

Удалённое стимулирование сценариев КЭД в модели Джейнса Каммингса Хаббарда на ЧИСТЫХ СОСТОЯНИЯХ

Андрей Кузьминский (1),
Юрий Ожигов (1,2)

1. *Московский Государственный Университет им. М.В.Ломоносова,
Факультет вычислительной математики и кибернетики,*
2. *Физико-технологический институт РАН им. К.А.Валиева*

9 февраля 2025 г.

Аннотация

Предложена модель удаленного стимулирования простых сценариев КЭД в системе оптических полостей, соединенных волноводами. Эта модель позволяет избежать избыточного описания состояния в виде матрицы плотности и использовать только вектор чистого состояния, что дает возможность существенной экономии вычислительных ресурсов и позволяет моделировать на компьютере более сложные сценарии.

1 Введение

Дистантный перенос генетической информации является наиболее интригующим динамическим сценарием микромира. Эксперименты подобного рода проводились в нескольких лабораториях (см. в частности, работу [11] коллектива под руководством Люка Монтанье), что показало не только наличие эффекта но и нетривиальность тех условий которые требуются для его проявления. Последнее обстоятельство вызвало волну критики со стороны научной общественности (например работа [12]); это говорит о важности как выяснения конкретных условий для дистантного переноса, так и самого механизма этого феномена.

Вряд ли можно найти объяснение дистантного переноса, не привлекая квантовую механику, в частности, отдельных фотонов и их взаимодействие с атомами, что удобнее всего сделать в рамках модели Тависа-Каммингса-Хаббарда (ТСН - [4], [5]), которая описывает взаимодействие многомодового поля с атомами, распределенными по оптическим полостям, соединенными волноводами.

Механизм, предлагаемый нами для объяснения дистантного переноса основан на существенном усилении энергии перехода между атомными состояниями при наличии большого числа фотонов данного перехода в окрестности атома; мы называем его индукцией перехода, а сам переход - индуцированным.

2 Дистантный перенос состояний

Дистантный перенос квантовых состояний при перемещении только классической информации называется телепортацией. С пионерских работ [8],[7] телепортация привлекает постоянный интерес как в связи с криптографией (см., например, [6]), так и сама по себе, как передача информации с помощью квантового канала связи. Это особенно актуально при организации квантовых сетей ([1]) и распределенных вычислений ([2], [3]). Есть также множество работ, посвященных конкретным физическим системам, в которых влияние дистантного переноса состояний важно: [10],[11], в частности, относящимся к биологической сфере - [13], [14],[15].

Серьезной частью моделирования является описание декогерентности. Квантовое основное уравнение формально описывающее эволюцию квантовой системы с декогерентностью, не всегда подходит для практического моделирования в связи с проблемой сложности. Использование для такого моделирования матрицы плотности не является оптимальным шагом из-за избыточности такого описания. Случайность в матрице плотности подразделяется на классическую в виде весов квантовых состояний, и квантовую, заключенную в самих этих состояниях, что и создает избыточность, ведущую к перерасходу компьютерной памяти из-за необходимости хранить матрицу вместо вектора.

Имеется цикл работ посвященных модификация квантового основного уравнения для с учетом данной трудности- [16],[17]. Мы будем использовать модифи-

кацию модели ТСН с использованием только вектора состояния в метре вместо матрицы плотности. Идея такого подхода восходит к работам по квантовому отжигу ([18], а также более ранняя [19]), в которых разыскивался глобальный минимум некоторой функции. В нашем случае виртуальный вектор состояния предназначен не для математической задачи поиска экстремума, а для моделирования естественного процесса.

Однако при постоянном гамильтониане такое описание приведет к хаосу из-за отсутствия однонаправленного характера динамики. Именно введение операторов декогерентности в квантовом основном уравнении создает такую однонаправленность, платой за что и является избыточность описания.

Мы рассмотрим более простой способ создания однонаправленного характера основанный на гамильтониане Джеймса Каммингса Хаббарда. Этот гамильтониан описывает динамику квантовых состояний ансамблей двухуровневых атомов распределенных по оптическим полостям соединенным волноводами. Наша модель позволяет представлять динамику ансамблей без оптических полостей, когда фотоны удаляются из одной локации и могут попасть в другую. Это перемещение фотонов при определенных условиях может создать интересный эффект удаленного стимулирования сценариев квантовой электродинамики на примере которых мы продемонстрируем возможности нашей модели.

3 Простейший пример фотонного трансфера динамики

Дистанционный трансфер квантовых состояний (см., например, [3]) является важнейшим эффектом, роль которого пока еще не полностью ясна. Мы рассмотрим родственный эффект удаленного стимулирования сценариев КЭД, и проиллюстрируем на его примере эффективность чисто унитарной модели.

Рассмотрим простейший пример перехода между уровнями в одной полости, индуцированного фотонами, приходящими из аналогичных систем в окружении. Основой будет конфигурация, изображенная на рисунке ??, где мы рассматриваем трансфер фотонов из полостей $1, 2, \dots, n$ в полость 0. Начальное состояние выберем вида $|0, 1, 1, \dots, 1\rangle$, где нумерация полостей начинается с нуля. Унитарная осцилляция при постоянном гамильтониане Джеймса Каммингса Хаббарда для системы полостей в левой части рисунка ?? ведет к чередованию состояний $|0, 1, 1, \dots, 1\rangle \leftrightarrow |n, 0, 0, \dots, 0\rangle$. Таким образом, фотоны, покидающие полости $1, 2, \dots, n$ все оказываются в полости 0. Если разместить в полостях по одному атому так что переход, индуцированный фотоном данной моды происходит в полости 0 гораздо медленнее чем в остальных полостях, то этот переход может существенно ускориться из-за наличия многих фотонов в полости 0.

Разобьем переход $|0, 1, 1, \dots, 1\rangle \leftrightarrow |n, 0, 0, \dots, 0\rangle$ на 2 участка с одинаковой продолжительностью. 1 переход $|0, 1, 1, \dots, 1\rangle \rightarrow |n, 0, 0, \dots, 0\rangle$ будет соответствовать наполнению полости ноль, а 2 переход $|0, 1, 1, \dots, 1\rangle \leftarrow |n, 0, 0, \dots, 0\rangle$ будет соответ-

ствовать стоку фотонов в полость sink. Последний процесс можно отождествить с вылетом фотонов из полости 0 в окружающее пространство. На этом сценарии завершается . Наличие фотонов моды резонаторов начиная с 1 усиливает соответствующий переход так что он начинает превалировать перед собственным переходом в полости ноль - ?? внизу. Это и есть удаленный трансфер динамики .

Возможно также присутствие в целевой локации нескольких 3 уровневых систем как показано внизу рисунка ?? . В этом случае при симметричных характеристиках однотипных систем целесообразно использовать новый базис, состоящие из взвешенных состояний однотипных систем, как показано в книге Ожигова. Наконец, можно рассмотреть удаленную индукцию динамических сценариев на много уровневых системах. Такой эффект применим, например, в описании процесса образования кристаллов льда. Здесь каждый уровень соответствует определенному частичному кристаллу, так что в большой массе молекул воды будет происходить удаленная индукция динамических сценариев совершенно определенного вида приводящая к однотипным кристаллам льда.

Вот какие вычислительные задачи в связи с этим возникают .

- 1 . Что будет если начинать не с состояния $|0, 1, 1, \dots, 1\rangle$ а с состояния $|1, 1, 1, \dots, 1\rangle$.
2. что будет если полости 1,2 и так далее также связано волноводами .
- 3 . Произвести полный расчет трансфера динамики с учетом подавления основного перехода в нулевой полости индуцированным переходом из полостей 1,2,...
4. Распространить схему трансфера динамики на многоуровневые системы . В частности , произвести расчеты для образования нано снежинок в воде и синтеза днк .

Численные характеристикой удаленной стимуляции является вероятность попадания фотонов в sink A по сравнению с sink B . При отсутствии полостей справа (их можно назвать стимулирующими полостями) наполнение sink B преобладает. Присутствие стимулирующих полостей создает преимущество наполнение sing A . Этот эффект мы назовем удаленным стимулированием .

Что нужно вычислить с помощью моделирования на компьютере

1. Установить эффект удаленного стимулирования.
2. Выявить зависимость эффекта удаленного стимулирования от числа стимулирующих полостей.
3. Выяснить зависимость эффекта удаленного стимулирования от структуры связей полостей волноводами.
4. Установить эффект удаленного стимулирования для многоуровневых систем , в частности , для систем из 6 уровней , которые имитируют нано снежинку .

4 Удалённое стимулирование коллективных сценариев

Рассмотрим сетку из волноводов соединяющих полости находящиеся вершина целочисленной сетки . Рассмотрим систему полостей близких состоящих из 7 полостей - одна в центре и 6 по бокам; пусть также аналогичная система имеется на некотором расстоянии . Наша цель состоит в том , чтобы перенести коллективная сценарий из 1 системы во 2 систему.

В полостях из 1 системы мы разместим по одному фотону которые будут стимулировать наименее вероятный переход в лямбда системе атома. В полостях из 2 системы мы разместим по одному атому данного типа. Подобно тому что было в предыдущем параграфе . Задача состоит в том , чтобы найти насколько повышается вероятность априори слабого перехода в результате прилета фотонов из 1 системы (см. рисуное ??). Здесь можно использовать базисное состояние из системы коллективных осцилляций (смотри книгу). Специфика задачи состоит в огромном числе базисных состояний возникающим из-за пространственного удаления 1 и 2 системы . При моделировании надо будет использовать метод отбора рабочей области . Это очень хорошая модельная задачи на метод отбора .

Список литературы

- [1] Alexander Kolar, Allen Zang, Joaquin Chung, Martin Suchara, Rajkumar Kettimuthu, Adaptive, Continuous Entanglement Generation for Quantum Networks, IEEE INFOCOM 2022-IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), pp. 1-6. IEEE, 2022.
- [2] Guillermo F. Peñas, Ricardo Puebla, Tomás Ramos, Peter Rabl, Juan José García-Ripoll, Universal deterministic quantum operations in microwave quantum links, PhysRevApplied.17.054038 (2022).
- [3] G. D. de Moraes Neto, F. M. Andrade, V. Montenegro, S. Bose, Quantum state transfer in optomechanical arrays, Phys. Rev. A 93, 062339 (2016).
- [4] E. T. Jaynes, F. W. Cummings, “Comparison of quantum and semiclassical radiation theories with application to the beam maser”, Proc. IEEE, 51:1 (1963), 89–109.
- [5] M. Th. Tavis, A Study of an N Molecule Quantized-Radiation-Field Hamiltonian, Dissertation, arXiv: 1206.0078.
- [6] Hannah McAleese, Mauro Paternostro, Critical assessment of information back-flow in measurement-free teleportation, Entropy 26, 780 (2024).

- [7] Charles H. Bennett, Gilles Brassard, Sandu Popescu, Benjamin Schumacher, John A. Smolin, William K. Wootters, Purification of Noisy Entanglement and Faithful Teleportation via Noisy Channels, *Phys.Rev.Lett.* 76:722-725, 1996.
- [8] Gilles Brassard, Teleportation as a quantum computation, *Physica D* 120 (1998) 43-47.
- [9] Alexander Streltsov, Swapan Rana, Manabendra Nath Bera, Maciej Lewenstein, Towards resource theory of coherence in distributed scenarios, *Phys. Rev. X* 7, 011024 (2017).
- [10] Cowan, M.L., Bruner, B.D., Huse, N., Dwyer, J.R., Chugh, B., Nibbering, E.T., Elsaesser, T., Miller, R.J. 2005. Ultrafast memory loss and energy redistribution in the hydrogen bond network of liquid H₂O. *Nature* 434, 199–202.
- [11] Montagnier, L., Aïssa, J., Ferris, S. et al. Electromagnetic signals are produced by aqueous nanostructures derived from bacterial DNA sequences. *Interdiscip Sci Comput Life Sci* 1, 81–90 (2009). <https://doi.org/10.1007/s12539-009-0036-7>
- [12] Andy Coghlan, Scorn over claim of teleported DNA, *Newscientist*, Phys & Math, 12 January 2011, 2795
- [13] Zhen Feng, Zhen-Wei Gao, Lian-Ao Wu, Hao Tang, Ke Sun, Cheng-Qiu Hu, Yao Wang, Zhan-Ming Li, Xiao-Wei Wang, Yuan Chen, En-Ze Zhang, Zhi-Qiang Jiao, Xiao-Yun Xu, Jun Gao, Ai-Lin Yang, Xian-Min Jin, Photonic Newton's Cradle for Remote Energy Transport, *Phys. Rev. Applied* 11, 044009 (2019).
- [14] Ignacio Gustin, Chang Woo Kim, David W. McCamant, Ignacio Franco, Mapping Electronic Decoherence Pathways in Molecules, *PNAS*. 120, e2309987120 (2023).
- [15] Onur Pusuluk, Gokhan Torun, Cemsinan Deliduman, Quantum entanglement shared in hydrogen bonds and its usage as a resource in molecular recognition, *Modern Physics Letters B* 32, 1850308 (2018).
- [16] Cesare Tronci, David Martínez-Crespo, François Gay-Balmaz, Entropy functionals and equilibrium states in mixed quantum-classical dynamics, *arXiv:2501.18587*
- [17] Dhruvil Patel, Mark M. Wilde, Wave Matrix Lindbladization I: Quantum Programs for Simulating Markovian Dynamics, *Open Systems & Information Dynamics*, Vol. 30, No. 02, page 2350010 (June 2023) Related DOI: <https://doi.org/10.1142/S1230161223500105>

- [18] Кадоваки, Т.; Нисимори, Х. (1998). "Квантовый отжиг в поперечной модели Изинга". Phys. Rev. E. 58 (5): 5355. arXiv:конд-мат /9804280. Bibcode:1998PhRvE..58.5355K. doi:10.1103/PhysRevE.58.5355. S2CID 36114913
- [19] Аполлони, Бруно; Карвалью, Мария К.; Де Фалько, Диего (1989). "Квантовая стохастическая оптимизация". Stoc. Проц. Приложение. 33 (2): 233–244. doi:10.1016/0304-4149(89)90040-9