

УДК 130.145

ВЛИЯНИЕ ДИПОЛЬ-ДИПОЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА ПЕРЕПУТЫВАНИЕ В МНОГОФОТОННОЙ МОДЕЛИ ТАВИСА — КАММИНГСА¹

© 2011 Е.К. Башкиров, М.С. Мастюгин²

Исследовано влияние диполь-дипольного взаимодействия на перепутывание состояний двух атомов и однофотонного поля в многофотонной модели Тависа — Каммингса в случае когерентного состояния резонаторного поля. Найдено, что диполь-дипольное взаимодействие приводит к стабилизации атом-полевого перепутывания в случае однофотонной модели.

Ключевые слова: двухатомная модель, многофотонные переходы, диполь-дипольное взаимодействие, атом-полевого перепутывание.

Квантовые перепутанные состояния являются основным ресурсом физики квантовых вычислений. Для основных протоколов квантовых вычислений нужны максимально перепутанные чистые состояния с достаточно большим временем жизни. Одной из основных проблем, которая возникает при использовании квантовых перепутанных состояний, является их нестабильность, возникающая за счет взаимодействия с внешним окружением. В последнее время было высказано большое количество предложений по стабилизации максимально перепутанных состояний, например стратегия кольцевого контроля, коррекция квантовых ошибок, использование избыточного кодирования и др. Однако указанные способы успешно решают проблему только при малой скорости генерации ошибок в исследуемой системе. Более экономичный подход состоит в использовании так называемых свободных от декогеренции пространств, которые полностью нечувствительны к специфическим типам шумов. Такой подход, однако, также требует использования дополнительных источников и эффективен только для определенных типов окружения, например сжатого вакуума, которые в настоящее время невозможно реализовать экспериментально [1]. В последнее время предложен целый ряд механизмов для стабилизации атомных перепутанных состояний, взаимодействующих с квантовыми электромагнитными полями в оптических и магнитных ловушках, такие как диполь-дипольное взаимодействие, внешнее классическое поле

¹Работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009–2013 годы по лоту "Проведение научных исследований коллективами научно-образовательных центров в области оптики, лазерной физики и лазерных технологий", шифр "2010-1.1-122-084" (номер государственного контракта 14.740.11.0063).

²Башкиров Евгений Константинович (bash@ssu.samara.ru), Мастюгин Михаил Сергеевич (mast12basket@rambler.ru), кафедра общей и теоретической физики Самарского государственного университета, 443011, Российская Федерация, г. Самара, ул. Акад. Павлова, 1.

и др. (см. [3]). В настоящей статье нами исследовано влияние диполь-дипольного взаимодействия атомов на атом-полевые перепутанные состояния в двухатомных моделях Тависа — Каммингса с многофотонными переходами.

Рассмотрим два идентичных двухуровневых атома, резонансно взаимодействующих с одномодовым квантовым электромагнитным полем в идеальном резонаторе посредством невырожденных N -фотонных переходов, при наличии прямого диполь-дипольного взаимодействия между атомами. В представлении взаимодействия и приближении вращающейся волны гамильтониан такой модели можно представить в виде:

$$H_I = \hbar g \sum_{i=1}^2 (a^{+N} \sigma_i^- + \sigma_i^+ a^N) + \hbar \Omega (\sigma_1^+ \sigma_2^- + \sigma_2^+ \sigma_1^-). \quad (1)$$

где a^+ и a — операторы рождения и уничтожения фотонов резонаторной моды, σ_i^+ и σ_i^- — повышающий и понижающий оператор в i -м атоме ($i = 1, 2$), g — константа взаимодействия атомов с полем и Ω — константа прямого диполь-дипольного взаимодействия атомов.

Обозначим через $|+\rangle$ и $|-\rangle$ — возбужденное и основное состояние двухуровневого атома. Тогда двухатомная волновая функция может быть представлена в виде комбинации волновых векторов вида $|\alpha, \beta\rangle = |\alpha\rangle |\beta\rangle$, где $\alpha, \beta = +, -$. Пусть в начальный момент времени атомы находятся в суперпозиции

$$|\Psi(0)\rangle_A = \alpha|+, +\rangle + \beta|+, -\rangle + \gamma|-, +\rangle + \delta|-, -\rangle,$$

где коэффициенты удовлетворяют соотношению

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 + |\gamma|^2 + |\delta|^2 = 1,$$

а поле — в когерентном состоянии

$$|\Psi(0)\rangle_F = \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\bar{n}/2} \frac{\bar{n}^{n/2}}{\sqrt{n!}} |n\rangle,$$

где $|n\rangle$ — фоксовское состояние моды поля и \bar{n} — среднее число фотонов в моде.

Волновую функцию рассматриваемой модели в произвольный момент времени t мы можем представить в виде

$$|\Psi(t)\rangle = \sum_{n=0}^{\infty} X_{1n}(t) |+, +; n\rangle + X_{2n}(t) |+, -; n + N\rangle + X_{3n}(t) |-, +; n + N\rangle + X_{4n}(t) |-, -; n + 2N\rangle.$$

Аналитические выражения для временных коэффициентов $X_{in}(t)$ ($i = 1, 2, 3, 4$) могут быть получены на основе точных решений для оператора эволюции рассматриваемой модели, найденных ранее в работах [4; 5].

Мы рассматриваем систему, состоящую из двух атомов и моды квантового электромагнитного поля. Хорошо известно, что если обе подсистемы приготовлены в начальный момент времени в чистых состояниях, то в качестве критерия перепутанности атомов и поля может быть использована линейная атомная или полевая энтропия. Эти системы согласно теореме Араки–Либа в этом случае равны друг другу [2]. Нам удобнее вычислять линейную атомную энтропию системы. Линейную атомную энтропию можно ввести как $S(t) = Tr_A \rho_{at}^2(t)$, где $\rho_{at}(t) = Tr_F |\Psi(t)\rangle \langle \Psi(t)|$ — редуцированная атомная матрица плотности и $|\Psi(t)\rangle$ — временная волновая функция системы "атомы+поле". Значению линейной атомной энтропии $S = 1$ соответствует полностью расцепленное состояние атомов и

поля, а значению $S = 1/4$ — максимальная степень перепутывания атомов и поля. На рис. 1, 2 представлены результаты численного моделирования линейной атомной энтропии для рассматриваемой модели в случае одно- и двухфотонных разрешенных переходов для различных значений параметра диполь-фотонного взаимодействия атомов. Из графиков хорошо видно, что включение диполь-дипольного взаимодействия приводит к стабилизации атом-полевого перепутывания системы атомов, взаимодействующих с когерентным полем, только в случае модели с однофотонными переходами.

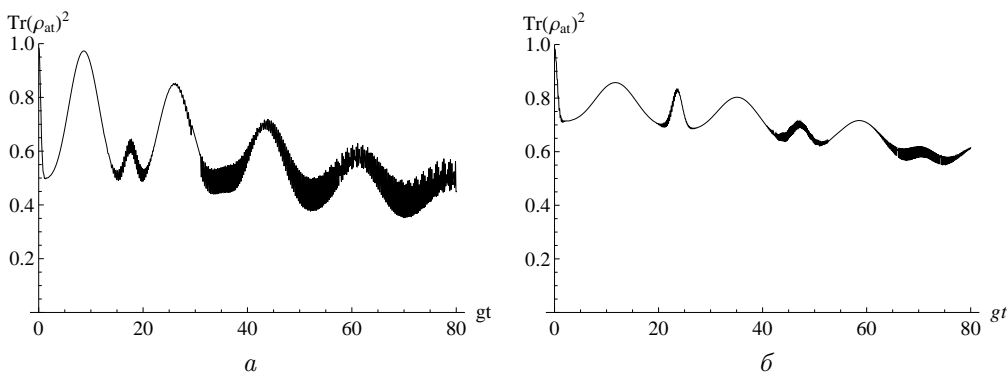


Рис. 1. Временная зависимость атомной энтропии $Tr\rho_{at}^2$ для модели с однофотонными переходами. Начальное атомное состояние: $\alpha = \delta = 1/\sqrt{2}, \beta = \gamma = 0$. Параметры модели: $\bar{n} = 30, \Omega = 0$ (а) и $\Omega = 10g$ (б)

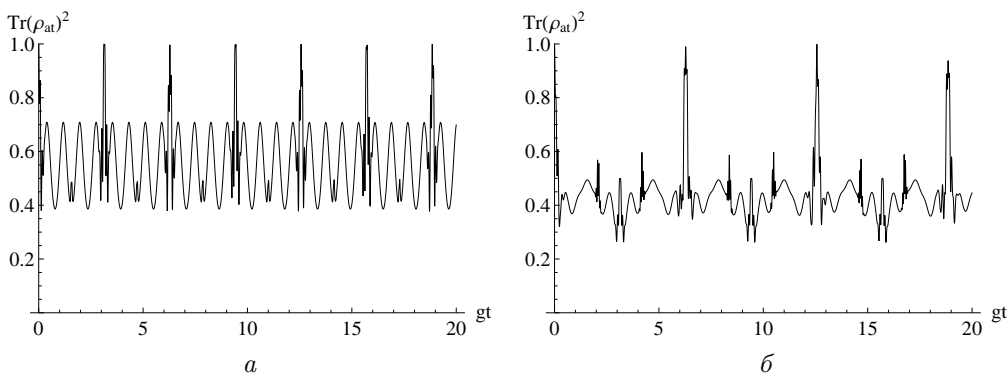


Рис. 2. Временная зависимость атомной энтропии $Tr\rho_{at}^2$ для модели с двухфотонными переходами. Начальное атомное состояние: $\alpha = 1, \beta = \gamma = \delta = 0$. Параметры модели: $\bar{n} = 30, \Omega = 0$ (а) и $\Omega = 10g$ (б)

Таким образом, мы показали, что диполь-дипольное взаимодействие приводит к стабилизации перепутывания только в случае модели Тависа — Каммингса с однофотонными переходами. Детальный анализ влияния диполь-дипольного взаимодействия на динамику атомной энтропии на основе анализа асимптотического поведения полной волновой функции (при $\bar{n} \gg 1$) для рассматриваемой

модели в рамках общего подхода, развитого ранее в работе [6], будет являться предметом нашей следующей работы.

Литература

- [1] Nielsen M.A., Chuang I.L. Quantum Computation and Quantum Information, Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 812 p.
- [2] Schumacker D., Westmoreland M.,D. Quantum Processes, Systems and Information. New York: Oxford University Press, 2010. 469 p.
- [3] Башкиров Е.К., Мастюгин М.С. Перепутывание в невырожденной двухфотонной модели Тависа — Каммингса // Вестн. СамГУ. Естественнонаучн. серия. 2011. № 5(86). С. 109–114.
- [4] The entanglement of two dipole-dipole coupled atoms in a cavity interacting with a thermal field / L.S. Aguiar [et al.] // J. Opt. 2005. Vol. B7. P. S769–771.
- [5] The entanglement of two dipole-dipole coupled atoms interacting with a thermal field via two-photon process / X.-P. Liao // Chin. Physics. 2008. Vol. B17. № 6. P. 2137–2142.
- [6] Bashkirov E.K. Entanglement in degenerate two-photon Tavis – Cummings model // Physica Scripta. 2010. Vol. 82. 015401.

Поступила в редакцию 13/III/2011;
в окончательном варианте — 13/III/2011.

THE INFLUENCE OF DIPOLE-DIPOLE INTERACTION ON THE ENTANGLEMENT FOR MANY-PHOTON TAVIS — CUMMINGS MODEL

© 2011 E.K. Bashkirov, M.S. Mastugin³

The influence of dipole-dipole interaction on the entanglement between two atoms and field in many-photon Tavis — Cummings with coherent cavity mode has been investigated. The results show that in the case of one-photon model the dipole-dipole interaction leads to the stabilization of atom-field entanglement.

Key words: two-atom model, many-photon transitions, dipole-dipole interaction, atom-field entanglement.

Paper received 13/III/2011.

Paper accepted 13/III/2011.

³Bashkirov Evgeniy Konstantinovich (bash@ssu.samara.ru), Mastugin Mikhail Sergeevich (mast12basket@rambler.ru), the Dept. of General and Theoretical Physics, Samara State University, Samara, 443011, Russian Federation.