得系统产生原子-光子 纠缠态.进一步分析噪声对该纠缠的影响以及纠缠的演化,并进行数值模拟.研究结果显示,当双模腔场均受外界 噪声场驱动时,系统将产生稳态纠缠.噪声可以在纠缠制备过程中发挥积极作用.

关 键 词:耗散腔;原子-光子纠缠;噪声强度; Λ 型三能级原子

中图分类号: 0431.2 文献标志码: A 文章编号: 1673-9868(2014)9-0104-04

上世纪末,量子信息学作为一门新兴的交叉学科得到空前的发展,然而量子信息学的发展离不开量子 纠缠.换句话说,量子纠缠是量子世界的一个重要因素,对量子通信和量子计算的发展起到至关重要的作 用^[1-2].介于量子纠缠的重要性,越来越多的科研人员投入到相关的科研领域,如制备、控制和利用纠缠 等.通常量子纠缠在制备后,需要进行人为的控制,以便更好地利用.然而在现实应用中却发现制备好的 纠缠由于环境噪声的影响,非常容易弱化,甚至是消失(即退相干效应).

目前量子纠缠的研究主要分为两个方面,一个方面是如何制备易于控制的量子纠缠——原子-光子纠 缠.这种纠缠主要优势是处于光纤中的极化态光子易于控制,且在极化光腔中光子的相干性也可以保持几 公里甚至更远的距离,同时原子本身可以长期贮存,且容易操控.此外光子作为数据车,理论上可以实现 光速传递.另一个方面是如何使得所制备的量子纠缠不受环境噪声的影响.关于噪声的研究工作主要分为 如何弱化、阻止和利用噪声 3 个方向.如量子纠错^[3-5],利用冗长的量子编码使得量子纠缠态不受噪声的 影响,虽然这种方法在错误率相对小的情况下是可行的,但在量子门操控中浪费了大量的量子比特.还有 一种方法是利用所谓的"非退相干子空间"^[6-7],不足之处是这种方法只适用于一些特定的情形.当前较热 门的研究是如何利用噪声^[8-13],这项研究的亮点在于强调噪声在量子纠缠制备过程中可以发挥积极作用.

本文主要考虑处于耗散腔中的 Λ型三能级原子,如何借助环境噪声,制备原子-光子纠缠态,先分析环 境噪声与耗散腔场的作用情况,然后进行数值模拟,最后对研究结果加以讨论.

1 研究模型

考虑处于耗散腔中的一个 Λ 型三能级原子(图1), $|g_1\rangle$, $|g_2\rangle$ 均为基态, $|e\rangle$ 为激发态, 所处双模腔场的耗散率为 κ , 系统演化遵循主方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{i}{\hbar} [H_0, \rho] + L(\rho) \tag{1}$$

① 收稿日期: 2013-11-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(21173170);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(XDJK2011C042).

作者简介:常俊丽(1980-),女,山西太谷人,讲师,主要从事量子光学方面的研究.

为研究问题的方便,这里采用相互作用绘景,旋 波近似下系统的哈密顿量可表示为

 $H = h_g(a_L \sigma_{e,g_1} + a_R \sigma_{e,g_2} + H.c.)$ (2) 其中:g为腔场为原子耦合强度; a_L, a_R 为左右腔场湮 灭算符; $\sigma_{i,j} = |i\rangle\langle j |$ 为原子跃迁算符.主方程中 $L(\rho)$ 为刘维尔量,主要描述腔场耗散和外界环境噪 声以及原子衰变对系统演化的影响.

$$L(\rho) = L_f + L_{a1} + L_{a2} \tag{3}$$

其中 L_f 描述腔场耗散对系统纠缠的影响,

$$L_{f} = \kappa (2a_{L}\rho a_{L}^{\dagger} - a_{L}^{\dagger}a_{L}\rho - \rho a_{L}^{\dagger}a_{L}) + \kappa (2a_{R}\rho a_{R}^{\dagger} - a_{R}^{\dagger}a_{R}\rho - \rho a_{R}^{\dagger}a_{R})$$

$$\tag{4}$$

而 La1, La2 则描述腔场受外界环境噪声的影响.

2 外界环境噪声对纠缠的影响

本研究方案中, 腔场是作为数据车, 这里考虑腔场是稳定态, 而不是真空态, 具有如下的形式:

$$\rho_c = \sum_n \mid n \rangle \langle n \mid \left(\frac{n}{1+n}\right)^n \frac{1}{1+n} \tag{5}$$

其中 n 为腔场的平均光子数^[9].下面就腔场受外界环境噪声的影响分 3 种情况考虑.

2.1 双模腔场均受外界环境噪声的影响

当双模腔场均受外界环境噪声影响时,相应的刘维尔量为:

$$L_{a1} = \gamma(n+1)(2\sigma_{g_1,e}\rho\sigma_{e,g_1} - \rho\sigma_{e,e} - \sigma_{e,e}\rho) + \gamma n(2\sigma_{e,g_1}\rho\sigma_{g_1,e} - \sigma_{g_1,g_1}\rho - \rho\sigma_{g_1,g_1})$$
(6)

$$L_{a2} = \gamma(n+1)(2\sigma_{g_2,e}\rho\sigma_{e,g_2} - \rho\sigma_{e,e} - \sigma_{e,e}\rho) + \gamma n(2\sigma_{e,g_2}\rho\sigma_{g_2,e} - \sigma_{g_2,g_2}\rho - \rho\sigma_{g_2,g_2})$$
(7)

其中: γ 表示原子的自发衰变率, *n* 表示噪声强度.考虑初态 $|g_1\rangle \otimes |0,0\rangle$,即原子处于基态,腔场处于真 空态,随着时间的演化,系统最终处于纠缠态,

$$\frac{1}{\sqrt{2}} | g_1, 1, 0 \rangle + | g_2, 0, 1 \rangle$$
 (8)

这里采用 WOOTTERS^[14] 提出的 Concurrence 方法度量纠缠,

$$c(\rho) = \max\{0, 2 \max\{\lambda_i\} - \sum_{i=1}^{4} \lambda_i\}$$
(9)

其中: λ_i 是非厄米矩阵 $\rho \rho$ 本征值的平方根, $\rho = (\sigma_y \otimes \sigma_y)\rho * (\sigma_y \otimes \sigma_y), \rho * 为 \rho$ 的复共轭. 图 2 为系统纠 缠与噪声强度及时间的三维图,相应参数 $g=1, \kappa=2, \gamma=0.2$.模拟结果显示,随着噪声强度的增大,系统 纠缠会出现峰值,继而减小,而随时间的演化是平稳的. 图 3 为图 2 对应的二维图,就纠缠与噪声强度与时 间关系给出更直观的反应,显然,我们可以清晰地看到,当噪声强度固定时^[15],系统最终演化为一个稳定 的纠缠态.

2.2 只有单模腔场受外界环境噪声的影响

这里考虑只有单模腔场受外界环境噪声影响时,相应的刘维尔量为:

$$L_{a1} = \gamma(n+1) \left(2\sigma_{g_1,e}\rho\sigma_{e,g_1} - \rho\sigma_{e,e} - \sigma_{e,e}\rho \right) + \gamma n \left(2\sigma_{e,g_1}\rho\sigma_{g_1,e} - \sigma_{g_1,g_1}\rho - \rho\sigma_{g_1,g_1} \right)$$
(10)

$$L_{a2} = \gamma (2\sigma_{2,e}\rho\sigma_{e,2} - \rho\sigma_{e,e} - \sigma_{e,e}\rho)$$
(11)

考虑系统初态 $|g_1\rangle \otimes |0,0\rangle$,同样我们采用 WOOTTERS 提出的 Concurrence 方法^[14] 度量纠缠.图 4 为纠缠与噪声强度及时间的依赖关系相应参数 $g=1, \kappa=2, \gamma=0.2$,图 5 为对应的二维图.与双模腔场均 受外界环境噪声影响的结果对比,不难发现,纠缠与噪声强度的关系类似,均先随着噪声强度的增大而增 大,出现峰值后,逐渐减小.最大的不同在于纠缠的演化,前者为稳态纠缠,后者纠缠会逐渐弱化.





2.3 双模腔场均不受外界环境噪声的影响

当双模腔场均不受外界环境噪声影响时,相应的刘维尔量为:

$$L_{a1} = \gamma(2\sigma_{g_1,e}\rho\sigma_{e,g_1} - \rho\sigma_{e,e} - \sigma_{e,e}\rho)$$
(12)

$$L_{a2} = \gamma (2\sigma_{g_2,e}\rho\sigma_{e,g_2} - \rho\sigma_{e,e} - \sigma_{e,e}\rho)$$
(13)

考虑系统初态 $|g_1\rangle \otimes |0,0\rangle$,同样采用 WOOTTERS 提出的 Concurrence 方法^[14] 度量纠缠.显然系统始终处于初态,不会产生纠缠.从物理内涵分析,当双模腔场均不受外界噪声影响时,原子将自发衰变, 直至处于稳定的基态 $|g_1\rangle$ 或者 $|g_2\rangle$.

3 结 论

本文主要研究双模耗散腔场中原子-光子纠缠的制备.系统初态为原子处于基态,而腔场为真空态,由 于噪声场的作用,系统最终处于原子-光子纠缠态.值得一提的是,当双模腔场均受外界环境噪声作用时, 系统最终处于一个稳定纠缠态.据此可以得出结论,噪声可以在纠缠的制备过程中起积极的作用.

参考文献:

[1] NIELSEN M A, CHUANG I L. Quantum Computation and Quantum Information [M]. Cambridge: Cambridge University press, 2000.

- [2] BENNETT C H, BRASSARD G, CREPEAU C, et al. Teleporting an Unknown Quantum State Via Dual Classical and Einstein-Podolsk-Rosen Channels [J]. Phys Rev Lett, 1993, 70(13): 1895-1899.
- [3] SHOR P W. Scheme for Reduce Decoherence in Quantum Computer Memory [J]. Phys Rev A, 1995, 52(4): 2493-2496.
- [4] CALDERBANK A R, SHOR P W. Good Quantum Error-Correcting Codes Exist [J]. Phys Rev A, 1996, 54(2): 1098-1105.
- [5] PLENIO M B, VERDRAL V, KNIGHT P L. Quantum Error Correction in the Presence of Spontaneous Emission [J]. Phys Rev A, 1997, 55(1): 67-71.
- [6] LIDAR D A, CHUANG I L, WHALEY K B. Decoherence-Free Subspaces for Quantum Computation [J]. Phys Rev Lett, 1998, 81(12): 2594-2597.
- [7] BEIGE A, BRAUN D, TREGENNA B, et al. Quantum Computing Using Dissipation to Remain in a Decoherence-Free Subspace [J]. Phys Rev Lett, 2000, 85(8): 1762-1765.
- [8] PLENIO M B, HUELGA S F, BEIGE A, et al. Cavity-Loss-Induced Generation of Entangled Atoms [J]. Phys Rev A, 1999, 59(3): 2468-2475.
- [9] GARDINER C W, ZOLLER P. Quantum Noise [M]. New York: Springer, 2000.
- [10] YI X X, YU C S, ZHOU L, et al. Noise-Assisted Preparation of Entangled Atoms [J]. Phys Rev A, 2003, 68(5): 052304-052307.
- [11] PLENIO M B, HUELGA S F. Entangled Light from White Noise [J]. Phys Rev Lett, 2002, 88(19): 197901-197904.
- [12] CHANG J L, WANG L C, CHEN J, et al. Steady State Atom-Photon entanglement in Cavity QED systems [J]. Chin J Phys, 2005, 43(6): 1074-1081.
- [13] CHANG J L, HE Z H. Atom-Photon Entanglement Via Noise [J]. Chin J Phys, 2008, 46(4): 470-478.
- [14] WOOTTERS W K. Entanglement of Formation of an Arbitrary State of Two Qubits [J]. Phys Rev Lett, 1998, 80(10): 2245-2248.
- [15] MYATT C J, KING B E, TURCHETTE Q A. Decoherence of Quantum Superpositions Through Coupling to Engineered Reservoirs [J]. Nature, 2000, 403: 269-273.

Preparation of Atom-Photon Entanglement in a Bimodal Dissipative Cavity

CHANG Jun-li

School of Physical Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: A Λ -type three-level atom in a bimodal dissipative cavity may generate an atom-photon entangled state driven by an external noise cavity. Then we analyze the effect of noise intensity on the entanglement as well as the evolution of the entanglement. Furthermore, we numerically simulate the evolution of the atom-photon entanglement. The result shows there is a steady-state entanglement when the bimodal cavity is driven by an external noise. The research highlights that noise may play a positive role in entanglement creation.

Key words: dissipative cavity; atom-photon entanglement; noise intensity; Λ -type three-level atom

4

责任编辑 潘春燕