

**Отзыв официального оппонента**  
Розанова Николая Николаевича  
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

Работа Руднева Владимира Александровича «Исследование новых эффектов в стационарных и нестационарных системах нескольких тел» посвящена развитию теории квантовых систем нескольких тел в предельных режимах. С одной стороны, в ней исследованы столкновения в системах двух и трёх частиц при сверхнизких энергиях, подобные наблюдаемым в квантовых газах. С другой стороны, изучены процессы взаимодействия молекулярных ионов с полями коротких интенсивных лазерных импульсов. Актуальность этих задач подтверждается растущим количеством экспериментальных работ, посвящённых подобным системам. В обоих типах задач В.А. Рудневым получены новые важные результаты как методического характера, касающиеся новых подходов к прямому решению квантовой задачи нескольких тел, так и физические результаты, выявляющие новые закономерности в исследованных системах.

Диссертация состоит из введения и шести глав, разделённых на две части. Во введении автор приводит обоснование актуальности работы, четко описывает её цели и задачи, формулирует положения, выносимые на защиту.

Первая часть посвящена пороговым эффектам в системах нескольких тел. В первой главе автором формулируются подходы к построению высокоэффективных вычислительных схем решения уравнений квантовой механики в стационарной постановке. Диссертантом предложено использовать правое предобуславливание дискретизованных систем уравнений Фаддеева для сокращения эффективной размерности пространства решения. Также предложено использование асимптотически оптимальных сеток при решении трёхчастичных задач, показано, что их применение позволяет существенно повысить точность решения задачи трёх тел.

Вторая глава посвящена применению подходов, описанных в первой главе, к решению трёхчастичных задач. Уделено большое внимание оценке точности предложенной диссертантом схемы на примере системы трёх атомов гелия. Подробно исследованы погрешности, возникающие при малых вариациях констант связи на пороговые наблюдаемые. Показано, что для некоторых моделей предложенная схема позволяет решать задачу трёх тел с точностью, определяемой физическими пределами вариации константы связи. На основе апробированной схемы выполнено исследование соотношений между длиной рассеяния частицы на связанной паре и энергией околупорогового состояния. Показано, что при наличии слабосвязанных двухчастичных подсистем для трёхчастичных наблюдаемых выполняется новое универсальное соотношение, подобное описываемой линией Филлипса.

Третья глава посвящена исследованию двухчастичного рассеяния ориентированных полярных молекул. Показано, что в таких системах могут наблюдаться универсальные серии пороговых резонансов. Приведена классификация таких резонансов и предложен возможный сценарий их экспериментального наблюдения.

Вторая часть посвящена исследованию квантовых систем в полях сильных коротких лазерных импульсов. Глава 4 посвящена методу скалированных координат. Автором

продемонстрирована связь между волновой функцией в скалированных координатах и волновой функцией в импульсном представлении, позволяющая получать распределение фрагментов реакции по импульсам без использования интегральных преобразований. Метод применён для исследования моделей фотодиссоциации положительного молекулярного иона водорода в поле короткого сильного лазерного импульса. Показана чувствительность конечного состояния к фазе импульса, отмечено, что распределение фрагментов реакции по скоростям демонстрируют большую чувствительность к фазе, нежели угловое распределение фрагментов реакции.

Глава 5 посвящена оценке наблюдаемости фазовых эффектов для положительного молекулярного иона водорода в реалистическом сценарии эксперимента. Выявлены возможные условия наблюдения фазовых эффектов при фотодиссоциации молекулярного иона в поле сильного короткого лазерного импульса.

В главе 6 приводится теоретическое объяснение фазовых эффектов при взаимодействии произвольной квантовой системы с импульсом электромагнитного поля. Теория применима к любым системам и импульсам, для которых справедливо дипольное приближение и возможно представление временной зависимости электрической напряженности электромагнитного поля в виде произведения огибающей амплитуды импульса на синусоиду с фиксированной частотой. На примере модели взаимодействия импульсного поля с двухуровневой системой выявлены качественные условия, при которых фаза импульса может существенно влиять на конечное состояние квантовой системы.

Научная значимость диссертации определяется как актуальностью проведённых исследований, так и новизной полученных результатов, что подтверждается широким цитированием статей автора, положенных в основу диссертационной работы.

К основным результатам работы можно отнести установление связи между универсальным режимом взаимодействия в трёхчастичной системе (эффектом Ефимова) и наличием универсальных корреляций между трёхчастичными наблюдаемыми (линией Филлипса), предсказание фазовых эффектов в процессах фотодиссоциации молекул, построение теории фазовых эффектов. Эти результаты во многом опираются на развитые автором новые высокоэффективные методы прямых квантовомеханических расчётов стационарных и нестационарных систем нескольких тел. В этом отношении представляет особый интерес использование асимптотически оптимальных сеток, а также высокоэффективный метод построения собственных состояний трёхчастичного гамильтониана на основе быстрого алгоритма распространения решения во мнимом времени. Важным результатом представляется и выявление прямой связи между асимптотикой решения нестационарного уравнения Шредингера в скалированных координатах и волновой функцией в импульсном представлении.

К изложению материала можно сделать следующие замечания. В части 1 следовало бы оговорить чувствительность результатов к граничным условиям (например, типа «жёсткой стенки»).

Не ясны допущения, сделанные в задаче о столкновениях молекул при переходе к стационарному уравнению Шредингера (3.4).

В части 2 на стр. 124 чрезмерно общим выглядит утверждение о том, что эффекты длительности электромагнитного импульса стали доступны для наблюдения лишь в 2000-х годах. Действительно, в нелинейной оптике, например, эффект самоиндуцированной прозрачности известен с 1960-х годов.

Следовало бы уточнить расчетный критерий состоявшейся диссоциации и ионизации.

Неудачной представляется характеристика импульса средним значением

напряженности поля, поскольку эта величина размерная и не ясен смысл утверждения на стр. 154, что она менее  $10^{-8}$ . Предпочтительно использование степени униполярности импульса, определяемой как отношение модуля интеграла от напряженности поля по времени к интегралу от модуля напряженности.

Как указано на стр. 154, величина  $\rho$  – цилиндрическая (полярная) координата. Поэтому не ясно, почему в интегралах на стр. 157 и 158 в элементе объема или площади фигурирует дифференциал  $d\rho$ , а не  $\rho d\rho$ .

Традиционно огибающая импульса вводится соотношением  $E_r(t) = \text{Re}[E(t)\exp(-i\omega t - i\varphi)]$ . Использованное в уравнении (6.2) выражение является только частным случаем общего соотношения применительно к случаю строго постоянной фазы  $\varphi$ .

В разделе 6.1 полезно было бы сравнить использованный метод многомерного времени с широко распространенным асимптотическим методом многомасштабных разложений.

Общая характеристика ограничений на применимость результатов главы 6 с теорией влияния фазового сдвига между огибающей импульса и несущей (стр. 210) на взаимодействие коротких электромагнитных импульсов с квантовыми системами представляется неполной. В действительности само понятие огибающей импульса и, соответственно, фазового сдвига теряют смысл для предельно коротких импульсов, причем субцикловые электромагнитные импульсы уже получены экспериментально в терагерцовой области спектра. Заметим также, что в диссертации рассматривались импульсы с низкой степенью униполярности, тогда как взаимодействие с системами, содержащими электрические заряды, наиболее эффективно как раз для импульсов с высокой степенью униполярности.

В оформлении текста встречаются неточности и опечатки. Например, не определен параметр  $D$ , дважды встречающийся в подстрочном примечании к стр. 208. Ссылки [135] и [136] отсылают две различные статьи на один и тот же журнал, год публикации, выпуск и страницу.

Высказанные замечания не умаляют ценности представленной работы. Представленные в диссертации результаты имеют несомненную научную ценность и вносят существенный вклад в методы прямого решения стационарных и нестационарных задач нескольких тел, в физику пороговых явлений, в теорию взаимодействия квантовых систем со внешними полями.

Все выносимые на защиту положения и результаты являются новыми и получены при определяющем вкладе автора. Они достаточным образом аргументированы и широко представлены в материалах международных и российских конференций и в публикациях, в том числе в реферируемых высокорейтинговых журналах. Выводы диссертации обоснованы, полностью соответствуют поставленным задачам и логично вытекают из выполненных автором исследований. Практическая значимость результатов диссертационной работы подтверждается их широким использованием другими авторами в исследованиях стационарных и нестационарных систем нескольких частиц в атомной, молекулярной и ядерной физике. Автореферат полностью и ясно отражает содержание диссертации. Полученные диссертантом результаты могут быть использованы в СПбГУ, ОИЯИ, НИЦ «Курчатовский институт», АО «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова» и других научных центрах.

Диссертация является законченной научно-исследовательской работой, выполненной на высоком научном уровне и удовлетворяет требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением 842 Правительства Российской Федерации 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:

Розанов Николай Николаевич

доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН

шифр специальности оппонента: 01.04.05 – оптика.

начальник отдела

АО «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова»

199053, С.-Петербург, Кадетская линия В.О., дом 5, корпус 2

Рабочий телефон 8 (812) 328-47-79

E-mail: nnrosanov@mail.ru

07 мая 2018 года

