

ПЕРЕПУТЫВАНИЕ АТОМОВ, ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ
С ТЕПЛОВЫМ ПОЛЕМ В ИДЕАЛЬНОМ РЕЗОНАТОРЕ, ПРИ НАЛИЧИИ
АТОМНОЙ КОГЕРЕНТНОСТИ

Е.К. Башкиров, М.С. Мастюгин
Самарский государственный университет
bash@samsu.ru

Одной из основных проблем современной физики квантовых вычислений является проблема разработки эффективных схем генерации и механизмов стабилизации и контроля перепутывания кубитов, взаимодействующих с электромагнитными полями [1]. В настоящее время экспериментально реализованы различные типы долгоживущих перепутанных состояний атомов и ионов в резонаторах и магнитных ловушках, а также различных искусственных атомных объектах, таких как квантовые точки, индивидуальные молекулы в органических кристаллах, сверхпроводящие системы и др. Взаимодействие кубитов с окружением приводит к декогерентности и разрушению квантовых корреляций кубитов. Поэтому с практической точки зрения важнейшей задачей физики квантовых вычислений является разработка механизмов минимизации влияния окружения или шума на перепутывание кубитов. Недавно несколькими авторами была высказана идея о том, что в некоторых случаях диссипация и шум могут, напротив, являться источником перепутывания. Ряд работ был посвящен исследованию возможности генерации перепутывания атомов в резонаторах, индуцированного тепловым шумом. В работе [1] 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 работе [2] установлено, что одномодовый тепловой шум может также индуцировать атом-атомное перепутывание в системе двух двухуровневых атомов в идеальном резонаторе. Перепутывание в двухатомной системе с вырожденным двухфотонным взаимодействием, индуцированное одномодовым тепловым шумом, было рассмотрено в работе [3], а влияние двухмодового теплового шума на перепутывание двух двухуровневых атомов с невырожденными переходами и переходами рамановского типа - в работе [4]. При этом было показано, что при двухфотонном взаимодействии степень перепутывания атомных состояний может значительно превосходить соответствующую величину для однофотонного взаимодействия.

В работах [5,6] на примере двухатомных моделей с однофотонными

и вырожденными двухфотонными атомными переходами было показано, что высокая степень перепутывания, индуцированная тепловым шумом, может быть получена за счет начальной атомной когерентности атомов. Было установлено, что наличие атомной когерентности в системе может приводить к увеличению степени перепутывания атомов даже в случае интенсивного теплового поля. Кроме того было доказано, что перепутыванием атомов можно управлять, изменяя начальные параметры системы, такие как амплитуды поляризованных атомов и их фазы, интенсивность диполь-дипольного взаимодействия и среднее число фотонов в моде. 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 атомов, взаимодействующих с электромагнитными полями в резонаторе. Однако влияние диполь-дипольного взаимодействия на степень атомного перепутывания при наличии атомной когерентности было изучено только для модели с однофотонными переходами [6]. Вместе с тем в целом ряде работ показано, что диполь-дипольное взаимодействие может заметно влиять на степень атомного перепутывания, индуцированного тепловым шумом, и в двухфотонных моделях (см. ссылки в [7]). При этом характер зависимости атомного перепутывания от дипольного взаимодействия в таких двухфотонных моделях существенно отличается от однофотонного случая. Поэтому в настоящей работе мы рассмотрим влияние дипольного взаимодействия на степень атомного перепутывания в случае начальных когерентных перепутанных состояний атомов в рамках двухатомной модели Тависа-Каммингса с вырожденными двухфотонными переходами.

Будем исследовать динамику двух идентичных двухуровневых атомов, резонансно взаимодействующих с одномодовым квантовым электромагнитным полем в резонаторе без потерь за счет вырожденных двухфотонных переходов, при наличии прямого диполь-дипольного взаимодействия между атомами. В представлении взаимодействия гамильтониан такой модели можно представить в виде:

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

где b^+ и b – операторы рождения и уничтожения фотонов, σ_j^+ и σ_j^- – операторы переходов атомов в j -ом атоме ($j=1,2$), γ – константа взаимодействия атомов с полем и J – параметр диполь-дипольного взаимодействия атомов.

Обозначим через $|+\rangle$ и $|-\rangle$ возбужденное и основное состояния двухуровневого атома. Тогда двухатомная волновая функция может быть представлена в виде комбинации волновых векторов вида $|v_1, v_2\rangle = |v_1\rangle |v_2\rangle$,

где $v_1, v_2 = +, -$. Рассматриваемая модель обладает унитарной динамикой, для которой может быть найден в аналитическом виде оператор эволюции вида $U(t)$.

Пусть в начальный момент времени резонаторное поле находится в одномодовом тепловом поле

$$\rho_F(0) = \sum_n P(n) |n\rangle\langle n|, \quad \text{где } P(n) = \bar{n}^n / (1 + \bar{n})^{n+1}$$

и \bar{n} – среднее число тепловых фотонов в моде, а атомы находятся в когерентном суперпозиционном состоянии базисных двухатомных векторов.

Для определения степени атом-атомного перепутывания в работе использовался параметр Переса-Хородецких, который определяется как

$$\varepsilon = -2 \sum_i \mu_i^-,$$

где μ_i^- – отрицательные собственные значения частично транспонированной по переменным одного кубита (атома) редуцированной матрицы плотности. Для неперепутанных состояний $\varepsilon = 0$. Для перепутанных состояний $0 < \varepsilon \leq 1$. Максимальной степени перепутывания соответствует значение $\varepsilon = 1$.

С использованием оператора эволюции мы можем вычислить стандартным образом редуцированную матрицу плотности

$$\rho_A(t) = Tr_F U(t) \rho_F(0) \otimes \rho_A(0) U^+(t),$$

а с ее помощью частично транспонированную по переменным одного кубита атомную матрицу плотности.

Получение аналитических результатов для параметра перепутывания рассматриваемой модели представляет собой весьма непростую задачу. Поэтому в настоящей работе мы провели численное моделирование перепутывания для различных начальных когерентных перепутанных (случаи 1-2) и неперепутанных (случай 3) состояний атомов. Мы рассмотрели начальные состояния вида:

1. $|\Psi(0)\rangle = \cos \theta |+, -\rangle + \sin \theta e^{i\varphi} |-, +\rangle$.
2. $|\Psi(0)\rangle = \cos \theta |+, +\rangle + \sin \theta e^{i\varphi} |-, -\rangle$.
3. $|\Psi(0)\rangle = |\Psi(0)\rangle_1 |\Psi(0)\rangle_2$,

где $|\Psi_1(0)\rangle = \cos \theta_1 |+\rangle + e^{i\varphi_1} \sin \theta_1 |-\rangle$, $|\Psi_2(0)\rangle = \cos \theta_2 |+\rangle + e^{i\varphi_2} \sin \theta_2 |-\rangle$.

Здесь $\theta, \theta_1, \theta_2$ – параметры когерентности и $\varphi, \varphi_1, \varphi_2$ – относительные фазы.

Результаты численного моделирования параметра Переса-Хородецких показывают, что за счет диполь-дипольного взаимодействия при наличии начальной атомной когерентности в рассматриваемой системе может быть получена высокая степень атомного перепутывания даже

в случае интенсивного теплового шума. Кроме того, выбирая определенным образом параметры когерентности атомов, мы можем добиться эффективного контроля за степенью перепутанности кубитов. На рис. 1 показана зависимость перепутывания атомов от параметра диполь-дипольного взаимодействия для начального атомного когерентного перепутанного состояния первого типа.

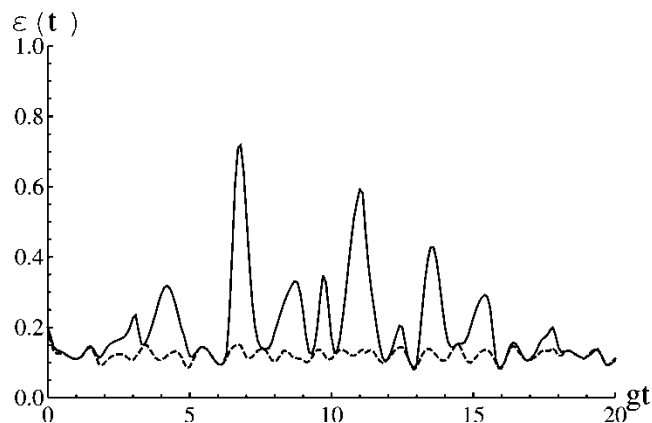


Рис. 1. Временная зависимость параметра перепутывания для когерентного начального состояния $|\Psi(0)\rangle = 1/\sqrt{2}(|+, -\rangle + \sin\theta e^{i2\pi/3}|-, +\rangle)$. Параметр диполь-дипольного взаимодействия $J/\gamma = 0$ (штриховая линия) и $J/\gamma = 0.1$ (сплошная линия).

Среднее число фотонов в моде $\bar{n} = 1$

Таким образом, в настоящей работе нами исследовано влияние диполь-дипольного взаимодействия на перепутывание двух атомов, взаимодействующих с тепловым полем в идеальном резонаторе посредством вырожденных двухфотонных переходов при наличии начальной когерентности в атомной системе. При этом было показано, что указанный механизм может быть использован для эффективного контроля за степенью перепутанности кубитов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Schumacker D., Westmoreland M.D. Quantum Processes, Systems, and Information. New York: Cambridge University Press, 2010. 469 p.
2. Bose S., Fuentes-Guridi I., Knight P.L., Vedral V. // Phys. Rev. Lett. 2001. V. 87. No 5. P. 050401.
3. Kim M.S., Lee J., Ahn D., Knight P.L. // Phys. Rev. 2002. V. A65. No 4. 040101.
4. Zhou L., Song H.S. // J. Opt. 2002. V. B4. P. 425.
5. Bashkirov E. K. // Las. Phys. Lett. 2006. V. 3. No 3. P. 145.
6. Hu Y.H., Fang M.F., Wu Q. // Chin. Phys. 2007. V. B16. No 8. P. 2407.
7. Hu Y.H., Fang M.F., Wu Q., Zeng K. // Chin. Phys. 2008. V. B17. No 5. P. 1784.
8. Bashkirov E.K., Stupatskaya M.P. // Las. Phys. 2009. V. 19. No 3. P. 525.