

Отзыв официального оппонента

на диссертационную работу

Киктенко Евгения Олеговича

*"Роль энтропийной асимметрии в двусоставных квантовых состояниях",
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-*

математических наук по специальности

01.04.02 - теоретическая физика

Развитие квантовой физики в конце XX века привело к появлению новых технологий, основанных на использовании явлений, присущих исключительно квантовым системам, таких как квантовая запутанность, суперпозиции и корреляции. К настоящему времени эти технологии стало принято называть квантовыми технологиями, а изучением закономерностей, которым подчиняются квантовые системы при использовании их в квантовых технологиях, занимается физика квантовой информации. Есть основания полагать, что в XXI веке развитие этих направлений может привести к новой научно-технической революции.

Одной из основных трудностей на пути конструирования соответствующих устройств является плохо контролируемая связь квантовых систем с окружением, приводящая к декогеренции. Это обстоятельство осложняется тем фактом, что квантовые системы, представляющие интерес для приложений, являются составными, так что разные их степени свободы могут по-разному связываться с окружением. Таким образом, практическая значимость представленного автором исследования энтропии квантовых составных систем, взаимодействующих с окружением, не вызывает сомнений.

Ключевую роль в приложениях играют квантовые корреляции и квантовая запутанность, для характеристики которых можно использовать различные величины. Большинство мер квантовых корреляций являются симметричными (за исключением квантового дискорда, использование которого затруднительно). В диссертации Е. О. Киктенко развивается альтернативный подход, основанный на обобщении классического причинного анализа. Поэтому важность диссертационной работы Е. О. Киктенко не ограничивается теми физическими системами и ситуациями, которые в ней непосредственно рассмотрены.

Таким образом, актуальность и своевременность работы не вызывают сомнений.

Основное содержание диссертации изложено во введении, четырех главах и заключении. Во введении представлен краткий литературный обзор по проблеме, а также сформулированы цели и задачи работы, обоснована научная новизна, основные положения, выносимые на защиту и т.д.

В первой главе вводится понятие энтропийной асимметрии, являющейся центральным понятием диссертации. Сначала приводятся основные принципы, лежащие в основе классического причинного анализа, а затем этот анализ распространяется на двусоставные квантовые состояния. Вводится направление энтропийной асимметрии для таких состояний, а также соответствующие меры.

Во второй главе изучается вопрос о связи между разрушением корреляций и энтропийной асимметрии в различных состояниях двух и трех кубитов. Сначала вводятся три основных однокубитных канала декогеренции - дефазирующий, деполаризующий и демпфирующий. Далее рассматривается задача о декогеренции одного из кубитов двухкубитного состояния посредством прохождения через данные каналы. Выявлено возникновение энтропийной асимметрии и раскрыты основные закономерности ее появления. Затем в этой главе рассматривается система двух кубитов, находящаяся в так называемом квантово-классическом состоянии. Рассматривается поочередное прохождение кубитов через деполаризующий и демпфирующий каналы и проводится сопоставление между поведением квантовой согласованности и энтропийной асимметрии. Выявлено объяснение "аномального разрушения запутанности". Далее выявляется связь между исходной энтропийной асимметрией и разрушением корреляций в произвольных смешанных двухкубитных состояниях различных рангов. После этого автор переходит к рассмотрению чистого трехкубитного WRr состояния при прохождении одного из кубитов через один из трех квантовых каналов. В этом анализе определено поведение энтропийной асимметрии и выявлена ее связь с разрушением корреляций.

В третьей главе исследуются конкретные физические системы с взаимодействием и поведению энтропийной асимметрии в них. Сначала рассматривается случай XY-модели Гейзенберга для взаимодействующих частиц со спином $1/2$ в неоднородном магнитном поле. Установлено соотношение между энтропийной асимметрией, асимметрией квантового дискорда и локально передаваемой

информацией в зависимости от температуры и магнитного поля (в состоянии термального равновесия). Далее рассматривается взаимодействие двухуровневого атома с одномодовой полостью в рамках хорошо известной модели Джейнса-Каммингса. Несмотря на известность этой модели, автору удалось получить новые результаты, что обусловлено оригинальностью проведенного им анализа. Для атома, изначально находившегося в основном или возбужденном состояниях, и моды поля, исходно бывшего в термальном равновесии, энтропийная асимметрия превалирующим образом направлена от моды поля к атому. При резонансном характере взаимодействия стационарное состояние оказывается запутанным.

В четвертой главе исследуется энтропийная асимметрия в рамках томографического подхода к описанию квантовых систем. Сначала вводится понятие томограммы двусоставного состояния, а также понятия томографических энтропий как энтропий Шеннона, полученных из томограмм. Далее вводятся томографическая взаимная информация, мера томографической энтропийной асимметрии и понятие томографического дискорда. Затем исследован вопрос о связи между величиной исходной энтропийной асимметрии и величинами томографической энтропийной асимметрии, выявлены определенные закономерности. В дальнейшем рассматривается случай конкретной физической системы - двух сверхпроводящих контуров, связанных индуктивно друг с другом и находящихся в термальном равновесии. Построено двухкубитное состояние в низкотемпературном пределе и демонстрируется, что это состояние относится к X-типу. Показано, что направление энтропийной асимметрии совпадает с направлением асимметрии дискордов. Наконец, рассматривается возможность реализации двусоставных состояний в четырех и пятиуровневом нелинейном колебательном контуре. Разработан способ реализации произвольных двухкубитных операций группы U_4 на основе операций группы SU_5 и использования дополнительного незаселенного уровня. Продемонстрировано построение алгоритма Дойча на пятиуровневой системе.

Достоверность сделанных в диссертации выводов не вызывает сомнений. Диссертант использовал надежные и хорошо подходящие для решения поставленных задач теоретические методы, адекватно комбинировал их, развил и дополнил известные представления. Построенные модели подтверждаются произведенным анализом на

качественном уровне, сравнением с результатами аналитических моделей и сопоставлением с асимптотическими зависимостями.

По результатам диссертации опубликовано большое число работ, включая статью в *Physical Review A* и три статьи в *Physics Letters A*. Результаты представлялись на международных и всероссийских конференциях и докладывались на научных семинарах. Всё это также может служить подтверждению адекватности примененных подходов и правильности выводов. Научная и практическая ценности диссертации несомненны, поскольку полученные результаты важны для понимания и контроля деструктивного воздействия окружающей среды на составные квантовые системы. Развитые в диссертации подходы имеют самостоятельную научную ценность и должны послужить основой для построения более совершенных моделей и научных понятий.

Тем не менее, диссертация Е. О. Киктенко не лишена некоторых недостатков, по которым можно сделать следующие замечания:

1. В диссертации рассматривается большое число разных квантовых состояний и несколько физических систем, но при этом ей явно не хватает некоторых обобщающих выводов; материал остается несколько разрозненным. Кроме того, не слишком ясно, чем вызван интерес именно к тем физическим реализациям, которые рассмотрены в диссертации. Насколько общими являются закономерности, выявленные для этих систем?
2. Рассмотренный в диссертации круг явлений, несомненно, имеет отношение к квантовым технологиям. Несмотря на декларируемую важность для практики концепций автора и проведенного им анализа, никаких конкретных выводов и предложений приведено, к сожалению, не было.
3. В диссертации было бы уместно затронуть вопрос об обоснованности и возможных ограничениях метода генерации состояний случайным образом. Есть ли такие ограничения и каким физическим состояниям или процессам соответствует подобная случайная выборка?
4. В главе 2 рассматриваются двух- и трехкубитные состояния. Ничего не сказано о состояниях с большим числом кубитов. Можно ли сформулировать какие-то обобщения?

5. В диссертации при рассмотрении атома, взаимодействующего с полостью, в гамильтониане отбрасываются слагаемые, не сохраняющие числа возбуждений. Данное приближение оправдано в резонансном случае, однако в работе рассматривается и область параметров, когда реализуется нерезонансный режим. Кроме того, в современных искусственных квантовых системах, таких как сверхпроводниковые кубиты, взаимодействующие с микроволновым излучением, можно добиться сильной связи между кубитом и модами полости. В таких случаях нерезонансными слагаемыми пренебречь нельзя даже в непосредственной близости к резонансу. Как изменятся выводы автора в этом случае? Влияет ли каким-либо образом на вклад таких процессов ненулевая температура?

6. В главе 3 делается вывод о реализации запутанного состояния, которое является классически коррелированным в энтропийном смысле. Известно, что запутанность присуща лишь квантовым системам. Было бы уместно пояснить на качественном уровне, каким образом выводы о классических корреляциях согласуются с выводами о запутанности, а также почему запутанность выживает в случае бесконечной температуры поля?

7. В главе 4 было бы уместно описать, что такое X-состояния.

8. Диссертация написана хорошим научным языком, что является несомненным достоинством, однако текст в некоторых разделах содержит заметное число пунктуационных ошибок и опечаток.

Высказанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертации, выполненной на высоком научном уровне, и носят больше характер рекомендаций. Научные выводы диссертации хорошо обоснованы и аргументированы. Диссертационная работа Е. О. Киктенко является научно-квалификационной работой, содержащей решение двух фундаментальных задач: 1) о роли энтропийной асимметрии в двусоставных квантовых состояниях; 2) о реализации кубитных операций и квантовых алгоритмов в неделимых многоуровневых системах. Рассмотренные в диссертации задачи носят и фундаментальный, и прикладной характер, а их решение имеет существенное значение для понимания процессов декогеренции в составных квантовых системах и для реализации прототипов квантовых процессоров.

Результаты работы могут быть рекомендованы к использованию в организациях, проводящих исследования в области квантовых технологий (Московский государственный университет, Российский квантовый центр, Московский институт стали и сплавов, Институт спектроскопии РАН, Казанский квантовый центр, Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Московский физико-технический институт, Сколковский институт науки и технологий, Санкт-Петербургский университет информационных технологий, механики и оптики, Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН и т.д.).

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации. Диссертационная работа соответствует всем требованиям, предъявляемым ВАК России к кандидатским диссертациям, а ее автор, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 - теоретическая физика.

доктор физ.-мат.наук

начальник лаборатории физики микро- и наноструктур
(подразделение № 176)

Федерального государственного унитарного предприятия

"Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова"

г. Москва, 127055

ул. Сушевская, д. 22

тел.: (499) 978-78-03; e-mail: pogosov@yandex.ru

Погосов Вальтер Валентинович

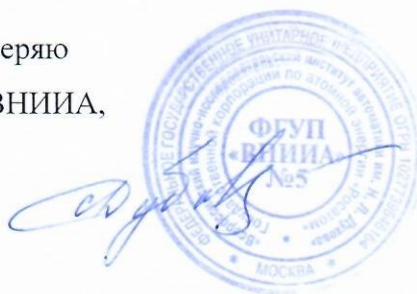
25 сентября 2017 г.

Подпись В.В. Погосова заверяю

Ученый секретарь ФГУП ВНИИА,

Кандидат техн. наук

Дубовик С. И.



Список основных научных публикаций начальника лаборатории физики микро- и наноструктур Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова», доктора физико-математических наук Погосова Вальтера Валентиновича по теме диссертации Киктенко Евгения Олеговича «Роль энтропийной асимметрии в двусоставных квантовых состояниях», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 «теоретическая физика»

- 1) A. Zhukov, D. S. Shapiro, S. V. Remizov, W. V. Pogosov, Yu. E. Lozovik *Superconducting qubit in a nonstationary transmission line cavity: parametric excitation, periodic pumping, and energy dissipation* Physics Letters A, Vol. 381, Is. 6, P. 592-596 (2017)
- 2) A. Zhukov, D. S. Shapiro, W. V. Pogosov, Yu. E. Lozovik *Dynamical Lamb effect versus dissipation in superconducting quantum circuits* Physical Review A, Vol. 93, P. 063845 (2016)
- 3) D. S. Shapiro, A. A. Zhukov, W. V. Pogosov, Yu. E. Lozovik *Dynamical Lamb Effect in a Tunable Superconducting Qubit-Cavity System* Physical Review A, Vol. 91, P. 063814 (2015)
- 4) L. V. Bork, W. V. Pogosov *Particle-hole duality, integrability, and Russian doll BCS model* Nuclear Physics B Vol. 897 P. 405 (2015)
- 5) W. V. Pogosov *Applicability of Bardeen-Cooper-Schrieffer theory to small-sized superconductors: role of Cooper-pair binding energy* Solid State Communications Vol. 207, P. 1 (2015)
- 6) W. V. Pogosov, N. S. Lin, V. R. Misko *Electron-hole symmetry and solutions of Richardson pairing model* Eur. Phys. J. B Vol. 86, P. 235 (2013)
- 7) W. V. Pogosov *Excited states in Richardson pairing model: 'probabilistic' approach* Prog. Theor. Phys. Vol. 128, P. 1 (2012)