

## ОТЗЫВ

члена диссертационного совета на диссертацию Зинатуллина Эдуарда Рустемовича на тему: «Негауссова статистика полей в задачах квантовой оптики», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.3.6. Оптика

Большинство концепций квантовых вычислений изначально были разработаны для дискретных квантовых переменных, в частности, для бинарных квантовых переменных (квантовых битов или кубитов). Однако в последнее время значительное внимание уделяется использованию непрерывных квантовых переменных, поскольку они обладают своими преимуществами по сравнению с дискретными аналогами. Было показано, что переменные с непрерывным спектром, такие как амплитуда электромагнитного поля, полезны для выполнения квантовой телепортации, квантовой коррекции ошибок и квантовых вычислений. Также были предложены квантовые криптографические схемы, основанные на непрерывных переменных.

Диссертационная работа Зинатуллина Эдуарда Рустемовича посвящена изучению возможности снижения ошибок в однонаправленных квантовых вычислениях на непрерывных переменных за счет использования негауссовых состояний. Основной ресурс в этой модели вычислений, кластерные состояния, создаются из набора оптических мод поля, находящихся в сжатых состояниях. В идеальном случае бесконечно большого сжатия вычисления проходят без ошибок. На практике такая ситуация недостижима. Конечная величина степени сжатия мод поля приводит к ошибкам, задача снижения уровня которых является актуальной для квантовых вычислений как в дискретных, так и непрерывных переменных.

Диссертацию условно представима в виде двух частей. В первой исследуются возможные методы уменьшения ошибок в протоколе квантовой телепортации в непрерывных переменных. Автор показывает, что использование взвешенного преобразования CZ в качестве перепутывающей операции позволяет снизить ошибку телепортации по сравнению с протоколом со светоделителями. Он также предлагает схему телепортации, в которой снижение уровня ошибок достигается за счет использования

детерминированной негауссовой операции – кубического фазового затвора. Рассматривая процесс однонаправленных квантовых вычислений как своего рода телепортацию, при которой за счет выбора базиса измерений происходит контролируемое преобразование входного состояния, автор обоснованно переносит выявленные особенности процесса телепортации на процесс квантовых вычислений. Проводя сравнение качества телепортации для двух негауссовых операций, кубического фазового затвора и вычитания фотонов, автор делает вывод о преимуществе кубического фазового затвора.

Методы, разработанные в первой части диссертации, используются во второй для задачи снижения уровня ошибок в квантовых вычислениях с гауссовыми преобразованиями. Автором показано, что подбор весовых коэффициентов кластерного состояния позволяет уменьшить ошибки выполнения произвольных одномодовых гауссовых операций. При этом отмечено, что равномерное увеличение весовых коэффициентов не является эффективной стратегией в задаче уменьшения ошибок вычислений. Автором предложен оптимизированный подбор весовых коэффициентов. Другой метод снижения уровня ошибок, рассмотренный в диссертации, состоит в использовании в качестве узлов кластера негауссовых состояний, создаваемых с помощью кубического затвора. Показано, что их использование позволяет уменьшать ошибки как произвольных одномодовых гауссовых операций, так и двухмодовой перепутывающей гауссовой операции CZ. Совместное использование этих методов позволит существенно снизить ошибки выполнения гауссовых операций и реализовать отказоустойчивые вычисления в рамках достижимых экспериментальных параметров. С учетом того, что кубический фазовый затвор вместе с набором произвольных гауссовых состояний образуют универсальный набор операций для квантовых вычислений на непрерывных переменных, автор показал, что использование одной негауссовой операции, кубического фазового затвора, позволяет одновременно снизить ошибки гауссовых операций и обеспечить универсальность вычислений.

Диссертационная работа Зинатуллин Эдуарда Рустемовича «Негауссова статистика полей в задачах квантовой оптики», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, является завершенной научно-квалификационной работой. В диссертации использован широкий спектр теоретических методов, по материалам выполненной работы и полученным результатам опубликовано пять статей в ведущих печатных изданиях. Кроме того, основные результаты диссертации докладывались на международных и российских конференциях и научных школах.

Отмечу несколько замечаний по тексту диссертации.

Материал, представленный в разделах 2.1.2 и 2.1.3 диссертации, имеет прямое отношение к результатам нашей работы PRA 61, 032304 (2000). То, что в диссертации названо преобразованием CZ (контролируемое Z), в статье PRA 61, 032304 (2000) используется под названием QND. Уравнения (2.16), (2.17) диссертации - это наши уравнения (1) и (2) с точностью до замены квадратур во втором поле. В нашей статье рассмотрено QND взаимодействие вспомогательных полей и последующее смешение одного из них с сигналом на асимметричном делителе с коэффициентом пропускания  $\epsilon$ .

В разделе 2.1.2 диссертации рассмотрено взаимодействие вспомогательных полей на основе CZ (=QND) и последующее смешение одного из них с сигналом на основе второго CZ, что можно понимать как развитие идеи статьи PRA 61, 032304 (2000).

В следующем разделе 2.1.3 диссертации рассмотрено взаимодействие вспомогательных полей на основе CZ (=QND) и последующее смешение одного из них с сигналом на основе симметричного светоделителя, что является частным случаем нашего метода с  $\epsilon=0.5$ . Выводы этого раздела имеют ограниченный характер, поскольку основаны на рассмотрении симметричного делителя. Как следует из результатов работы PRA 61, 032304 (2000), асимметричный светоделитель приводит к идеальной телепортации при сколь угодно большом коэффициенте параметрического усиления.

Ни в диссертации, ни в работе [107] ссылок на работу PRA 61, 032304 (2000) нет. По-видимому, о нашей статье автор не знал, так как существенную особенность метода - асимметрию светоделителя - он не использовал в своем анализе.

По тексту диссертации имеются опечатки и терминологические неточности. Например, используемое на стр.8 сочетание «...опубликованы в *ревьюируемых* научных журналах». На стр. 12 делается правильное утверждение: «... перепутанное состояние в непрерывных переменных может быть эффективно получено с помощью средств линейной оптики и сжатого света, генерируемого за счет нелинейного оптического взаимодействия». Но следующая за ней фраза: «Основные протоколы обработки квантовой информации, включая квантовую телепортацию [9,10], криптографию [21] и клонирование [22–25], также реализуются средствами линейной оптики» не является корректной. Протоколы телепортации, квантового распределения ключа и квантового клонирования основаны на использовании неклассических состояний поля, которые можно сгенерировать только с помощью нелинейных преобразований.

С учетом всего вышесказанного полагаю:

Содержание диссертации Зинатуллин Эдуарда Рустемовича на тему: «Негауссова статистика полей в задачах квантовой оптики» соответствует специальности 1.3.6. Оптика;

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, имеющей значение для развития соответствующей отрасли знаний.

Нарушений пунктов 9, 11 Порядка присуждения Санкт-Петербургским государственным университетом ученой степени кандидата наук, ученой степени кандидата наук соискателем ученой степени мною не установлено.

Диссертация соответствует критериям, которым должны отвечать диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, установленным приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете» и рекомендована к защите в СПбГУ.

Член диссертационного совета,

д. ф.-м. н., профессор, академик НАНБ, заведующий Центром квантовой оптики и квантовой информатики института физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси

11.03.2024г.

Кишин Сергей Яковлевич



The image shows a blue circular official stamp of the National Academy of Sciences of Belarus (НАН Беларуси) with the text "ЦЕНТР КАДРАУ" (Center for HR) in the center. Below it is a blue rectangular stamp from the "Політэхнічны Інстытут фізікі Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі" (Polytechnical Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus) with the text "ЗАСВЕДЧВАЕЦА" (Certificate). A blue ink signature is written over the stamps.