

ОТЗЫВ

Члена диссертационного совета на диссертацию
Королева Сергея Борисовича
на тему «**Многочастичные перепутанные состояния света для
однонаправленных квантовых вычислений**»
представленную на соискание учёной степени кандидата физико-
математических наук по специальности 01.04.05 – оптика.

На сегодняшний день многие страны мира пытаются создать работающий прототип квантового компьютера. Такой большой интерес связан в первую очередь с тем, что данное устройство способно решать множество прикладных и фундаментальных задач, неподдающихся даже самым мощным суперкомпьютерам. Диссертация Королева Сергея Борисовича посвящена созданию квантового компьютера, работающего на принципе однонаправленных вычислений. Используя однонаправленные квантовые вычисления, можно выполнять любые унитарные эволюции начальных квантовых состояний. Это означает, что с помощью таких вычислений можно реализовать любые квантовые алгоритмы, а также симулировать любую другую квантовую систему. Из всего вышеперечисленного следует, что работа Королева С. Б. безусловно **актуальна**.

Работа Королева Сергея начинается с введения, в котором дается мотивировка выбора темы диссертационного исследования. Введение содержит наглядное обоснование актуальности выполненной работы, научной значимости и новизны.

В первой главе диссертации описывается класс задач, которые из-за своей сложности могут быть решены лишь на квантовом компьютере. Далее Королев С. Б. проводит обзор существующих моделей квантовых вычислений, в том числе модели однонаправленных квантовых вычислений. Обзор последней начинается со случая дискретных переменных, в которых эта модель была предложена первоначально, а затем автор переходит к модели в непрерывных переменных. Также в обзоре литературы присутствует раздел, посвященный построению стабилизирующих кодов в квантовой теории коррекции ошибок. Из представленных в обзоре данных ясно, что выбор конфигураций кластерных состояний влияет на реализуемость однонаправленных вычислений и на коррекцию ошибок в них. По этой причине поиск оптимальных конфигураций является актуальной и интересной задачей.

Во второй главе автор задается вопросом исследования минимального сжатия физических квантовых осцилляторов, необходимого для генерации кластерных состояний. Результатом данной главы является теория построения кластерных состояний различных конфигураций на основании имеющегося физического ресурса. Кроме этого в данной главе автор доказывает существование наглядной оценки для величины сжатия каждого исходного квантового осциллятора, используемого при генерации кластерного состояния заданной конфигурации. Важным следствием данной теории является возможность оценки максимального числа связей у соседних узлов кластерного состояния. Другими словами, в данной главе получено два результата. С одной стороны, получена оценка требований, накладываемых на квантовые осцилляторы, используемые для генерации кластера определенной конфигурации, а с другой — оценка конфигурации кластера на основании имеющихся физических ресурсов.

Следующие главы диссертации Королева С. Б. посвящены непосредственно поиску оптимальных конфигураций кластерных состояний. В двух последних главах Королев С. Б. задается вопросом о том, какое кластерное состояние лучше всего использовать для реализации универсальных гауссовых преобразований. Для ответа на этот вопрос в третьей главе автор исследовал связь между результатом однонаправленных квантовых вычислений и конфигурацией используемого кластерного состояния. Как результат Королев С. Б. доказал, что для реализации универсальных однонаправленных вычислений необходимо использовать



кластерное состояние не менее чем с четырьмя узлами. Более того, автор продемонстрировал, что из всего разнообразия четырехузловых конфигураций кластерных состояний, только пять пригодны для универсальных квантовых вычислений. Помимо этого Королевым С. Б. были найдены также конфигурации, которые не применимы для универсальных вычислений. Таким образом, в третьей главе была построена максимально общая теория, связывающая произвольное квантовое преобразование с конфигурацией кластерного состояния, с помощью которого это преобразование может быть реализовано.

В заключительной главе диссертации проводится исследование ошибок в однонаправленных вычислениях, выполненных на физических системах в непрерывных переменных. Автор продемонстрировал, что с увеличением числа узлов в кластерном состоянии ошибка однонаправленных вычислений будет увеличиваться. Учитывая это, Королев С. Б. показал, что для универсальных однонаправленных квантовых вычислений лучше использовать кластерные состояния с четырьмя узлами (с минимальным числом узлов). Далее, пытаясь уменьшить имеющуюся ошибку вычислений, автор вышел за рамки традиционного подхода однонаправленных вычислений, в котором все преобразования реализуются лишь на одном кластерном состоянии. В результате автором была найдена стратегия реализации универсальных квантовых преобразований, основанная на вычислениях на двухузловых кластерных состояниях, дополненных устройствами типа фазовращателей. В работе было наглядно продемонстрировано, что такие вычисления сопровождаются наименьшей ошибкой.

Переходя к оценке диссертационной работы С. Б. Королева в целом, можно отметить следующие достоинства. Автором выполнено большое цельное исследование однонаправленных квантовых вычислений на непрерывных переменных. Предложена теория, позволяющая оценивать возможность реализации однонаправленных вычислений на основании имеющихся ресурсов. Выявлена оптимальная стратегия выполнения универсальных вычислений, гарантирующая минимальные ошибки. Несомненно полученные результаты являются значимыми с теоретической и практической точек зрения.

Несмотря на несомненные достоинства работы по тексту диссертации можно сделать ряд замечаний.

- 1) В гл. 2 автор ограничивает постановку задачи – вполне legitimately – выбором одинаковых исходных квантовых осцилляторов для генерации кластеров (чтобы получить универсальные аналитические выражения). Полученные результаты безусловно нужны и важны, автор разработал элегантные критерии применимые для многих задач квантовых вычислений. Однако хотелось бы увидеть хотя бы неполное обсуждение более широкого контекста: насколько оптимальным или далеким от оптимального является выбор *одинаковых* осцилляторов? Скорей всего строгий анализ оптимальности представляет собой задачу выходящую далеко за рамки диссертационной работы. Но можно ли сделать какие-то предположения? Что на эту тему существует в литературе? Можно ли ожидать, что использование осцилляторов с разным сжатием, в особенности с сжатием в разных (ортогональных) квадратурах даст преимущество? На какие аспекты работы с кластерными состояниями это может повлиять?
- 2) В гл. 3 автор ищет конфигурации кластерных состояний, позволяющие выполнять универсальный набор гауссовых преобразований. Однако известно, что для создание истинно универсального процессора на непрерывных переменных необходимо выйти за рамки либо гауссовых преобразований, либо гауссовых состояний исходных мод. Это никоим образом не принижает достоинство работы и квантовые процессоры выполняющий универсальные гауссовы операции безусловно необходим, но некое обсуждение темы универсальности необходимо. Оно в случае непрерывных переменных нетривиально.

- 3) Крайне интересен результат полученный в гл. 4: о минимизации ошибок, связанных с конечным сжатием, при использовании кластеров дополненных линейными элементами, конкретно рассмотрены фазовращатели. Интересно сравнить такую схему с моделью эквивалентной однонаправленным вычислениям, квантовыми вычислениями на вспомогательных модах (Ancilla-driven quantum computation). Использование фазового преобразователя напоминает возможную в ADQC коррекцию ошибок за счет подстройки фазы измеряемых квадратур (выбирая базис для измерения). Если автор знаком с работами [J. Anders, D. Oi, E. Kashefi, D. Browne, E. Andersson: Ancilla-driven universal quantum computation. Phys. Rev. A 82, 1 (2010)], [T. Proctor, M. Giulian, N. Korolkova, E. Andersson, V. Kendon: Ancilla-driven quantum computation for qudits and continuous variables, Phys. Rev. A 95, 052317 (2017)], было бы интересно обсудить можно ли объяснить минимизацию ошибок в разработанной схеме физическим механизмом сходным с ADQC моделью.

Сделанные замечания не умаляют значения и не снижают общей высокой оценки работы. Диссертационная работа Королева Сергея Борисовича «Многочастичные перепутанные состояния света для однонаправленных квантовых вычислений», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, является завершённой научно-квалификационной работой. Основные результаты опубликованы в открытой печати и доложены на выступлениях на российских и международных конференциях.

На основании вышеизложенного, я считаю, что представленная диссертационная работа удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 01.09.2016 № 6821/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Королев Сергей Борисович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 — Оптика. Пункт 11 указанного Порядка диссертантом не нарушен.

Отзыв составила



Профессор факультета Физики и Астрономии Университета Сент-Эндрюс

Dr. habil. Королькова Наталья Владимировна

01 сентября 2020, г. Сент-Эндрюс