

## ОТЗЫВ

Члена диссертационного совета на диссертацию  
**Мехова Игоря Борисовича** на тему «**Квантовая оптика  
ультрахолодных квантовых газов: открытые системы за рамками  
диссипации**», представленную на соискание учёной степени доктора  
физико-математических наук по специальности 1.3.6 – оптика.

Предсказание, а затем и экспериментальная реализация вырожденных бозонных и фермионных газов сделали их объектом самого пристального изучения. Помимо фундаментальных проблем квантовой физики интерес к ультрахолодным квантовым газам связан с широким кругом уникальных практических применений в таких новых областях, как квантовая криптография, телепортация квантовых состояний, прецизионная квантовая метрология, новые методы хранения и обработки информации.

Большинство методов диагностики и практически все предложенные схемы применения ультрахолодных атомных ансамблей основаны на их взаимодействии с электромагнитным излучением. При этом подавляющее большинство теоретических работ, проведенных до настоящего времени в данной области, совершенно не учитывают квантовую статистическую природу света, что существенно ограничивает возможности соответствующих подходов при описании прецизионных аспектов взаимного влияния света и атомов друг на друга.

Таким образом, диссертационная работа И. Б. Мехова, посвященная разработке последовательной квантовой теории, позволяющей самосогласованным образом описать квантовую динамику света и вещества является, несомненно, **актуальной**. По существу, представленная работа может рассматриваться как создание и развитие важного теоретического направления – квантовой оптики квантовых газов. Последнее особо актуально в связи со значительным прогрессом в совершенствовании экспериментальных методик в обеих соответствующих областях.

**Наиболее интересными и значимыми новыми результатами,** полученными в работе, по моему мнению, являются следующие:

1. Построена последовательная квантовая теория описывающая взаимодействие между квантованным светом в резонаторе и атомами ультрахолодного квантового газа, удерживаемого в оптических решетках. Развиваемая теория может быть использована как для описания газа бозонов, так и фермионов.

2. На основе общей теории установлена связь между параметрами детектируемого излучения и квантово-статистическими характеристиками квантового газа, такими как флуктуации и пространственные корреляции плотности, что позволяет идентифицировать различные многочастичные состояния ультрахолодных бозонов и фермионов, а также состояния комплексов, состоящих из нескольких молекул. При этом показано, что характер рассеяния света чувствителен не только к локальным атомным плотностям, но и к интерференции волн вещества, которая определяет такие важные эффекты, как туннелирование, атомные токи и фазовые градиенты атомных волн.
3. Показано, что рассеяние света на исследуемых атомных решетках может рассматриваться как квантовое измерение, причем с контролируемой формой обратного воздействия на изучаемый ансамбль. Это дало возможность автору предложить использовать измерение в качестве активного инструмента для приготовления таких нетривиальных атомных состояний как субпуассоновские и макроскопические суперпозиционные состояния.
4. Помимо управления квантовым состоянием доказана возможность управления фазовыми переходами в квантовых системах. В частности, показано, что слабые квантовые измерения и обратная связь могут индуцировать фазовые переходы за рамками диссипативных. Кроме того, обратная связь позволяет управлять существенно квантовыми свойствами фазовых переходов, такими как критические показатели, что демонстрирует перестройку класса универсальности фазового перехода.
5. Сформулирована концепция квантовых симуляторов, основанных на коллективном взаимодействии света и вещества с перестраиваемой эффективной длиной взаимодействия, а также предложены новые симуляторы квантовых резервуаров, что дает возможность моделировать более широкий, чем в классических оптических решетках, класс гамильтонианов.
6. Показано, что квантовая природа оптических потенциалов, формирующих решетку, приводит к появлению новых квантовых фаз ультрахолодных атомов, недоступных в классических оптических решетках. В частности, продемонстрировано возникновение параметров порядка амплитуд волн вещества, таких как сверхтекучие и сверхтвердые димеры.
7. В работе предсказан ряд новых и интересных физических явлений таких как генерация и макроскопические осцилляции мод поля вещества, коррелированное туннелирование и многочастичное межмодовое перепутывание, индуцированный измерениями антиферромагнитный

порядок. Показано, что путем измерения можно как разрушать фермионные пары, так и подавлять их разрушение.

**Научная и практическая ценность работы** определяется тем, что выполненные в ней исследования вносят существенный вклад в развитие квантовой теории. В ней разработан последовательный подход к описанию ряда явлений на стыке квантовой оптики и физики квантовых газов, двух направлений, разделенных до этого как по способам теоретического описания, так и по используемым экспериментальным подходам. Это позволило автору предсказать несколько новых явлений, выходящих далеко за рамки представлений, основанных на традиционных подходах теории конденсированного состояния, и нереализуемых ни в квантовой оптике, ни в конденсированных физических системах по отдельности.

Развитие нового направления на пересечении обеих областей позволило также сформулировать ряд оригинальных идей для прикладных квантовых технологий, упомянутых выше. В качестве наиболее интересных отмечу предложенные неразрушающие методы исследования коллективных эффектов, методы создания перепутанных состояний света и вещества, возможности управления фазовыми переходами, а также управления свойствами так называемых временных кристаллов и конструирования кристаллов Флоке с изменяемым дальнодействием.

Разработанные автором подходы могут быть использованы не только для ансамблей нейтральных атомов в оптических решетках. Их можно применить для описания широкого круга квантовых объектов, например, полупроводниковых экситон-поляритонов, сверхпроводящих кубитов, цепочек ионов, ансамблей молекул и т.п.

Оригинальные методические разработки автора могут быть успешно использованы в учебном процессе в университетах.

Результаты, полученные в диссертации, **надежно обоснованы**, их **достоверность** обусловлена корректным применением адекватных методов современной теоретической и математической физики. Сделанные в расчетах приближения имеют ясные физические основания. Полученные результаты детально проанализированы. Там, где это возможно, проведено сопоставление предельных случаев с известными результатами других авторов. Некоторые эффекты, предсказанные автором, нашли подтверждение в проведенных экспериментах. Сюда следует отнести возможные фазовые переходы в ультрахолодных газах, вызванные внешней обратной связью, а также предсказанная в работе разница между сверхтвердыми состояниями и

волнами плотности на решетке с малым и большим дисбалансом плотности. Результаты работы неоднократно докладывались на представительных международных конференциях и семинарах.

В работе с большим объемом материала, как диссертация И. Б. Мехова, обычно трудно избежать недостатков. В данном случае их количество минимально. В качестве **замечаний** отмечу следующее:

1. При описании характера взаимодействия атомов со светом автор использует приближение вращающейся волны. В то же время в условиях, когда межатомное расстояние соизмеримо с длиной волны резонансного излучения такое приближение требует подробного обоснования, которое отсутствует в тексте диссертации.
2. В работе очень подробно анализируется роль локализации и делокализации атомарных волн в рассматриваемом ансамбле. При этом возможности локализации световых волн не обсуждается, хотя известно, что интерференционные эффекты при многократном рассеянии света в плотных ансамблях, исследуемых в работе, могут приводить при некоторых условиях к эффекту Андерсоновской локализации света, обусловленной формированием особых пространственно локализованных мод. Особенно важно формирование таких мод в системах пониженной размерности, в частности, в рассматриваемых автором резонаторах, в которых важно дальнедействующее взаимодействие между узлами решетки.
3. Термин «измерение света», очень часто используемый в работе представляется неудачным. Считаю, что в каждом конкретном случае он требует уточнения.

Сделанные замечания не являются принципиальными с точки зрения основных результатов, полученных автором, и не влияют на положительное впечатление от работы, которая представляет собой завершённое теоретическое исследование, выполнена на очень высоком научном уровне и содержит ряд новых и практически значимых результатов, достоверность которых не вызывает сомнений. Содержание диссертации подробно изложено в двадцати девяти статьях.

На основании вышеизложенного, я считаю, что диссертация Мехова Игоря Борисовича соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 01.09.2016 № 6821/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Мехов

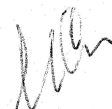
Игорь Борисович, без сомнения, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.6 — Оптика. Пункты 9 и 11 указанного Порядка диссертантом не нарушены.

Член диссертационного совета

Профессор Высшей школы фундаментальных  
физических исследований

СПбПУ, д. ф.-м. н., профессор

22.11.2021



Соколов Игорь Михайлович