

ПЕРЕПУТЫВАНИЕ ДВУХ АТОМОВ, ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ С ТЕПЛОВЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Башкиров Е.К., Ступацкая М.П.
Самарский государственный университет

Аннотация

Исследовано перепутывание состояний двух идентичных дипольно-связанных атомов, резонансно взаимодействующих с одномодовым тепловым полем в идеальном резонаторе. Найдена зависимость степени перепутывания от константы прямого дипольного взаимодействия для различных чистых и смешанных состояний атомов.

Ключевые слова: два идентичных двухуровневых атома, атомное перепутывание, тепловое поле, диполь-дипольное взаимодействие.

Введение

Квантовые перепутанные состояния являются основным ресурсом квантовой информатики. Для приложений в физике квантовых вычислений нужны максимально перепутанные чистые состояния с достаточно большим временем жизни [1]. В настоящее время предложены и частично реализованы различные схемы генерации и использования атомных перепутанных состояний. Долгоживущие атоматомные перепутанные состояния наблюдались в ряде экспериментов с ионами и атомами в магнитных и оптических ловушках [2-4]. Однако в реальных условиях квантовые системы всегда взаимодействуют с окружением. Такое взаимодействие обычно приводит к декогерентности, так что исследуемая система эволюционирует в смешанное перепутанное состояние, которое оказывается непригодным для целей квантовых вычислений. Поэтому с практической точки зрения основная задача при получении и использовании атомных перепутанных состояний заключается в том, чтобы предотвратить, минимизировать или использовать влияние шума. Было высказано большое количество предложений по защите, минимизированию или использованию влияния окружения для создания и сохранения 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 определённого окружения [1].

Недавно в целом ряде работ была высказана идея о том, что в некоторых случаях диссипация и шум могут, напротив, являться источником перепутывания. Впервые такая идея была предложена в работе [5]. В ней авторы показали, что за счёт диссипации два атома (два кубита) в оптическом резонаторе могут перейти в максимально перепутанное состояние, в то время как в отсутствие диссипации редуцированное состояние двухатомной системы представляет

собой несепарабельную смесь атомных состояний в любой момент времени, но только без максимального перепутывания. Возможность генерации перепутанных состояний в системе двух и более атомов в резонаторе за счёт различных механизмов диссипации рассматривалась позднее в большом количестве работ. В работе [6] рассмотрено возникновение атомного перепутывания в системе двух двухуровневых атомов в резонаторе при наличии диссипации за счёт утечки фотонов и спонтанного излучения при наличии белого шума. Позднее влияние вакуумного шума, фазового шума, теплового шума, различных типов классического шума и комбинации различных видов шумов на возникновение и исчезновение перепутывания атомов в резонаторе рассматривалось в большом числе работ (ссылки в [7-9]).

Ряд работ в последнее время был посвящён исследованию возможности генерации перепутывания в атомных системах в резонаторах, индуцированного тепловым шумом. Идея о возможности возникновения перепутывания при взаимодействии атомов в резонаторах с тепловым полем принадлежит Питеру Найту с соавторами [10]. В целом интерес к атомам в резонаторах и ионам в оптических и магнитных ловушках обусловлен возможностью использования таких систем в качестве логических элементов квантовых компьютеров (кубитов). Для теоретического описания таких систем используется модель Джейнса-Каммингса и её простейшие обобщения. Модель Джейнса-Каммингса описывает взаимодействие двухуровневого атома с модой квантового электромагнитного поля в идеальном резонаторе. Модель Джейнса-Каммингса и её простейшие обобщения играют фундаментальную роль в квантовой оптике, поскольку позволяют описать все основные квантовые эффекты взаимодействия излучения с веществом. В частности, на примере двухатомной модели Джейнса-Каммингса, которую также часто называют моделью Тависа-Каммингса, можно исследовать особенности атомного перепутывания за счёт взаимодействия атомов с различными бозонными полями. В последнее время интерес к одноатомным и двухатомным моделям особенно возрос в связи с их экспериментальной реализацией на атомах и ионах в резонаторах и ловушках, индивидуальных молекулах в органических кристаллах, искусственных атомах на квантовых

точках, сверхпроводящих системах [1]. В работе [10] впервые было показано, что перепутывание всегда возникает при взаимодействии произвольной системы с большим числом степеней свободы в смешанном состоянии и одиночного кубита в чистом состоянии, и общие результаты проиллюстрированы на примере модели Джейнса-Каммингса одиночного атома в чистом состоянии, взаимодействующего с модой теплового поля в идеальном резонаторе. В своей следующей работе Питер Найт с соавторами [11] показали, что одномодовый тепловой шум может также индуцировать атом-атомное перепутывание в системе двух двухуровневых атомов в идеальном резонаторе. В работе [12] проведено обобщение результатов работы [11] на случай системы двух неидентичных атомов с одинаковыми частотами переходов, но разными константами диполь-фотонного взаимодействия, а в работе [13] – на случай системы двух неидентичных атомов с одинаковыми константами диполь-фотонного взаимодействия, но различными частотами атомных переходов. Перепутывание в двухатомной системе с вырожденным двухфотонным взаимодействием, индуцированное одномодовым тепловым шумом, было рассмотрено в работе [14], а влияние двухмодового теплового шума на перепутывание двух двухуровневых атомов с невырожденными переходами и переходами рамановского типа – в работе [15]. При этом было показано, что при двухфотонном взаимодействии степень перепутывания атомных состояний может значительно превосходить соответствующую величину для однофотонного взаимодействия. Выбор в качестве исследуемой модели во многих работах, посвящённых возникновению перепутывания кубитов за счёт взаимодействия с окружением, системы двух кубитов (двух двухуровневых атомов) во многом обусловлен тем, что в квантовой информатике в настоящее время наиболее хорошо определена количественная мера перепутанности смешанных состояний именно для системы двух кубитов. Для таких систем показано, что критерий Переса-Хородецких [16, 17] является необходимым и достаточным условием перепутывания состояний двух кубитов. В квантовой информатике известны и другие меры или критерии перепутанности системы двух кубитов, позволяющие количественно оценивать указанную величину, в частности критерий Вуутерса, относительная энтропия и некоторые другие [1].

Как хорошо известно, диполь-дипольное взаимодействие атомных систем является естественным механизмом возникновения атомного перепутывания. Наличие диполь-дипольного взаимодействия атомов, в частности, может привести к значительному увеличению степени перепутывания двух атомов, взаимодействующих с модой теплового поля в идеальном резонаторе как посредством однофотонных переходов [18], так и двухфотонных вырожденных [19] и невырожденных переходов [20, 21]. Заметим, что атом-полевое перепутывание в таких моде-

лях рассмотрено в наших работах [22, 23]. Квантовые корреляции другого типа, приводящие к эффекту сжатия, рассмотрены для таких моделей в работе [24]. Физически диполь-дипольное взаимодействие можно увеличить, уменьшая относительное расстояние между атомами в резонаторе. Преимущество такой схемы заключается в том, что относительное расстояние между атомами можно легко контролировать. В настоящее время в современных магнитных ловушках Пауля охлаждённые атомы могут быть заперты на расстояниях порядка длины волны излучения. В этом случае параметр диполь-дипольного взаимодействия становится сравнимым с константой диполь-фотонного взаимодействия. В результате, такие экспериментальные установки могут быть использованы для генерации значительной степени перепутывания атомов, даже при наличии шума.

Диполь-дипольное взаимодействие атомов может быть использовано не только для увеличения степени перепутывания атомов, но и для стабилизации такого перепутывания. Как уже отмечалось выше, для практических целей пригодны лишь долгоживущие атомные перепутанные состояния. Однако во многих случаях возникающие атомные перепутанные состояния оказываются нестабильными. В частности, в случае атомов, взаимодействующих с электромагнитным полем в высокочастотных резонаторах и ловушках, нестабильность атомных перепутанных состояний обусловлена осцилляциями Раби. Для стабилизации атомного перепутывания предлагалось использовать взаимодействие атомов с окружением специального вида: сжатый вакуум, резонаторы низкой добротности, белый оптический шум и др. Однако в работе [25] показано, что высокая степень стационарного перепутывания может быть получена в значительно более простых условиях. Примером такой системы может служить система дипольно связанных двухуровневых атомов в режиме слабого взаимодействия с окружением (малые потери) в присутствии внешнего классического поля. Как уже отмечалось выше, коллективные эффекты, такие, как диполь-дипольное взаимодействие, являются естественными механизмами перепутывания. Однако в отсутствие специального окружения, например экзотического сжатого вакуума, которое компенсирует потери энергии, вызванные спонтанным излучением, перепутывание атомов является нестационарным эффектом. Для стабилизации атомного перепутывания при наличии диполь-дипольного взаимодействия атомов можно использоваться гораздо более простой вид специального окружения – внешнее классическое поле. Классическое поле действует на атомы локально, поэтому напрямую не может генерировать квантовые корреляции между атомами, однако оно непрерывно передаёт атомам энергию, переводя их в возбуждённое состояние, создавая тем самым необходимое условие для коллективных эффектов, которые приводят к стационарному перепутыванию.

Как уже отмечалась выше, в работах [18] и [19] исследовалось влияние прямого диполь-дипольного взаимодействия между двухуровневыми атомами на степень их перепутывания посредством как однофотонных, так и невырожденных двухфотонных взаимодействий с модами теплового поля в резонаторе. При этом авторы ограничились рассмотрением только одного начального состояния атомной подсистемы – состояния, в котором возбуждён только один из двух атомов. Было показано, что при наличии дипольного взаимодействия перепутывание возникает и в те моменты времени, когда оно отсутствовало без учёта дипольной связи атомов. Такой результат, однако, не является удивительным, поскольку гамильтониан взаимодействия между атомами и полем типа гамильтониана Тависа-Каммингса переводит состояние, в котором возбуждён один из атомов, в максимально перепутанное состояние. Поэтому представляет интерес исследовать влияние диполь-дипольного взаимодействия на степень атомного перепутывания для других начальных состояний атомов.

1. Модель и её точное решение

В настоящей работе нами рассмотрены особенности атомного перепутывания в системе двух дипольно связанных идентичных двухуровневых атомов, взаимодействующих с модой теплового поля в идеальном резонаторе посредством однофотонных переходов. Гамильтониан рассматриваемой системы в представленном взаимодействии может быть записан в виде:

$$H = \hbar\gamma \sum_{i=1,2} (a^+ \sigma_i^- + a \sigma_i^+) + \hbar\Omega(\sigma_1^+ \sigma_2^- + \sigma_1^- \sigma_2^+),$$

где a^+ (a) – оператор рождения (уничтожения) фотонов резонаторной моды, σ_i^+ (σ_i^-) – повышающий (понижающий) оператор для i -го атома, γ – константа взаимодействия двухуровневого атома с одномодовым полем, Ω – константа прямого диполь-дипольного взаимодействия атомов.

Рассматриваемая система имеет унитарную динамику, описываемую оператором эволюции $U(t) = \exp(-iHt/\hbar)$. Обозначим через $|+\rangle$ и $|-\rangle$ возбуждённое и основное состояние изолированного двухуровневого атома. В двухатомном базисе $|+,+\rangle$, $|+,-\rangle$, $|-,+\rangle$, $|-, -\rangle$ оператор эволюции $U(t)$ может быть представлен в виде:

$$U(t) = \begin{pmatrix} U_{11} & U_{12} & U_{13} & U_{14} \\ U_{21} & U_{22} & U_{23} & U_{24} \\ U_{31} & U_{32} & U_{33} & U_{34} \\ U_{41} & U_{42} & U_{43} & U_{44} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Здесь использованы обозначения:

$$U_{11} = 1 + 2a \frac{A}{\lambda} a^+, \quad U_{14} = 2a \frac{A}{\lambda} a,$$

$$U_{44} = 1 + 2a^+ \frac{A}{\lambda} a, \quad U_{41} = 2a^+ \frac{A}{\lambda} a^+,$$

$$U_{12} = U_{13} = a \frac{B}{\theta}, \quad U_{21} = U_{31} = \frac{1}{\theta} B a^+,$$

$$U_{24} = U_{34} = \frac{1}{\theta} B a, \quad U_{42} = U_{43} = a^+ \frac{B}{\theta},$$

$$U_{22} = U_{33} = \frac{\exp[-i\frac{\gamma}{2}(\alpha + \theta)t]}{4\theta} \{ [1 - \exp(i\gamma\theta t)] \alpha +$$

$$+ 2\theta \exp[i\frac{\gamma}{2}(3\alpha + \theta)t] + \theta [1 + \exp(i\gamma\theta t)] \},$$

$$U_{23} = U_{32} = \frac{\exp[-i\frac{\gamma}{2}(\alpha + \theta)t]}{4\theta} \{ [1 - \exp(i\gamma\theta t)] \alpha -$$

$$- 2\theta \exp[i\frac{\gamma}{2}(3\alpha + \theta)t] + \theta [1 + \exp(i\gamma\theta t)] \},$$

где $\alpha = \Omega/\gamma$, $\lambda = 2(a^{+2}a^2 + a^2a^{+2})$,

$$\Theta = \sqrt{8(a^{+2}a^2 + a^2a^{+2})},$$

$$A = \exp(-i\frac{\gamma\alpha}{2}t) \left[\cos\left(\frac{\gamma\theta}{2}t\right) + i\frac{\alpha}{\theta} \sin\left(\frac{\gamma\theta}{2}t\right) \right],$$

$$B = \exp[-i\frac{\gamma}{2}(\alpha + \theta)t] \{ 1 - \exp(i\gamma\theta t) \}.$$

Предположим, что в начальный момент времени электромагнитное поле находится в тепловом состоянии

$$\rho_F(0) = \sum_n p_n |n\rangle\langle n|, \quad (2)$$

где вероятности p_n имеют вид $p_n = \bar{n}^n / (1 + \bar{n})^{n+1}$.

Здесь \bar{n} – начальное среднее число фотонов в тепловой моде резонаторного поля. Начальное состояние атомов будем выбирать в виде различных суперпозиций состояний двухатомного базиса, а также в виде смешанного состояния.

Для исследования атомного перепутывания в рассматриваемой двухкубитной модели будем, как обычно, использовать параметр Переса-Хородецких [16, 17]. Для его вычисления необходимо найти редуцированную матрицу плотности атомной подсистемы

$$\rho_A(t) = \text{Tr}_F U(t) \rho_F(t) \otimes \rho_A(0) U^+(t).$$

Тогда параметр Переса-Хородецких определяется как

$$\varepsilon = -2 \sum_j \mu_j^-,$$

где μ_j^- – отрицательные собственные значения частично транспонированной (по переменным одного кубита) атомной матрицы плотности ρ_A^T . Необходимым и достаточным условием сепарабельности (перепутанности состояний) кубитов является неотрицательность параметра Переса-Хородецких. Для максимально перепутанного состояния кубитов $\varepsilon = 1$. Для неперепутанных состояний кубитов $\varepsilon = 0$.

Если атомы первоначально находятся в чистом состоянии, таком как $|+,+\rangle$, $|+,-\rangle$, $|-,+\rangle$, $|-, -\rangle$

или их суперпозиции, редуцированная атомная матрица плотности с учётом явного вида оператора эволюции (1) и начального условия (2) для полевой подсистемы может быть представлена как

$$\rho_A = \begin{pmatrix} A & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B & E & 0 \\ 0 & E & C & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Для частично транспонированной по отношению к (3) атомной матрицы плотности ρ_A^T имеется всего одно собственное значение, которое может иметь отрицательный знак

$$\mu_1^- = \frac{1}{2} \left[D + A - \sqrt{(D - A)^2 + 4E^2} \right].$$

Собственное значение μ_1^- становится отрицательным тогда и только тогда, когда $|E| > \sqrt{AD}$. При выполнении этого условия в качестве меры атом-атомного перепутывания может быть использована величина:

$$\epsilon(t) = \sqrt{(D - A)^2 + 4E^2} - D - A. \quad (4)$$

2. Обсуждение результатов

Результаты численного моделирования параметра перепутывания (4) для различных начальных чистых и смешанного состояния атомов приведены на рис. 1-3.

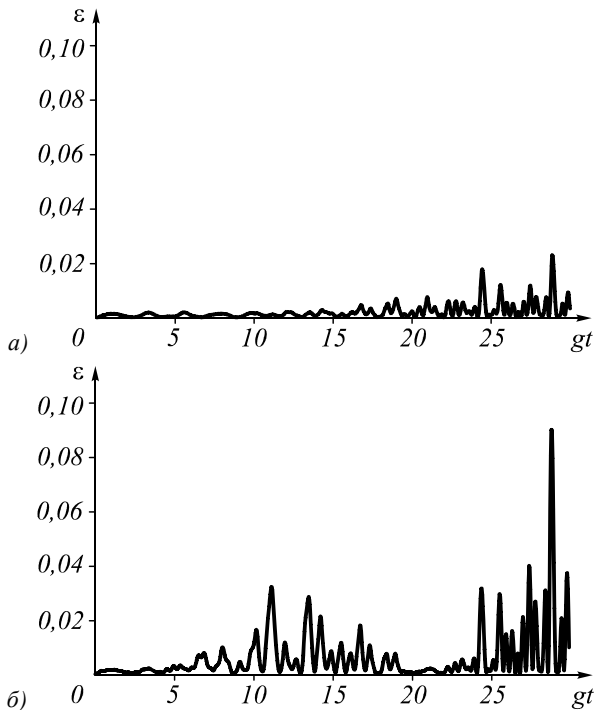


Рис. 1. Временная зависимость параметра перепутывания для модели с $\bar{n} = 30$ и $\Omega/g = 0,01$ (а), $\Omega/g = 0,1$ (б). В начальный момент атомы находятся в состоянии $|+, -\rangle$

На рис. 1а, б представлена временная зависимость параметра Переса-Хородецких $\epsilon(t)$ для начального состояния атомной системы вида $|+, -\rangle$. На рис. 1а, б хорошо видно, что диполь-дипольное взаимодействие приводит к заметной степени перепутывания атомов, даже в случае высокой степени шума ($\bar{n} \gg 1$). При этом степень перепутывания заметно возрастает при увеличении константы прямого диполь-дипольного взаимодействия атомов. Как показывают расчёты, для слабого шума ($\bar{n} \sim 1$) атомы могут достигать для некоторых времён максимальной степени перепутывания. Однако, как уже отмечалось во Введении, такой результат не является удивительным, поскольку гамильтониан взаимодействия между атомами и полем переводит состояние $|+, -\rangle$ в максимально перепутанное состояние. Поэтому рассмотрим далее поведение параметра перепутывания для других начальных состояний атомов.

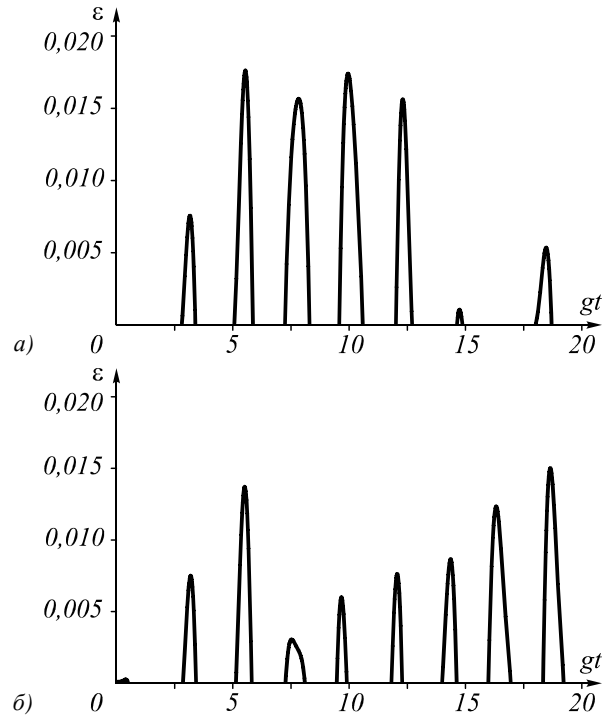


Рис. 2. Временная зависимость параметра перепутывания для модели с $\bar{n} = 1$ и $\Omega/g = 0,01$ (а), $\Omega/g = 0,1$ (б). В начальный момент атомы находятся в состоянии $|-, -\rangle$

На рис. 2а, б представлена временная зависимость параметра Переса-Хородецких $\epsilon(t)$ для начального состояния атомной системы вида $|-, -\rangle$. В этом случае в результате взаимодействия атомов с тепловым полем также возникает перепутывание, однако его степень значительно меньше, нежели в предыдущем случае. При этом диполь-дипольное взаимодействие достаточно слабо влияет на величину $\epsilon(t)$ и перепутывание возникает только для теплового поля малой интенсивности ($\bar{n} \sim 1$).

Как показывают расчёты, для начального состояния атомов вида $|+,+\rangle$, т.е. когда оба атома возбуждены, перепутывание состояний атомов не возникает ни при каких параметрах модели.

Особый интерес представляет собой поведение параметра перепутывания в случае начального смешанного состояния атомов

$$\rho_A = \prod_{i=1,2} [\lambda |+,+\rangle_i \langle +,+| + (1-\lambda) |-, -\rangle_i \langle -, -|],$$

где $\lambda / (1-\lambda) = \exp(\omega_0 / kT)$ – параметр смешивания возбуждённого и основного состояний двух атомов и ω_0 – резонансная частота перехода в двухуровневом атоме.

На рис. 3 показана временная зависимость параметра перепутывания $\varepsilon(t)$ для смешанного начального состояния атомов. Для рассматриваемого случая слабое перепутывание атомов возникает только для теплового поля малой интенсивности ($\bar{n} \sim 1$). При этом увеличение константы диполь-дипольного взаимодействия приводит к уменьшению степени перепутывания.

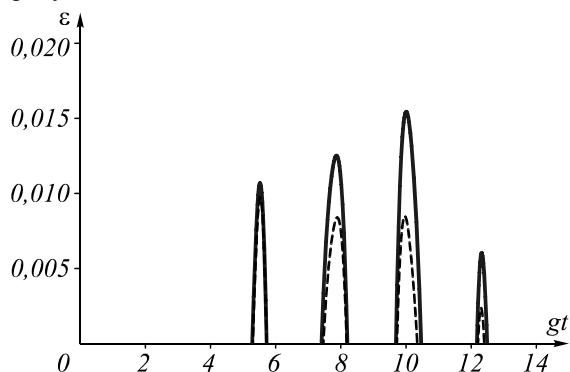


Рис. 3. Временная зависимость параметра перепутывания для модели с $\bar{n} = 1$ и $\Omega / g = 0,01$ (сплошная линия), $\Omega / g = 0,1$ (штриховая линия). В начальный момент атомы находятся в смешанном состоянии с $\lambda = 0,05$

Таким образом, в настоящей работе мы показали возможность возникновения перепутывания в системе двух идентичных двухуровневых атомов за счёт взаимодействия с тепловым полем для различных чистых и смешанного состояния атомов, за исключением случая, когда оба атома возбуждены. Было также показано, что при определённых начальных состояниях атомов и теплового поля достаточно слабой интенсивности наличие диполь-дипольного взаимодействия может приводить к максимальному перепутыванию атомов. При этом за счёт наличия осцилляций Раби для любых параметров перепутывание носит нестационарный характер. Для стабилизации атомного перепутывания может быть использовано внешнее классическое поле. Исследование поведения параметра перепутывания в системе двух дипольно связанных атомов, взаимодействующих с тепловым полем и внешней классической накачкой, будет являться предметом нашей следующей работы.

Благодарности

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (Государственный контракт № 14.740.11.0063).

Литература

1. **Schumacker, D.** Quantum Processes, Systems and Information / D. Schumacker, M.D. Westmoreland. – New York: Cambridge University Press, 2010. – 469 p.
2. **Haroche, S.** Exploring the Quantum. Atoms, Cavities and Photons / S. Haroche, J.-M. Raimond. – New York: Oxford University Press, 2006. – 606 p.
3. **Walter, H.** Cavity quantum electrodynamics / H. Walther, B.T.H. Varcoe, B.-G. Englert, T. Becker // Rep. Prog. Phys. – 2006. – Vol. 69. – P. 1325-1382.
4. **Leibfried, D.** Quantum dynamics of single trapped ions / D. Leibfried, R. Blatt, C. Monroe // Rev. Mod. Phys. – 2003. – Vol. 75. – P. 281-324.
5. **Plenio, M.B.** Cavity-loss-induced generation of entangled atoms / M.B. Plenio, S.F. Huelda, A. Beige, P.L. Knight // Phys. Rev. – 1999. – Vol. A59. – N 3. – P. 2468-2475.
6. **Tanas, R.** Entangling two atoms via spontaneous emission / R. Tanas, Z. Ficek // J. Opt. – 2004. – Vol. B6. – P. S90-S97.
7. **Yi, X.X.** Noise-assisted preparation of entangled atoms / X.X. Yi., C.S. Yu, H.S. Song // Phys. Rev. – 2003. – Vol. 68. – P. 052304.
8. **Ozel, C.** Stationary state entanglement of two atoms inside an optical cavity under noise / C. Ozel // Int. J. Theor. Phys. – 2008. – Vol. 47. – P. 3101-3107.
9. **Yu, T.** Entanglement evolution in a non-Markovian environment / T. Yu, J.H. Eberly // Opt. Commun. – 2010. – Vol. 283. – P. 676-680.
10. **Bose, S.** Subsystem purity as an enforcer of entanglement / S. Bose, I. Fuentes-Guridi, P.L. Knight, V. Vedral // Phys. Rev. Lett. – 2001. – Vol. 87. – P. 050401.
11. **Kim, M.S.** Entanglement induced by a single-mode heat environment / M.S. Kim, J. Lee, D. Ahn, P.L. Knight // Phys. Rev. – 2002. – Vol. A65. – P. 040101.
12. **Zhou, L.** Entanglement of two atoms through different couplings and thermal noise / L. Zhou, X.X. Yi, H.S. Song, Y.Q. Quo // J. Opt. – 2004. – Vol. B6. – P. 378-384.
13. **Башкиров, Е.К.** Перепутанные состояния в системе двух неидентичных атомов, взаимодействующих с тепловым шумом / Е.К. Башкиров // Вестник СамГУ. Естественнонаучная серия. – 2006. – № 3(43). – С. 21-29.
14. **Zhou, L.** Entanglement induced by a single-mode thermal field and criteria for entanglement / L. Zhou, H.S. Song // J. Opt. – 2002. – Vol. B4. – P. 425-429.
15. **Bashkirov, E.K.** Entanglement induced by the two-mode thermal noise / E.K. Bashkirov // Laser Physics Letters. – 2006. – Vol. 3, N 3. – P. 145-150.
16. **Peres, A.** Separability criterion for density matrices / A. Peres // Phys. Rev. Lett. – 1996. – Vol. 77, N 8. – P. 1413-1415.
17. **Horodecki, R.** Separability of mixed states: Necessary and sufficient conditions / R. Horodecki, M. Horodecki, P. Horodecki // Phys. Lett. – 1996. – Vol. A223. – P. 333-339.

18. **Aguiar, L.S.** The entanglement of two dipole-dipole coupled atoms in a cavity interacting with a thermal field / L.S. Aguiar, P.P. Munhoz, A. Vidiella-Barranco, J.A. Roversi // *J. Opt.* – 2005. – Vol. B7. – P. S769-771.
19. **Liao, X.-P.** The entanglement of two dipole-dipole coupled atoms interacting with a thermal field via two-photon process / X.-P. Liao, M.-F. Fang, J.-Wu Cai, X.-J. Zheng // *Chin. Physics.* – 2008. – Vol. B17, N 6. – P. 2137-2142.
20. **Bashkirov, E.K.** The entanglement of two dipole-dipole coupled atoms induced by nondegenerate two-mode thermal noise / E.K. Bashkirov, M.P. Stupatskaya // *Laser Physics.* – 2009. – Vol. 19. – P. 525-530.
21. **Башкиров Е.К.** Перепутывание двух дипольно связанных атомов / Е.К. Башкиров, М.П. Ступацкая // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы.* – 2009. – Т. 12, № 2. – С. 85-90.
22. **Bashkirov, E.K.** Atom-field entanglement in two-atom Jaynes-Cummings model with nondegenerate two-photon transitions / E.K. Bashkirov, M.S. Rusakova // *Opt. Commun.* – 2008. – Vol. 281. – P. 4380-4386.
23. **Bashkirov, E.K.** Entanglement in degenerate two-photon Tavis-Cummings model / E.K. Bashkirov // *Physica Scripta.* – 2010. – Vol. 82, N 1. – P. 015401.
24. **Башкиров, Е.К.** Сжатие света в двухатомной модели Джейнса-Каммингса с невырожденными двухфотонными переходами / Е.К. Башкиров, С.П. Липатова // *Компьютерная оптика.* – 2010. – Т. 33, № 4. – С. 379-383. – ISSN 0134-2452.
25. **Cakir, O.** Steady-state entanglement of two-atoms created by classical driving field / O. Cakir, A.A. Klyachko, A.S. Shumovsky // *Phys. Rev.* – 2005. – Vol. 71. – P. 034303.
10. **Bose, S.** Subsystem purity as an enforcer of entanglement / S. Bose, I. Fuentes-Guridi, P.L. Knight, V. Vedral // *Phys. Rev. Lett.* – 2001. – Vol. 87. – P. 050401.
11. **Kim, M.S.** Entanglement induced by a single-mode heat environment / M.S. Kim, J. Lee, D. Ahn, P.L. Knight // *Phys. Rev.* – 2002. – Vol. A65. – P. 040101.
12. **Zhou, L.** Entanglement of two atoms through different couplings and thermal noise / L. Zhou, X.X. Yi, H.S. Song, Y.Q. Quo // *J. Opt.* – 2004. – Vol. B6. – P. 378-384.
13. **Bashkirov, E.K.** Entangled states in the system of two atoms interacting with thermal noise / E.K. Bashkirov // *Vestnik SamGU.* – 2006. – N 3(43). – P. 21-29. – (In Russian).
14. **Zhou, L.** Entanglement induced by a single-mode thermal field and criteria for entanglement / L. Zhou, H.S. Song // *J. Opt.* – 2002. – Vol. B4. – P. 425-429.
15. **Bashkirov, E.K.** Entanglement induced by the two-mode thermal noise / E.K. Bashkirov // *Laser Physics Letters.* – 2006. – Vol. 3, N 3. – P. 145-150.
16. **Peres, A.** Separability criterion for density matrices / A. Peres // *Phys. Rev. Lett.* – 1996. – Vol. 77, N 8. – P. 1413-1415.
17. **Horodecki, R.** Separability of mixed states: Necessary and sufficient conditions / R. Horodecki, M. Horodecki, P. Horodecki // *Phys. Lett.* – 1996. – Vol. A223. – P. 333-339.
18. **Aguiar, L.S.** The entanglement of two dipole-dipole coupled atoms in a cavity interacting with a thermal field / L.S. Aguiar, P.P. Munhoz, A. Vidiella-Barranco, J.A. Roversi // *J. Opt.* – 2005. – Vol. B7. – P. S769-771.
19. **Liao, X.-P.** The entanglement of two dipole-dipole coupled atoms interacting with a thermal field via two-photon process / X.-P. Liao, M.-F. Fang, J.-Wu Cai, X.-J. Zheng // *Chin. Physics.* – 2008. – Vol. B17, N 6. – P. 2137-2142.

References

1. **Schumacker, D.** Quantum Processes, Systems and Information / D. Schumacker, M.D. Westmoreland. – New York: Cambridge University Press, 2010. – 469 p.
2. **Haroche, S.** Exploring the Quantum. Atoms, Cavities and Photons / S. Haroche, J.-M. Raimond. – New York: Oxford University Press, 2006. – 606 p.
3. **Walter, H.** Cavity quantum electrodynamics / H. Walther, B.T.H. Varcoe, B.-G. Englert, T. Becker // *Rep. Prog. Phys.* – 2006. – Vol. 69. – P. 1325-1382.
4. **Leibfried, D.** Quantum dynamics of single trapped ions / D. Leibfried, R. Blatt, C. Monroe // *Rev. Mod. Phys.* – 2003. – Vol. 75. – P. 281-324.
5. **Plenio, M.B.** Cavity-loss-induced generation of entangled atoms / M.B. Plenio, S.F. Huelda, A. Beige, P.L Knight // *Phys. Rev.* – 1999. – Vol. A59. – N 3. – P. 2468-2475.
6. **Tanas, R.** Entangling two atoms via spontaneous emission / R. Tanas, Z. Ficek // *J. Opt.* – 2004. – Vol. B6. – P. S90-S97.
7. **Yi, X.X.** Noise-assisted preparation of entangled atoms / X.X Yi., C.S. Yu, H.S. Song // *Phys. Rev.* – 2003. – Vol. 68. – P. 052304.
8. **Ozel, C.** Stationary state entanglement of two atoms inside an optical cavity under noise / C. Ozel // *Int. J. Theor. Phys.* – 2008. – Vol. 47. – P. 3101-3107.
9. **Yu, T.** Entanglement evolution in a non-Markovian environment / T. Yu, J.H. Eberly // *Opt. Commun.* – 2010. – Vol. 283. – P. 676-680.
20. **Bashkirov, E.K.** The entanglement of two dipole-dipole coupled atoms induced by nondegenerate two-mode thermal noise / E.K. Bashkirov, M.P. Stupatskaya // *Laser Physics.* – 2009. – Vol. 19. – P. 525-530.
21. **Bashkirov, E.K.** Entanglement of two coupled atoms / E.K. Bashkirov, M.P. Stupatskaya // *Physics of wave process and radiotechnical systems.* – 2009. – Vol. 12, N 2. – P. 85-90. – (In Russian).
22. **Bashkirov, E.K.** Atom-field entanglement in two-atom Jaynes-Cummings model with nondegenerate two-photon transitions / E.K. Bashkirov, M.S. Rusakova // *Opt. Commun.* – 2008. – Vol. 281. – P. 4380-4386.
23. **Bashkirov, E.K.** Entanglement in degenerate two-photon Tavis-Cummings model / E.K. Bashkirov // *Physica Scripta.* – 2010. – Vol. 82, N 1. – P. 015401.
24. **Bashkirov, E.K.** Light squeezing in two-atom Jaynes-Cummings model with degenerate two-photon transitions / E.K. Bashkirov, S.P. Lipatova // *Computer Optics.* – 2010. – Vol. 33, N 4. – P. 379-383. – ISSN 0134-2452. – (In Russian).
25. **Cakir, O.** Steady-state entanglement of two-atoms created by classical driving field / O. Cakir, A.A. Klyachko, A.S. Shumovsky // *Phys. Rev.* – 2005. – Vol. A71. – P. 034303.

ENTANGLEMENT OF TWO ATOMS INTERACTING WITH A THERMAL ELECTROMAGNETIC FIELD

*E.K. Bashkirov, M.P. Stupatskaya
Samara State University*

Abstract

The entanglement between two dipole-coupled identical two-level atoms resonantly interacting with one-mode thermal field in lossless cavity has been investigated. The dependence of dipole strength on the degree of entanglement has been carried out for different pure and mixed atomic states.

Key words: two identical two-level atoms, atomic entanglement, thermal field, dipole-dipole interaction.

Сведения об авторах

Башкиров Евгений Константинович, 1955 года рождения, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры общей и теоретической физики Самарского государственного университета (СамГУ). В 1978 году окончил физический факультет Куйбышевского государственного университета, в 1986 году – аспирантуру Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова и защитил там кандидатскую диссертацию, а в 2006 году защитил докторскую диссертацию в Саратовском государственном университете. Область научных интересов: квантовая и когерентная оптика, квантовая информатика, компьютерное моделирование в физике. Публикации: около 170 научных работ, из них 70 в ведущих отечественных и зарубежных журналах, таких как «ТМФ», «Оптика и спектроскопия», «Physics Letters», «Optics Communications», «Laser Physics Letters» и др.

E-mail: bash@ssu.samara.ru.

Eugene Konstantinovich Bashkirov (b. 1955) is professor of Department of General and Theoretical Physics of Samara State University. He received his MS, PhD and DrSc degrees in physics from Samara State University (1978), M.V. Lomonosov Moscow State University (1984) and Saratov State University (2006). He is co-author of 170 scientific papers, including 70 papers in well-known Russian and foreign journals, such as “Theor. and Math. Physics”, “Optica i Spektroskopia”, “Physics Letters”, “Optics Communications”, “Laser Physics Letters” et al. His current interests are quantum and coherent optics, quantum informatics, computer simulation in physics.



Ступацкая Мария Петровна, в 2009 году окончила физический факультет Самарского государственного университета, аспирант кафедры общей и теоретической физики Самарского государственного университета. Область научных интересов: квантовая оптика, квантовая информатика, математическое моделирование. Автор 8 научных статей.

E-mail: Stupatskaya@NetCracker.com.

Maria Petrovna Stupatskaya graduated from Physical Department of Samara State University in 2009. She is the postgraduate student of the Department of General and Theoretical Physics of Samara State University. Her research interests are currently quantum optics, quantum informatics, and mathematical modeling. She is co-author of 5 scientific papers.

Поступила в редакцию 31 марта 2011 г.