

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук Алтайского Михаила Викторовича на диссертацию Доловой Оксаны Александровны на тему: «Рассеяние и связанные состояния в малочастичных планарных дипольных квантовых системах», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 Теоретическая физика.

Актуальность темы. Диссертация О. А. Доловой посвящена аналитическому и численному исследованию нерелятивистских квантовых систем, которые могут быть описаны в приближении диполь-дипольного взаимодействия. Интересу к этим исследованиям способствовали эксперименты с захватом и охлаждением атомов и молекул в лазерных и магнитных полях, отмеченные несколькими Нобелевскими премиями. Холодные газы, включая газы полярных молекул обладающих значительным дипольным моментом, являются удобным объектом для исследования, как в теоретическом, так и в экспериментальном отношении.

В практических приложениях, манипулирование квантовыми состояниями атомов и молекул, находящихся в узлах оптической решетки, связано с построением масштабируемой технологии квантовых вычислений, и представляет собой (квази) планарную задачу. Тема диссертации является актуальной поскольку в ней развиты математические методы и численные алгоритмы для решения именно таких задач. Столкновения молекул в слое планарной ловушки моделируются двумерной динамикой молекул. В силу неразличимости частиц и малого расстояния между ними, задача рассеяния является существенно квантовой двумерной задачей, хотя сами дипольные моменты лежат вне плоскости рассеяния. Уравнения, получающиеся при таком описании, как правило, не имеют аналитического решения и для них используются численные методы.

В настоящей диссертационной работе обнаружена сильная угловая зависимость дифференциальных сечений рассеяния как для случая фермионов, так и для бозонов. Впервые показано, что дифференциальное сечение рассеяния бозонов (фермионов) в плоскости, в отсутствие резонансов, растет (убывает) с уменьшением энергии. Данный эффект отсутствует в низкоэнергетическом пределе трехмерной теории. По этой причине полученные в работе теоретические результаты представляют интерес для экспериментальной проверки.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации. Обоснованность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации О.А. Доловой, основана на использовании

классических известных методов и построении численных алгоритмов. В диссертации приведены подробные и последовательные выкладки.

Достоверность и новизна исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Достоверность результатов подтверждается их соответствием известным представлениям о характере явлений в исследуемых объектах и качественным совпадением с результатами экспериментов, а также согласием с результатами других теоретических работ по данной тематике.

Представленная работа содержит ряд новых результатов, из которых наиболее значимыми являются следующие:

1. Исследованы связанные состояния точечной квантовой частицы в поле двумерного диполя. Анизотропия потенциала взаимодействия приводит к связи состояний с различным угловым моментом. Результаты численного решения соответствующего уравнения Шредингера для уровней энергии и вероятностей различных состояний хорошо согласуются с аналитическими решениями, полученными другими авторами при отсутствии оценок точности решения. Выполненные в диссертации расчеты с помощью построенного алгоритма с известной оценкой точности восполняют это пробел.

2. Численно исследовано влияние короткодействующего потенциала взаимодействия на возникновение резонансов при анизотропном дипольном рассеянии. Использование двух различных короткодействующих потенциалов – Леннарда-Джонса и жесткой стенки – приводит к сходным результатам, не только по форме резонансов, но и по значениям сечения рассеяния. Результаты точного численного расчета хорошо согласуются с аналитическими результатами, полученными в борновском приближении другими авторами, и говорят о хорошей применимости потенциала жесткой стенки к данному классу задач.

3. В низкоэнергетическом и высокоэнергетическом пределах диполь-дипольного рассеяния определены пороговые значения радиуса коротковзаимодействующего потенциала, ниже которого наблюдается возникновение резонансов. Рассчитан критический угол наклона одного из диполей, как функция угла наклона второго диполя, при превышении которого возникают резонансы.

Научная новизна подтверждается 6 статьями в рецензируемых научных журналах, индексируемых Web of Science и/или Scopus и входящих в перечень ВАК и 20 выступлениями на российских и международных конференциях, научных семинарах.

Значимость работы. Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации. Значимость научной работы О.А. Доловой заключается в том, что ею смоделированы столкновения полярных молекул в слое дископодобной ловушки с использованием двух произвольно направленных диполей. В диссертации исследован случай, когда два дипольных момента не ограничены расположением в плоскости рассеяния. Полученные в результате численных расчетов характеристики рассеяния произвольно ориентированных бозонов и фермионов могут быть пересчитаны для параметров широкого класса полярных молекул. Обнаруженные отличия энергетических зависимостей дифференциального сечения рассеяния в плоскости бозонов (фермионов) от трехмерного случая представляют интерес для экспериментальной проверки.

Содержание диссертации.

Диссертационная работа изложена на 100 страницах, содержит 28 рисунков и 5 таблиц. Работа включает введение, обзор литературы, три главы основного текста, заключение, список публикаций автора по теме диссертации из 9 наименований, и список цитируемой литературы, содержащий 106 наименований. К работе приложен автореферат на 25 страницах, который достаточно полно отражает основные результаты работы.

Во Введении обоснована актуальность работы, ее научная новизна, и ее связь с технологиями охлаждения нейтральных атомов, определены цели и задачи работы, описаны ее возможные приложения к проблемам создания масштабируемого квантового компьютера, сформулированы положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации имеет вводный характер. В ней изложены математические методы решения уравнения Шредингера для квантовой частицы в поле двумерного диполя. Предложенный автором численный алгоритм решения двумерного уравнения Шредингера использует дискретизацию по угловой координате и интерполяцию по радиальной. Это сводит решение УШ к задаче Штурма-Лиувилля для системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Приводится сравнение результатов использования предложенного алгоритма с результатами других авторов для решения двумерной задачи движения квантовой частицы в поле диполя.

Во Второй главе развито теоретическое описание двумерного рассеяния двух произвольно направленных диполей, определена область применимости этого приближения, разработан численный алгоритм решения задачи рассеяния. В качестве конкретных примеров, приведены расчеты рассеяния для случаев, когда изотропная (короткодействующая) часть потенциала взаимодействия описывается (а) бесконечно высокой потенциальной стенкой, (б) потенциалом Леннарда-Джонса (6-12). В качестве

оригинального результата представлено значение критического угла наклона диполя, при достижении которого потенциал взаимодействия меняется с отталкивающего на притягивающий.

В Третьей главе изложены основные результаты автора, полученные путем численного решения квантовой задачи рассеяния двух произвольно направленных диполей. Параметры вычислений соответствуют столкновению двух ультрахолодных полярных молекул в двух пространственных измерениях. В качестве возможной физической реализации такого рассеяния в диссертации упоминаются эксперименты с рассеянием молекул $^{23}\text{Na}^{87}\text{Rb}$. Для малых энергий столкновений обнаружена сильная зависимость полного сечения рассеяния от короткодействующей части потенциала взаимодействия. Определены различия в зависимости сечений рассеяния от энергии при различных углах наклона диполей по отношению к нормали к плоскости рассеяния. Проведено теоретическое исследование возникновения резонансов в диполь-дипольном рассеянии, отдельно для бозонов и фермионов. Получены зависимости дифференциальных сечений рассеяния от взаимного расположения диполей. Продемонстрировано согласие проведенных расчетов с имеющимися результатами, полученными другими авторами.

В заключении кратко сформулированы основные результаты работы.

Замечания.

Положительно оценивая работу в целом, в качестве замечаний хотелось бы подчеркнуть следующее:

Во Введении автор подчеркивает связь рассматриваемых ей задач с проблемами построения масштабируемого квантового компьютера, в частности на основе холодных газов, удерживаемых в оптических решетках. В основной же части диссертации фактически решается двумерная задача рассеяния для уравнения Шредингер с анизотропным потенциалом, с неразделяющимися переменными, вследствие чего возникает необходимость применения численных методов. Двумерность рассеяния, на сколько я понимаю, возникает вследствие удержания молекул в фиксированных полях и неизменности направления их дипольных моментов за время рассеяния. Это в каком-то смысле можно считать низкоэнергетическим пределом. В реальной же задаче квантового компьютеринга необходимо управление состояниями кубитов, а значит направления дипольных моментов отдельных молекул или атомов,

должны меняться в процессе вычисления. Как это связано с рассматриваемой задачей рассеяния не вполне ясно.

Указанные замечания являются пожеланиями для дальнейших исследований, не носят принципиального характера и не снижают общую высокую оценку работы.

Заключение.

Диссертация Оксаны Александровны Доловой, в которой исследуются малочастичные нерелятивистские дипольные квантовые системы в плоскости, является законченным научным трудом, выполненным на высоком уровне. В работе представлены оригинальные результаты, представляющие интерес с фундаментальной и прикладной точек зрения. Автореферат и опубликованные работы подробно и правильно отражают содержание диссертации.

Диссертационная работа Оксаны Александровны Доловой удовлетворяет всем требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 Теоретическая физика, а её автор, Долова О.А., заслуживает присуждения ей искомой ученой степени.

Официальный оппонент, доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник федерального государственного
бюджетного учреждения науки

Института космических исследований РАН

почтовый адрес: 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, 84/32,

телефон: +7 (903) 570-01-09,

адрес электронной почты: altaisky@rssi.ru

/Алтайский М. В./

Дата «23» января 2023 г.

Подпись официального оппонента заверяю

Ученый секретарь ФГБУН ИКИ РАН



/ Садовский А.М. /