

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 720.001.01  
НА БАЗЕ ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ  
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 16.05.2018 № 114

О присуждении Ковалю Евгению Александровичу ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Квантово-механический анализ двухчастичных систем с анизотропией взаимодействия во внешнем поле в двумерном пространстве» по специальности 01.04.02 – теоретическая физика принята к защите 21.02.2018 (протокол № 109) диссертационным советом Д 720.001.01 на базе международной межправительственной организации «Объединенный институт ядерных исследований», 141980, Московская область, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6, приказ Рособрнадзора о создании совета № 1484-1047 от 11.07.2008; полномочия совета подтверждены приказом Минобрнауки РФ № 105/НК от 11.04.2012.

Соискатель **Коваль Евгений Александрович** 1991 года рождения.

В 2013 году соискатель с отличием окончил магистратуру факультета естественных и инженерных наук Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Университет «Дубна» с присуждением квалификации магистра по направлению подготовки 011200 «Физика». В настоящее время работает в Лаборатории теоретической физики имени Н.Н. Боголюбова международной межправительственной организации «Объединенный институт ядерных исследований», в должности младшего научного сотрудника. Диссертация выполнена в Лаборатории теоретической физики имени Н.Н. Боголюбова международной межправительственной

организации «Объединенный институт ядерных исследований».

Научный руководитель - доктор физико-математических наук, **Мележик Владимир Степанович**, Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория теоретической физики имени Н.Н. Боголюбова, ведущий научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

**Тихонова Ольга Владимировна**, доктор физико-математических наук, профессор, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Физический факультет, профессор;

**Коловский Андрей Радиевич**, доктор физико-математических наук, Институт физики имени Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Лаборатория теории нелинейных процессов, главный научный сотрудник дали положительный отзыв на диссертацию.

**Ведущая организация** – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова», г. Архангельск, в своем положительном заключении, подписанном **Матвеевым Виктором Ивановичем** (доктор физико-математических наук, профессор, центр теоретической физики, главный научный сотрудник), **Есеевым Маратом Каналбековичем** (доктор физико-математических наук, доцент, и.о. директора центра теоретической физики) и утвержденным **Кудряшовой Еленой Владимировной** (доктор философских наук, профессор, ректор), указала, что *«Диссертация посвящена теоретическому исследованию анизотропных свойств двухчастичных систем в двумерном (2D) пространстве, таких как ультрахолодные атомы и ультрахолодные полярные молекулы в оптических ловушках, 2D атом водорода и 2D экситон (в квантовой яме полупроводниковой гетероструктуры) в*

произвольно направленном магнитном поле. В последнее время исследование малоразмерных малочастичных систем представляет значительный интерес в связи с развитием экспериментальных методов создания и управления свойствами подобных систем и широкому кругу возникающих в них эффектов и явлений, что открывает перспективы их использования в различных областях фундаментальной науки и техники. <...> Эти работы требуют теоретической поддержки – развития теоретических схем для количественного описания квантового рассеяния в ограниченной геометрии ловушки. <...> В трехмерном пространстве дипольные газы достаточно хорошо изучены. При этом задача рассеяния неполяризованных диполей на плоскости на данный момент практически не исследована, актуальна и представляет собой научный интерес. <...> До настоящего момента исследовалось влияние внешнего магнитного поля, перпендикулярно направленного плоскости движения частиц, на спектр 2D атома водорода с помощью метода асимптотических итераций, вариационного подхода и аналитически для отдельных значений величины магнитного поля. Однако влияние произвольно направленных магнитных полей на свойства 2D атома водорода на настоящий момент не исследовано и эта проблема является актуальной теоретической исследовательской задачей, рассматриваемой в данной работе. Неизученная на данный момент задача исследования статистических свойств энергетического спектра 2D атома водорода и квантового хаоса для наклонного магнитного поля представляет собой научный интерес, поскольку выполненные ранее исследования проводились в основном для трехмерного случая. <...> В главе 1 диссертации изложен используемый подход для численного решения проблемы связанных состояний и его применение к модельной задаче, симулирующей связанные состояния двух атомов в оптической ловушке. <...> В главе 2 представлен численный алгоритм для численного анализа 2D квантового рассеяния на дальнедействующем анизотропном рассеивателе, его применение к модельной задаче рассеяния квантовой частицы на круговом и эллиптическом потенциальных барьерах и

исследование 2D столкновений двух неполяризованных диполей. <...> В разделе 2.2 обнаружено сужение резонансной области с одновременным уменьшением амплитуды резонансных осцилляций при увеличении угла между плоскостями поляризации диполей. Выявлен ярко выраженный резонансный характер рассеяния при изменении угла наклона одного из диполей, если другой диполь ориентирован в плоскости рассеяния. <...> В главе 3 численно исследованы анизотропные особенности двумерного атома водорода и двумерного экситона в наклонном магнитном поле. В разделе 3.1 приведена формулировка проблемы связанных состояний 2D атома водорода и 2D экситона в наклонном магнитном поле, получено согласие с результатами работ других авторов для двумерного атома водорода для магнитного поля, направленного перпендикулярно к плоскости движения частиц. В разделе 3.2 показано, что с увеличением угла наклона магнитного поля к нормали к плоскости движения частиц наблюдается эффект значительного уменьшения энергии основного и возбужденных состояний. <...> В главе 4 представлены результаты исследования статистических свойств энергетических спектров 2D атома водорода и 2D экситона в наклонном магнитном поле и квантового хаоса. <...> В разделе 4.2 показано, что результаты для квантового случая находятся в полном согласии с классической динамикой, подтверждая утверждение об инициировании хаотического режима с увеличением угла наклона. <...> В качестве недостатков диссертационной работы следует указать следующее: теоретическое рассмотрение влияния анизотропии взаимодействия на свойства двухчастичных систем было бы более полным, если бы были также исследованы зависимости свойств спектров двумерных квантовых точек от направления произвольно направленного магнитного поля. Отметим, что данный недостаток не снижает высокой оценки представленной работы, а скорее отражает перспективы дальнейших исследований. Также по тексту диссертации присутствуют опечатки. Это замечание не влияет на положительное впечатление и заключение по диссертационной работе. <...>

*На основании вышеизложенного следует заключить, что диссертация Е.А. Ковалья удовлетворяет всем требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК РФ и паспорту специальности 01.04.02 – теоретическая физика, а ее автор, Коваль Евгений Александрович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.».*

Соискатель имеет 9 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 5 работ, из которых 5 опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК. Основные работы:

1. Koval E. A., Koval O. A., Melezhik V. S. Anisotropic quantum scattering in two dimensions // *Physical Review A*. — 2014. — Vol. 89, no. 5. — P. 052710 (1-9).
2. Коваль Е.А., Коваль О.А. Анизотропные особенности двумерного атома водорода в магнитном поле // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. — 2017. — т. 152, № 1. — с. 45—53.
3. Koval E. A., Koval O. A. Excited states of two-dimensional hydrogen atom in tilted magnetic field: Quantum chaos // *Physica E*. — 2017. — Vol. 93. — P. 160—166.
4. Коваль Е.А., Коваль О.А., Мележик В.С. Численное решение квантовой задачи рассеяния на плоскости // *Письма в журнал Физика элементарных частиц и атомного ядра*. — 2015. — т. 12, № 3 (194). — с. 702—707.
5. Коваль О. А., Коваль Е. А. Моделирование связанных состояний квантовых систем в двумерной геометрии атомных ловушек // *Вестник РУДН. Серия Математика. Информатика. Физика*. — 2014. — Т. 2, № 1. — С. 369—374.

Общий объем опубликованных работ по материалам диссертации составляет 34 печатные страницы. Работы [1–4] опубликованы в журналах, которые включены в международные системы цитирования Web of Sciences и Scopus и хорошо известны научному сообществу. Все журналы рецензируемые, опубликованные работы прошли серьезную всестороннюю проверку рецензентами – ведущими специалистами в области теоретической физики.

Отзывы официальных оппонентов и ведущей организации положительные, но содержат следующие основные замечания, не снижающие общей высокой

оценки научного уровня диссертации. В отзыве А.Р. Коловского говорится: «Основная цель первой главы – это тестирование нового численного метода для решения стационарного двухмерного уравнения Шредингера. <...> В качестве замечания отмечу, что название главы на мой взгляд неудачно. Из названия можно заключить, что рассматривается задача двух тел в присутствии дополнительного гармонического потенциала ловушки. На самом деле, решается задача об одной частице в центральном потенциале с квадратичной асимптотикой для больших расстояний. Во второй главе автор переходит к рассмотрению анизотропного взаимодействия, где потенциал взаимодействия зависит от значения угловой переменной. Согласно утверждению автора, новый алгоритм имеет преимущество над традиционным подходом именно для анизотропного потенциала. То, что алгоритм способен учитывать анизотропию потенциала наглядно продемонстрировано в задаче о рассеянии квантовой частицы на потенциальном барьере с эллиптическим основанием. Однако, глава выиграла бы, если бы автор провел сравнение (время счета, скорость сходимости, и т.д.) с традиционным подходом. Во второй части второй главы автор рассматривает задачу о рассеянии (столкновении) двух частиц, имеющих дипольные моменты, например, двух полярных молекул. <...> Основное приближении задачи – это фиксированная ориентации диполей в пространстве. К сожалению, данное приближении совсем не обсуждается в тексте диссертации. В третьей и четвертой главах анализируется энергетический спектр экситона в двухмерной полупроводниковой структуре в присутствии магнитного поля. <...> В качестве замечания отмечу, что детали анализа не указаны в тексте диссертации. В частности, не приведены гистограммы плотности состояний и не указан энергетический интервал, который был выбран для статического анализа спектра. Данные цифры важны, поскольку может оказаться, что для еще более высоких энергий режим движения системы может снова меняться на регулярный. Дополнительно, на рис. 4.3 автор приводит нестандартное сечение Пуанкаре, поскольку при стандартном подходе



к автономной системе двух степеней свободы траектории на сечении не могут пересекаться. Несмотря на сделанные замечания, в целом, диссертация подтверждает квалификацию соискателя.». В отзыве О.В. Тихоновой говорится: «Однако, диссертационная работа не свободна от недостатков: 1. Представляется важным выявление физических механизмов возникающих резонансов, обнаруженных в сечении двумерного анизотропного квантового рассеяния в зависимости от угла ориентации диполей. 2. При исследовании энергий и волновых функций собственных состояний двумерного атома водорода и экситона в произвольно ориентированном магнитном поле необходимо проанализировать и объяснить свойства возникающих распределений плотности вероятности, особенно для возбужденных состояний экситона, и связать их с характеристиками анизотропного эффективного потенциала. 3. Представляется важным анализ свойств собственных состояний двумерного атома водорода и экситона в магнитном поле в условиях, когда не имеет места полное разделение степеней свободы центра масс и относительного движения. Используемый теоретический подход позволяет это сделать. В этом случае можно ожидать интересных эффектов из-за влияния различных степеней свободы исследуемой системы друг на друга. 4. В четвертой главе диссертации аналогия между квантовым и классическим хаосом представляется не совсем корректной. Также при анализе стационарных состояний квантовой системы представляется не совсем уместным использование термина квантовая динамика, который обычно соответствует решению начальной задачи. 5. По работе также имеется ряд технических замечаний: - имеется некоторая нелогичность в изложении в главе 1, поскольку описанный метод дискретизации по угловой переменной апробируется на системе с аксиально симметричным потенциалом, при этом используется разложение по парциальным волнам и учитывается только  $s$ -волна. Таким образом, основные преимущества использованного подхода не верифицируются в такой модельной задаче. - В ряде случаев конкретный вид решения подставляется в исходное уравнение, вид

которого не конкретизирован, что затрудняет восприятие материала. Например, разложение (1.3) подставляется в стационарное уравнение Шредингера (1.1) предельно общего вида. - В ссылках на англоязычные статьи использован русский текст для обозначения тома и страниц. - Представляется не совсем корректным использование термина «неполяризованный диполь». Приведенные замечания не снижают общую достоверность, актуальность и научную значимость диссертационного исследования.».

Соискатель ответил на все замечания.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации основан на том, что оба оппонента являются видными специалистами, как в области теоретической физики, так и в области атомной и молекулярной физики, а ведущая организация – одним из лидирующих университетов в области теоретической физики. Это подтверждается многочисленными публикациями в журналах из списка ВАК, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus, а также высоким индексом цитируемости их работ.

**Диссертационный совет отмечает**, что в рамках проведенных соискателем исследований:

При анализе квантового рассеяния в двумерном пространстве произвольно ориентированных диполей в случае взаимной ортогональности их плоскостей поляризации выявлен ярко выраженный резонансный характер рассеяния при изменении угла наклона одного из диполей, если другой диполь ориентирован в плоскости рассеяния.

Показано, что при двумерном квантовом рассеянии двух неполяризованных диполей увеличение угла между плоскостями поляризации диполей приводит к сужению области резонансных осцилляций сечения рассеяния с одновременным уменьшением их амплитуды до полного исчезновения осцилляций.

Обнаружена нелинейная зависимость энергий основного и возбужденных состояний “двумерного” атома водорода и “двумерного” экситона в квантовой яме полупроводниковой гетероструктуры GaAs/Al<sub>0.33</sub>Ga<sub>0.67</sub>As от угла наклона  $\alpha$



вектора напряженности магнитного поля относительно нормали к плоскости движения частиц в широком диапазоне величин напряженности произвольно направленного магнитного поля: с увеличением угла наблюдается эффект значительного уменьшения энергии основного и возбужденных состояний.

Выявлена существенная зависимость статистических свойств энергетического спектра “двумерного” атома водорода от ориентации вектора напряженности магнитного поля относительно нормали к плоскости движения частиц. С ростом угла наклона  $\alpha$  вырожденные до этого уровни расщепляются и уменьшаются интервалы между кластерами энергетических уровней. При увеличении угла наклона  $\alpha$  обнаружен переход распределений межуровневых интервалов энергетического спектра “двумерного” атома водорода от распределения Пуассона к распределению Вигнера, свидетельствующий о возникновении в системе квантового хаоса, что подтверждается результатами проведенного анализа классической динамики системы.

**Теоретическая и практическая значимость.** Разработанные эффективные численные алгоритмы применимы для анализа связанных состояний двухчастичных систем с различными, в том числе сильно анизотропными потенциалами взаимодействия в двумерном пространстве и двумерного рассеяния двух частиц. Полученные результаты вносят вклад в лучшее понимание важных проблем влияния анизотропии взаимодействия на свойства малочастичных систем в двумерном пространстве.

Разработанные методы и полученные результаты представляют практический интерес для специалистов, занимающихся исследованиями полярных молекул в оптических ловушках и экситонов в полупроводниковых гетероструктурах в наклонных магнитных полях для контроля их спектров поглощения и испускания с помощью изменения направления и величины напряженности наклонного магнитного поля и др.

**Оценка достоверности** результатов исследования выявила: Достоверность результатов, изложенных в диссертации, обеспечивается тем, что используемые

в работе подходы основаны на классических известных и апробированных методах квантовой теории рассеяния. Результаты находятся в полном соответствии с результатами, полученными в теоретических работах других авторов в рамках более простых моделей, а также с данными экспериментальных групп.

**Личный вклад** соискателя в результаты и основные положения, выносимые на защиту, является определяющим. Автор принимал непосредственное участие в постановке задач диссертационной работы, разработке численных алгоритмов и компьютерных программ для их решения, проведении расчетов, в анализе результатов и публикации статей, а также апробации результатов исследования на научных мероприятиях.

На заседании № 114 от 16 мая 2018 года диссертационный совет принял решение присудить Ковалю Е.А. ученую степень кандидата физико-математических наук. При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 12 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 26 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 18, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель  
диссертационного совета

Воронов Виктор Васильевич

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Быстрицкий Юрий Михайлович

16.05.2018

