

Отзыв официального оппонента
на диссертационную работу Руднева Владимира Александровича
**«Исследование новых эффектов в стационарных
и нестационарных системах нескольких тел»,**
представленную на соискание степени доктора физико-математических наук по
специальности 01.04.02 — теоретическая физика.

В диссертационной работе представлено исследование новых эффектов в стационарных и нестационарных системах нескольких квантовых частиц в сверхнизкоэнергетических режимах. Предложены новые формулировки и методы решения стационарных и нестационарных квантовомеханических задач для трёхчастичных систем в режиме близком к ефимовской универсальности и парных столкновений ориентированных диполей при сверхнизких энергиях, и молекулярных ионов в поле сильного электромагнитного импульса. Оба типа решаемых диссертантом задач важны для правильной интерпретации и планирования экспериментальных исследований, проводимых в настоящее время, что определяет актуальность темы диссертации.

Автором получены следующие важные **результаты**:

- разработан и реализован в виде открытого программного кода новый подход к построению высокоэффективных методов прямого решения квантовой задачи нескольких тел ниже трёхчастичного порога на основе уравнений Фаддеева;
- впервые предложен метод использования асимптотически оптимальных сеток для решения уравнений Фаддеева;
- получены новые универсальные закономерности поведения наблюдаемых в окрестности двухчастичного порога для квантовых трёхчастичных систем в ефимовском, универсальном режиме взаимодействия, тем самым установлена связь между двумя важными трёхчастичными эффектами: эффектом Ефимова и линией Филлипса;
- описаны и классифицированы серии резонансов в низкоэнергетических столкновениях ориентированных полярных молекул;
- описано влияние резонансов на анизотропию рассеяния в низкоэнергетических столкновениях ориентированных полярных молекул;
- впервые предсказано на основе вычислительного эксперимента влияние фазы между несущей и огибающей лазерного импульса на результаты фотодиссоциации молекулярных систем;
- разработан метод получения функции распределения фрагментов реакции фотодиссоциации по скоростям из функции распределения в координатном представлении, не требующий выполнения интегральных преобразований;
- исследованы вопросы наблюдаемости фазовых эффектов в реалистических сценариях эксперимента;
- впервые построена общая теория влияния фазы между несущей и огибающей лазерного импульса на конечное состояние взаимодействующей с ним квантовой системы.

Диссертация состоит из введения и шести глав. Во введении дано обоснование актуальности работы, описаны её цели и задачи, сформулированы положения, выносимые на

защиту.

Первые три главы посвящены низкоэнергетическому рассеянию в системах двух и трёх тел.

В первой главе автор обсуждает уравнения Фаддеева, асимптотическое поведение их решений, способы редукции и дискретизации с точки зрения построения быстрых вычислительных схем. Автор аргументирует редукцию уравнений на основе представления полного углового момента и дискретизацию на основе эрмитовых сплайнов и метода ортогональных коллокаций. Для построения быстрой итерационной схемы решения уравнений автор предлагает использовать правое предобуславливание дискретизованных систем уравнений Фаддеева, подобное переходу от дифференциальных уравнений для компонент волновой функции к интегральным уравнениям на источники, что позволяет существенно сократить область пространства, в которой строится решение. Важным нововведением является использование асимптотически оптимальных сеток, которые позволяют не только упростить процедуру выбора параметров дискретизации уравнений, но и заметно повышают точность решения задачи трёх тел.

Во второй главе описано применение развитых в первой главе методов прямого решения задачи трёх тел к эталонной системе, в качестве которой выбрана система трёх атомов гелия. Подробно рассмотрен вопрос о неопределённости, вносимой в потенциал погрешностями фундаментальных констант. Автор обращает внимание на ранее неизвестный факт: для потенциалов, заданных в единицах температуры, заметную погрешность вносит постоянная Больцмана, для некоторых широко используемых потенциальных моделей авторами указывается значение, существенно отличающееся от рекомендованного CODATA (которое также периодически обновляется), что может приводить к заметному различию в результатах двух- и трёхчастичных расчётов. Реализованная автором схема решения задачи корректна, результаты её применения обеспечивают ожидаемую высокую точность расчётов и согласуются с другими известными результатами. На основе оригинальной вычислительной схемы автор исследует корреляции между энергией связи трёхчастичной системы и длиной рассеяния частицы на связанной паре, аналогичные линии Филлипса. Получены новые универсальные соотношения для этих величин, демонстрирующие связь линии Филлипса с эффектом Ефимова. Эти соотношения интерпретируются в рамках двухполусной модели взаимодействия, приводятся новые, неизвестные ранее закономерности.

В третьей главе исследуется двухчастичное рассеяние ориентированных полярных молекул. На основе подхода, подобного гиперсферическому адиабатическому представлению, предсказаны и классифицированы универсальные серии пороговых резонансов. Обнаружена неизвестная ранее связь между анизотропией рассеяния и величиной сечения рассеяния, обусловленная наличием околупороговых резонансов. Предложен подход к экспериментальному наблюдению предсказанных серий резонансов.

Главы 4 и 5 посвящены процессам фотодиссоциации молекулярного иона водорода в поле сильного короткого лазерного импульса. **В четвёртой главе** автором продемонстрирована связь между волновой функций в проективных координатах и волновой функцией в импульсном представлении. Это соотношение позволяет получать распределение

фрагментов реакции по импульсам напрямую из функции плотности конечного состояния, не прибегая к преобразованиям волновой функции. Полученное соотношение использовано для исследования фотодиссоциации молекулярного иона водорода в поле короткого сильного лазерного импульса. Впервые показана чувствительность конечного состояния к фазе импульса. **В пятой главе** продолжается исследование влияния фазы между несущей и огибающей лазерного импульса с точки зрения возможности наблюдения таких эффектов в реалистическом сценарии эксперимента. Показано, что некогерентность начального состояния и конечность фокусного объёма затрудняют наблюдение эффекта в угловом распределении фрагментов реакции, в то же время эффект может наблюдаться в распределении фрагментов реакции по энергии.

Глава 6 посвящена теории влияния фазы между несущей и огибающей лазерного импульса на конечное состояние взаимодействующей с ним квантовой системы. Переход к уравнениям с двумерным временем обеспечивает возможность исключить фазу импульса из уравнений путём представления волновой функции в виде суперпозиции компонент, отвечающих обмену различного количества фотонов между системой и импульсным полем. Зависимость волновой функции от фазы восстанавливается из такого представления простым унитарным преобразованием. Это даёт возможность интерпретации любых фазовых эффектов как интерференции компонент, отвечающих одному конечному состоянию после обмена различным числом фотонов. Предложенное построение иллюстрируется на примере двухуровневой системы в импульсном поле. Эта простая модель позволяет получить качественные условия наблюдаемости фазовых эффектов. Показано, что для их появления недостаточно малой длительности импульса как таковой, но требуется и его высокая интенсивность. С другой стороны, показано, что заметные фазовые эффекты могут наблюдаться и для относительно длительных импульсов.

Приведённые в диссертации результаты хорошо обоснованы, имеют высокую научную ценность, вынесенные на защиту положения являются новыми и опубликованы в 14 работах в журналах из Перечня периодических научных журналов, рекомендуемых ВАК РФ. Актуальность работы и её практическая значимость подтверждается многочисленными ссылками на статьи автора в ведущих международных журналах.

Разработанные и реализованные автором методы прямого решения стационарных и нестационарных квантовомеханических задач позволили ему получить новые важные физические результаты. К таким результатам следует отнести обнаружение новых закономерностей, связывающих околопороговые наблюдаемые для квантовых систем трёх тел в режиме, близком к ефимовской универсальности, предсказание универсальных серий пороговых резонансов в столкновениях ориентированных диполей, предсказания влияния фазы между несущей и огибающей лазерного импульса на фотодиссоциацию молекул (получившие экспериментальное подтверждение), построение теории влияния фазы между несущей и огибающей на конечное состояние системы, взаимодействующей с коротким электромагнитным импульсом.

Замечания

1) Модифицированная линия Филлипса приведена только для тождественных бозонов. Следовало бы её построить и для другого рассматриваемого случая нетождественных частиц.

2) В столкновениях дипольных молекул для регуляризации использована только простейшая модель "жёсткой стенки". Интересно выяснить, насколько предсказания универсальной серии резонансов зависят от выбора именно такой модели.

3) Следовало бы указать, как предложенная теория фазы между несущей и огибающей описывает другие явления, чувствительные к фазе: генерация гармоник, изомеризация.

Высказанные замечания не снижают высокой оценки диссертационной работы.

Диссертация является законченной научно-исследовательской квалификационной работой, выполненной на высоком научном уровне и удовлетворяет всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 года, предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор – Руднев Владимир Александрович – заслуживает присуждения ему искомой ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Официальный оппонент

ведущий научный сотрудник Лаборатории теоретической физики
им. Н. Н. Боголюбова, Объединенного института ядерных исследований,
доктор физико-математических наук, профессор

Виницкий С.И.

Рабочий телефон: 8-49621- 63-348, E-mail: vinitsky@theor.jinr.ru

Подпись Виницкого Сергея Ильича удостоверяю

Ученый секретарь Лаборатории теоретической физики

им. Н. Н. Боголюбова, Объединенного
института ядерных исследований



Андреев А.В.

Лаборатория теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова, ОИЯИ,

Объединенный институт ядерных исследований,

ул. Жолио-Кюри, 6, г. Дубна, Московская обл., Россия, 141980;

E-mail: bltp@theor.jinr.ru, тел.: (+7-49621) 63-695