

ОТЗЫВ

официального оппонента

доктора физико-математических наук,

профессора РАН ПЕЧЕНЯ Александра Николаевича
на диссертацию МИХАЛЫЧЕВА Александра Борисовича

«Квантовые измерения для метрологии и создания неклассических состояний»,
представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических
наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика

1. Соответствие диссертации специальностям и отрасли науки, по которым она представлена к защите.

Диссертация посвящена развитию теории квантовых измерений и их применению для управления квантово-оптическими состояниями, получения и обработки информации. Работа содержит как общие теоретические и методологические результаты, развивающие инструментарий квантовой оптики, так и конкретные практические рекомендации по их применению к решению прикладных задач квантовой микроскопии, квантовой обработки информации, анализу данных классических измерений. Предмет исследования, цели работы и способы их достижения полностью соответствуют отрасли физико-математических наук и пункту «Квантовая механика. Квантовая теория информации и квантовые вычисления» специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

2. Актуальность темы диссертации.

В настоящее время в связи с активным развитием современных квантовых технологий, включая создание оптических вычислительных устройств, квантовую криптографию, квантовую метрологию, возникает потребность разработки методов контролирования и использования одиночных квантовых объектов, таких как атомы, ионы, малофотонные состояния оптических полей, сверхпроводящие кубиты. Существенно квантовое поведение таких объектов определяет высокую актуальность разработки специальных методов приготовления, преобразования и измерения состояний одиночных квантовых систем. Фундаментальной особенностью квантовых систем является как правило существенное влияние измерения, проводимого над квантовым объектом, на состояние измеряемого объекта, называемое редукцией состояния. Такое свойство квантового измерения с одной стороны усложняет процесс получения информации о состоянии и приводит к необходимости разработки специальных методов квантовой томографии и метрологии, служащих данной цели. С другой стороны, редукция при квантовом измерении позволяет целенаправленно изменять состояние, то есть может являться дополнительным инструментом для управления квантовыми системами. В этой связи в работе A. Pechen, N. Il'in, F. Shuang, H. Rabitz, «Quantum control by von Neumann measurements», Phys. Rev. A 74, 052102 (2006) была введена в общем случае и решена в двухуровневом случае математическая модель использования неселективных квантовых измерений для целенаправленного управления состояниями квантовых объектов без использования обратной связи в режиме реального времени и квантового эффекта Зенона. Другим активно развивающимся направлением является использование окружения и неунитарной динамики как полезного ресурса для управления квантовыми объектами. Один из методов управления квантовыми системами с использованием некогерентного окружения, в том числе некогерентного излучения, предложен в работе A. Pechen, H. Rabitz, «Teaching the environment to control quantum systems», Phys. Rev. A, 73, 062102 (2006). В настоящее время в том числе в связи с

активным развитием экспериментальной техники исследование возможностей использования квантовых измерений и окружения для управления самыми разными квантовыми объектами, развитие теории квантовых измерений и разработка практических методов решения задач квантовой оптики, метрологии и обработки информации их основе привлекает высокий интерес. Диссертация посвящена решению ряда важных актуальных задач в области управления квантово-оптическими системами с помощью измерений и окружения, развития методов томографии и эмуляции квантовых состояний и методов квантовой микроскопии.

3. Степень новизны результатов диссертации и положений, выносимых на защиту.

В диссертации получен ряд новых научных результатов в квантовой оптике, включая задачи создания и усиления неклассических свойств квантово-оптических состояний, в том числе перепутанных, выбор оптимальной стратегии квантовых измерений для наиболее эффективного извлечения информации о неизвестном квантовом состоянии, преодоление классических пределов чувствительности при использовании квантовых состояний-зондов.

Обзорная глава 1 содержит введение в область исследований.

В главе 2 рассмотрены задачи управления с помощью квантовых измерений для моделей квантовой оптики. Построены схемы управления с использованием керровской нелинейности, обеспечивающие создание заданных неклассических квантовых состояний с помощью измерений над дополнительной квантовой системой. Введен новый класс «исключающих» измерений, позволяющий формализовать отделение характеристик измерения, необходимых для управления квантово-оптическим состоянием, от его конкретной технической реализации. На его основе разработан метод создания неклассических квантово-оптических состояний, включая перепутанные, с использованием нелинейной модуляции фазы в керровской среде, линейной оптики и детекторов, не разрешающих число фотонов. Проведен анализ влияния неидеальностей на точность создания состояний, исследовано влияние темновых отсчетов, диссипации и фазового шума.

В главе 3 исследованы методы неунитарного управления открытыми квантовыми системами для создания неклассических состояний для ряда квантово-оптических систем. Рассмотрены система диссипативно связанных нелинейных волноводов и одноатомный лазер с некогерентной накачкой. Получены важные результаты, показывающие что неунитарное преобразование квантово-оптических состояний, обусловленное взаимодействием с окружением, позволяет создавать различные неклассические состояния и обеспечивает их защиту от разрушения.

В главе 4 рассматривается задача томографии квантовых состояний. Представлен ряд математических следствий линейной связи оператора плотности квантового состояния измеряемой системы и вероятностей исходов измерений, включая адаптивный метод томографии квантового состояния и метод эмуляции результатов квантовых измерений для сложных в создании существенно квантовых состояний значительно более простыми состояниями, в том числе получена оценка дисперсии коллективной наблюдаемой при классической эмуляции, в качестве важного применения квантовых свойств однофотонных состояний построена эмуляция эффекта Хонга-У-Манделя. Разработан новый метод конструирования состояний квантовой антенны для управления локализацией излучаемых фотонов и создания квантовых корреляций, проведена оптимизация состояния антенны.

В главе 5 рассматривается квантовая микроскопия как задача восстановления амплитуды пропускания исследуемого объекта, изменение которой описывается

некоторым характеризующим объект и оптическую систему супероператором. Проведен подробный теоретико-информационный анализ многопараметрической задачи квантовой микроскопии. Введено количественное определение оптического разрешения на основе информативности получаемых изображений; предложен итеративный алгоритм извлечения информации о протяженных объектах из измеряемых корреляционных изображений, обеспечивающий линейное масштабирование времени расчета с размером объекта; предсказан и продемонстрирован на экспериментальных данных эффект повышения разрешения при наличии физических ограничений, накладываемых на параметры изучаемого объекта. Предложен алгоритм реконструкции больших многопиксельных изображений на основе метода «скользящего окна», успешно примененный к реальным экспериментальным данным, полученным в разных экспериментальных группах.

В главе 6 изложено применение разработанных методов анализа измерений к задачам классической физики. Разработаны методы повышения точности измерений и эффективного анализа данных рентгеновской дифрактометрии и масс-спектрометрии на основе использования информации Фишера, байесовской оценки вероятностей моделей и операторного описания рентгеновских оптических элементов.

Приложения содержат детали вычислений для задач вероятностного и неунитарного управления квантовыми состояниями, метода паттернов данных, матрицы информации Фишера, оценки применимости метода трассировки лучей и т.д.

4. Обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

В диссертации использованы признанные и проверенные методы описания квантовых измерений, унитарной и неунитарной динамики квантовых систем, теории открытых квантовых систем, модели квантовой оптики, инструменты математической статистики. Выбор теоретических моделей изучаемых систем корректен, обоснован и соответствует используемым в настоящее время экспериментальным технологиям. Вывод математических соотношений логичен и последователен; промежуточные выкладки приведены в приложении к диссертации, что позволяет проверить корректность расчетов и убедиться в обоснованности полученных результатов. Проведена проверка эффективности ряда методик, разработанных автором, путем их применения к экспериментальным данным. Проведено сравнение полученных теоретических предсказаний с результатами других работ для тех предельных случаев, когда такое сравнение возможно. В совокупности можно утверждать, что представленные в диссертации результаты, выводы и рекомендации достоверны и обоснованы должным образом.

5. Научная, практическая, экономическая и социальная значимость результатов диссертации, рекомендации по их использованию.

Научная значимость представленных в диссертации подходов и результатов определяется важностью разработки методов вероятностного и диссипативного управления квантовыми состояниями как для фундаментальных исследований в области квантовой теории по установлению теоретических пределов манипуляции и создания состояний для квантовых систем, так и для приложений в области активно развивающихся в настоящее время квантовых технологий, в том числе на основе квантово-оптических систем, где требуется создание заданных неклассических состояний с заданной точностью и с учетом экспериментальных неидеальностей. Высокая практическая значимость диссертации состоит в построении конкретных

методов создания неклассических, в том числе перепутанных, квантово-оптических состояний, важных для квантовой обработки информации и повышения точности измерений в квантовой метрологии; в развитии методов квантовой томографии, необходимых для тестирования и оптимизации источников малофотонных состояний оптических полей с выраженными квантовыми свойствами; в разработке эффективных подходов к повышению разрешения в квантовой микроскопии. Представленные в последней главе диссертации методы автоматизированного анализа и оптимизации классических измерений позволяют повысить степень автоматизации экспериментальных научных исследований. На общность и методологическую ценность разработанных в диссертации подходов указывает также представленное в главе 6 их обобщение на задачи оптимизации измерений и обработки данных в других областях физики: масс-спектрометрии и рентгеновской дифрактометрии.

6. Опубликованность результатов диссертации в научной печати.

Представленные в диссертации результаты отражены в 118 публикациях, среди которых 30 статей в рецензируемых научных журналах, включенных в список ВАК, и иностранных рецензируемых научных журналах, включая такие ведущие мировые научные журналы, как *npj Quantum Information*, *Physical Review A*, *Оптика и спектроскопия*, *Journal of Physics A*, *Physical Review Applied*, *Ultramicroscopy* и другие, а также 88 публикаций в сборниках материалов и тезисов конференций. Следует отметить высокий рейтинг журналов, в которых представлены публикации автора, что указывает на высокую научную значимость и мировой уровень новизны результатов.

7. Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК.

Оформление диссертации полностью соответствует требованиям ВАК. Работа характеризуется внутренним единством, отражает результаты научных исследований автора и позволяет сделать вывод о его значимом вкладе в квантовую оптику и развитие теории квантовых измерений. Тема диссертации отражает цели и специфику проведенных исследований и соответствует содержанию работы. Структура диссертации соответствует как формальным требованиям ВАК, так и логике изложения представленных материалов: работа включает одну обзорную главу и пять глав, содержащих описание оригинальных результатов автора и соответствующих пяти защищаемым положениям. Вспомогательные математические расчеты вынесены в приложение, что позволяет объединить логичное и понятное изложение в основном тексте с представлением подробных математических выкладок, обосновывающих основные результаты диссертации. Объем основного текста диссертации (без учета списка литературы, приложений, рисунков и таблиц) не превышает 200 страниц и соответствует требованиям ВАК.

Автореферат полностью соответствует диссертации и полно раскрывает ее содержание.

8. Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени, на которую он претендует.

Анализ содержания диссертационной работы, полученных результатов и представленных публикаций по теме диссертации позволяет заключить, что Михалычев Александр Борисович обладает высокой научной квалификацией и заслуживает присуждения степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

9. Замечания по диссертации

1) На стр. 78, величина точности (2.40) в теории управления квантовыми системами имеет собственное название «Uhlmann-Jozsa fidelity» (Phys. Rev. A 78, 052330 (2008), Phys. Part. Nucl., 51, 464–469 (2020)).

2) На стр. 79, утверждение «Требование высокой точности создания целевых состояний позволяет ограничиться первым исчезающим порядком малости при анализе влияния отклонения параметров анализируемых процессов от идеальных» представляется не вполне корректно сформулированным, так как первым исчезающим порядком малости позволяет ограничиться малая величина неидеальностей.

3) Было бы интересно иметь более подробное обсуждение того, насколько имеющиеся в мире экспериментальные средства позволяют создавать рассматриваемую в диссертационной работе керровскую нелинейность.

Данные замечания носят стилиевой характер и не снижают научной значимости диссертационной работы.

10. Заключение

Диссертация посвящена актуальной области разработки и анализа методов управления, получения и обработки информации в квантово-оптических системах. Разработан метод создания неклассических состояний в моделях квантовой оптики с использованием квантовых измерений на основе «исключающих» измерений, в том числе для генерации фоковских состояний и их суперпозиций, а также перепутанных квантово-оптических состояний. Развита методика создания неклассических состояний с помощью неунитарной динамики: субпуассоновских и бифотонных состояний в системе нелинейных диссипативно связанных волноводов; неклассических состояний в системе одноатомного лазера с некогерентной накачкой. Проведено обобщение подхода квантовой томографии паттернов данных, на основе которого разработаны методы адаптивной томографии квантовых состояний. Исследовались задачи повышения оптического разрешения в квантовой микроскопии на основе использования корреляционных функций высших порядков, повышения точности измерений рентгеновской дифрактометрии и масс-спектрометрии на основе использования информации Фишера, байесовской оценки вероятностей моделей и операторного описания рентгеновских оптических элементов. Важным обстоятельством является то, что в ряде случаев разработанные теоретические методы применялись к экспериментальным данным. Полученные результаты высокого научного уровня вносят крупный вклад в развитие теории квантовых измерений и их применение для управления состояниями, получения и обработки информации в квантово-оптических системах.

Автор диссертации Александр Борисович Михальчев, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Я, Печень Александр Николаевич, даю согласие на публикацию данного отзыва в открытом доступе на официальном сайте Института физики НАН Беларуси.

Заведующий отделом математических методов квантовых технологий
Математического института им. В.А. Стеклова Российской академии наук,
доктор физико-математических наук,
профессор РАН
07.06.2023

5

А. Н. Печень
Заведующий
Отделом кадров
Усачева О. Г.

