

ОТЗЫВ

официального оппонента

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.

В рассматриваемой диссертации выполнены теоретические исследования, цель которых - разработка методов использования квантовых измерений для управления квантовыми состояниями оптических полей и последующее использование полученной информации об этих состояниях в квантовой томографии, метрологии и микроскопии. Представленные результаты получены в результате использования комплексной системы современных методов теории квантовых измерений и математической статистики. Разработаны новые методы и информативные подходы к оптимизированной процедуре создания и применения неклассических квантово-оптических состояний для квантовой обработки информации. Работа полностью соответствует отрасли физико-математических наук и пункту «Квантовая механика. Квантовая теория информации и квантовые вычисления» специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

2. Актуальность темы диссертации.

Актуальность темы диссертации обусловлена ускоренным развитием квантовых информационных технологий в настоящее время: разработкой принципов действия квантовых компьютеров, систем квантовой коммуникации, квантовых сенсоров и микроскопов. Особенность исследований в этой области определяется скрытым характером квантовой информации, для получения и использования которой требуются специальные процедуры. Преимущества квантовых систем по сравнению с их классическими аналогами могут быть выявлены посредством приготовления специальных состояний с выраженными квантовыми свойствами (например, фоковских, субпуассоновских или перепутанных квантово-оптических состояний) и проведения квантовых измерений. Следует отметить, что задача создания неклассических квантово-оптических состояний не имеет на данный момент универсального решения в силу своей сложности. Развитые в диссертации методы создания и преобразования таких состояний приводят к более оптимальному и эффективному использованию квантовых подходов для решения актуальных технологических задач: обработки информации (квантовой криптографии, квантового голосования, квантовых вычислений) и повышения точности измерений методами квантовой метрологии. Объективно существующие малые размеры квантовых объектов и возможность квантовой интерференции приводят к эффективному использованию квантовых сенсоров (зондов), при этом могут быть преодолены классические пределы чувствительности. Представленное в диссертации усовершенствование методов квантовой метрологии актуально, в частности, для создания квантовых микроскопов – измерительных систем, позволяющих изучать динамику микроскопических объектов, в том числе биологических, при минимизации вредного воздействия света. Представленный обширный список научных программ и проектов, в том числе международных, в

которых были использованы результаты диссертации, также подтверждает важность и практическую значимость выполненных исследований. Тема диссертации соответствует пункту «Физика фундаментальных взаимодействий микро- и макромира, зарождающиеся технологии (квантовые, когнитивные, нейроцифровые, антропоморфные)» перечня приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы.

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

В диссертации получен и вынесен на защиту ряд результатов в области квантовой оптики, квантовой теории информации и квантовых вычислений, обладающих мировым уровнем новизны. Наиболее важные из них состоят в следующем.

Разработан ряд новых методов создания неклассических (в том числе перепутанных) квантово-оптических состояний на основе неунитарной квантовой динамики, обусловленной измерениями или взаимодействием квантовой системы с окружением:

- метод вероятностного управления квантово-оптическими состояниями с использованием предложенного в диссертации класса «исключающих» измерений, обладающий одновременно универсальностью (возможностью создавать различные целевые неклассические состояния) и простотой практической реализации;
- метод нелинейной когерентной диффузионной фотоники, обеспечивающий детерминированную генерацию субпуассоновских состояний света в системе связанных нелинейных волноводов;
- метод создания перепутанных атомно-полевых состояний, а также суперпозиций когерентных оптических состояний в одноатомном одномодовом лазере с некогерентной накачкой.

Использование неунитарного управления состояниями обеспечивает защиту генерируемых неклассических свойств от разрушения, отличающую разработанные подходы от существующих методов на основе унитарной динамики.

Представлено существенное развитие метода квантовой томографии паттернов данных и его расширение на задачи, где он ранее не применялся:

- впервые проведена детальная оптимизация данного метода: определены оптимальные наборы пробных состояний для типичных ситуаций и разработан адаптивный метод, обеспечивающий оптимальную последовательность измерений для заданного (заранее неизвестного) квантового состояния;
- предложена идея классической эмуляции квантовых экспериментов, основанная на разложении недоступного квантового состояния по доступным классическим состояниям и последующем воспроизведении результатов произвольного квантового измерения;
- разработан новый метод конструирования состояний квантовой антенны методом паттернов данных для управления локализацией излучаемых фотонов и создания квантовых корреляций.

Впервые проведен теоретико-информационный анализ многопараметрической задачи квантовой микроскопии и получены следующие новые результаты:

- разработан итеративный алгоритм восстановления структуры протяженных объектов на основе корреляционных функций проходящего через них света,

обеспечивающий линейное масштабирование времени расчета с размером объекта;

- введено операциональное определение оптического разрешения на основе информации Фишера;

- обнаружен эффект повышения разрешения при наличии физических ограничений, накладываемых на параметры изучаемого объекта;

- предсказано повышение разрешения в квантовой микроскопии за счет увеличения чувствительности перепутанного оптического состояния при детектировании одного из фотонов.

Проведено обобщение методов, разработанных в диссертации, для описания квантовых систем, на решение ряда практических задач классической физики, и предложены новые методы, значительно превосходящие аналоги по эффективности:

- метод расчета инструментальной функции рентгеновского дифрактометра на основе полуаналитической трассировки лучей и операторного подхода;

- байесовский подход к идентификации спектральных паттернов в масс-спектрометрии и рентгеновской порошковой дифрактометрии;

- автоматизированный универсальный метод планирования и оптимизации экспериментов в рентгеновской дифрактометрии на основе информации Фишера.

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

Обоснованность и достоверность основных результатов, выводов и защищаемых положений диссертации определяется использованием для их получения общепризнанных теорий, соотношений и подходов, обеспечивающих непротиворечивое описание квантовых измерений, динамики открытых квантовых систем, а также численных методов теории информации и математической статистики. Результаты были доложены на многих международных конференциях и семинарах, опубликованы в ведущих мировых рецензируемых научных изданиях с высоким рейтингом. Методы анализа изображений в квантовой микроскопии и байесовский подход к идентификации спектральных паттернов, представленные в диссертации, были успешно применены к экспериментальным данным, а их точность и эффективность подтверждена сравнением с результатами использования других методик. Соотношения, полученные в диссертации, в предельных случаях совпадают с известными в литературе.

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

Научная значимость представленной работы подтверждается существенным вкладом автора в совершенствование методов неунитарного управления квантовыми состояниями, квантовой томографии и квантовой микроскопии. Сформулированная концепция «исключающих» измерений, разработанные подходы нелинейной когерентной диффузионной фотоники и метод паттернов данных для оптимизации квантовых антенн создают теоретическую основу для дальнейшей разработки методов управления квантово-оптическими состояниями. Представленный в диссертации информационный подход к квантовой микроскопии и введенная количественная мера достижимого оптического разрешения закладывают базис для более глубокого и результативного анализа систем квантовой и классической микроскопии и их адаптации к решению конкретных задач.

Практическая значимость разработанных методов создания неклассических

оптических состояний доказана их ценностью для квантовой обработки информации и повышения точности измерений в квантовой метрологии. Предложенные методы создания таких состояний согласуются с возможностями современного оборудования. Инструменты анализа, оптимизации и эмуляции квантовых состояний, разработанные в диссертации, важны для проверки, калибровки и оптимизации источников неклассических (одnofотонных, сжатых, перепутанных) квантово-оптических состояний, логических элементов квантовых компьютеров, а также квантовых детекторов. Развиваемые в диссертации методы квантовой микроскопии имеют несомненную ценность для неразрушающего исследования биологических объектов, поскольку обеспечивают повышение разрешения оптического микроскопа без использования более высокочастотного, так называемого жёсткого излучения. Подходы к анализу данных масс-спектрометрии и рентгеновской дифрактометрии, представленные в шестой главе диссертации, направлены на решение конкретных практических задач и обеспечивают высокую эффективность автоматизированного планирования экспериментов и обработки их результатов.

Разработанные подходы могут использоваться при выполнении как фундаментальных, так и прикладных исследований в научных учреждениях, а также при разработке управляющего и аналитического программного обеспечения различных измерительных приборов. Безусловно, представленные фундаментальные результаты и новые методические подходы можно рекомендовать для дальнейшего внедрения в учебный процесс в университетах.

6. Опубликованность результатов диссертации в научной печати.

Основные научные положения и результаты диссертационной работы Михалычева А.Б. изложены в 118 публикациях, среди которых 30 статей в рецензируемых научных журналах, включенных в список ВАК, и иностранных рецензируемых научных журналах, в том числе в таких журналах с высоким импакт-фактором, как *npj Quantum Information*, *Scientific Reports*, *Communications Physics*, *Physical Review A* (6 статей), *Physical Review Applied* (2 статьи), *Optics Express*, *Ultramicroscopy*, *Journal of Applied Crystallography* (5 статей), а также 88 публикаций в сборниках материалов и тезисов конференций. Личный вклад соискателя в представленных работах является определяющим. Научные результаты диссертации полностью изложены в опубликованных работах.

7. Соответствие оформления диссертации требованиям ВАК.

Текст диссертации изложен правильным научным языком, имеет структуру и оформление согласно требованиям ВАК РФ. Работа представляет собой законченное научное исследование и характеризуется внутренней логичностью и согласованностью. Диссертация достаточным образом иллюстрирована. Вспомогательные математические выкладки вынесены в приложения, что обеспечивает логичность и сжатость изложения, объем основной части диссертации соответствует рекомендованному значению в 200 страниц.

Автореферат согласуется с содержанием диссертации и раскрывает ее основные положения.

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

На основании внимательного ознакомления с текстом диссертации в соответствии с требованиями ВАК, с научными публикациями автора, а также с материалами его докладов на различных конференциях можно с полной уверенностью утверждать, что диссертация удовлетворяет всем требованиям ВАК, а научная квалификация соискателя соответствует ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

9. Замечания по диссертации

По сути содержания замечаний не имеется. Можно высказать лишь пожелание по дальнейшим исследованиям соискателя, изложенное ниже.

Методы количественной оценки разрешения и обработки изображений, предлагаемые соискателем учёной степени в главе 5, на настоящем этапе исследований применены в диссертации только к задаче квантовой микроскопии. В то же время, как отмечено в разделе 5.1.1, развивается ряд других методов преодоления классического дифракционного предела разрешения: например, STED, RESOLFT, STORM, PALM микроскопия. Достижимое разрешение указанных методов превышает возможности квантовой микроскопии и может обеспечить различение деталей изображений размером порядка десятков нанометров. При обсуждении диссертации было бы полезно привести хотя бы первоначальные оценки применимости предложенных автором инструментов анализа к перечисленным методам микроскопии. Такая возможность следует из раздела 5.2.2, в котором отмечена универсальность итеративного подхода к реконструкции изображений, применимость которого не ограничивается только квантовой микроскопией.

10. Заключение

Диссертационная работа Александра Борисовича Михалычева является логичным, завершённым и самостоятельно выполненным квалификационным исследованием, соответствующим требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук (Глава 3 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь), содержит новые научно обоснованные результаты, совокупность которых имеет большое значение для квантовой оптики, квантовой теории информации и квантовых вычислений и вносит существенный вклад в развитие нового научного направления – разработки методов генерации, преобразования и измерения оптических полей в неклассических состояниях для их использования в квантовой метрологии и информатике. Автор диссертации Александр Борисович Михалычев, без сомнения, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика за:

- разработку метода вероятностного управления квантово-оптическими состояниями на основе «исключающих» измерений для генерации неклассических и перепутанных квантово-оптических состояний;
- совершенствование методов создания субпуассоновских и бифотонных состояний на основе когерентной диффузионной фотоники в системах диссипативно связанных нелинейных волноводов;
- определение условий генерации одноатомным лазером с некогерентной

накачкой неклассических и перепутанных квантово-оптических состояний, а также предсказание эффектов фазовой и амплитудной бистабильности в динамике одноатомного лазера для начального когерентного возбуждения поля;

- развитие подхода квантовой томографии паттернов данных и разработку на его основе методов адаптивной томографии квантовых состояний, классической эмуляции квантовых экспериментов и управления пространственной локализацией и корреляционными свойствами поля, излучаемого квантовой антенной;

- разработку методов повышения оптического разрешения в квантовой микроскопии на основе использования корреляционных функций высших порядков, а также построение информационной количественной меры достижимого оптического разрешения;

- развитие методов повышения точности измерений и эффективности анализа данных в рентгеновской дифрактометрии и масс-спектрометрии.

Я, Семченко Игорь Валентинович, даю согласие на публикацию данного отзыва в открытом доступе на официальном сайте Института физики НАН Беларуси.

Заместитель генерального директора
по научной деятельности ГНПО
«Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»
Национальной академии наук Беларуси,
доктор физико-математических наук,
профессор, член-корреспондент НАНБ



И. В. Семченко

01.06.2023