

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. Ломоносова

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ имени Д.В. Скобельцына

На правах рукописи
УДК 530.145

Виницкий Павел Сергеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВКЛАДА ЭФФЕКТОВ ВТОРОГО ПОРЯДКА В
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ СЕЧЕНИЯ РЕАКЦИЙ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ БЫСТРЫХ ЧАСТИЦ С ЛЕГКИМИ
АТОМАМИ**

01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2008

Работа выполнена на кафедре физики атомного ядра и квантовой теории столкновений в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук,
доцент

Ю. В. Попов

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор

Л. Д. Блохинцев

доктор физико-математических наук

В. В. Пупышев

Ведущая организация:

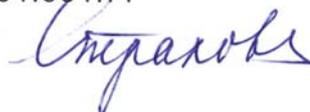
Российский университет дружбы народов,
г. Москва

Защита состоится “12” декабря 2008 г. в “15:00” часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 501.001.77 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119992, г. Москва, Ленинские Горы, корпус 19, ауд. 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИЯФ МГУ.

Автореферат разослан “10” ноября 2008 г.

Ученый секретарь совета Д 501.001.77
Профессор



—Страхова С. И. .

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Исследование столкновений в квантовых системах нескольких частиц математически корректными методами и в рамках физически правдоподобных моделей является сложнейшей задачей современной физики атомного ядра и элементарных частиц, ионов, атомов и молекул. Для систем нескольких частиц ядерного типа, т.е. в случае короткодействующих парных взаимодействий, математически корректное описание процессов рассеяния было впервые предложено Л.Д. Фаддеевым и О.И. Якубовским. Однако, задача столкновения нескольких заряженных частиц до сих пор не решена в полном объеме. В недавних обзорах В. В. Пупышева по современному состоянию этой теории подчеркивалось, что теоретические исследования столкновений в типичных для ядерной, атомной и молекулярной физики системах заряженных частиц представляются исключительно актуальными и важными.

В настоящей диссертации представлены результаты одного из таких исследований, а именно, анализ вклада эффектов второго порядка (перерассеяний) в дифференциальные сечения реакций взаимодействия быстрых частиц с легкими атомами на фоне различных процессов многократной ионизации первого порядка. Объектами исследования являются метод электронной импульсной спектроскопии (ЭИС, в литературе на английском языке EMS - electron-momentum spectroscopy) и реакция захвата электрона быстрым протоном из атомной мишени.

В основе ЭИС лежит процесс квазиупругого выбивания одного или двух электронов из квантовой мишени быстрым падающим электроном (так называемые процессы $(e,2e)$ или $(e,3e)$ при большой передаче импульса). Измерение углового распределения пары быстрых электронов с примерно равными энергиями и углами разлета в процессе выбивания быстрым налетающим электроном атомного

электрона позволяет сделать важные заключения об импульсном распределении связанного электрона в квантовой мишени, т.е. "заглянуть" вглубь и изучить структуру квантового объекта. Наиболее полно этот метод описан в работах В. Г. Неудачина, Ю. В. Смирнова, Ю. В. Попова, Е. Вейголда, И. Е. МакКарти и др.

Теория рассматриваемого метода прямого зондирования атомных мишеней базируется на доминировании в амплитудах ($e, 2e$) и ($e, 3e$) процессов первого борновского приближения (FBA - first Born approximation) или плосковолнового импульсного приближения (plane wave impulse approximation - PWIA), являющегося первым членом ряда Борна-Фаддеева разложения амплитуды рассеяния и учитывающего искаженную волну лишь в (ee)-канале. Реальный вклад высших борновских членов до сих пор основательно не изучался, однако, его оценки с точки зрения информативности метода ЭИС крайне важны по следующим причинам.

Во-первых, чем больше энергия падающего электрона, тем существенно меньше дифференциальное сечение и труднее его экспериментальное измерение. Поэтому речь может идти о компромиссных (промежуточных) энергиях, при которых вклад высших борновских членов может быть отнюдь не асимптотически мал.

Во-вторых, для оценки применимости приближения первого порядка необходимо провести расчет, по крайней мере, членов второго порядка, а для высших борновских членов, которые описываются условно расходящимися интегралами, необходимо построить процедуру перенормировки, определенным образом выделяя и отбрасывая расходящиеся слагаемые. Такая процедура была предложена в работах Ю. В. Попова и Ж. Зорбаса. Ими было показано, что вопреки широко распространенному мнению, PWIA не является адекватным приближением для описания квазиупругих атомных процессов и лучше работать в рамках традиционных борновских

приближений, где в качестве малых параметров выступают кулоновские параметры Зоммерфельда каналов рассеяния.

В-третьих, на этом фоне требуется разработать удобную численно-аналитическую схему расчета многомерных интегралов, описывающих высшие слагаемые борновского ряда с учетом процедуры перенормировки.

Таким образом, оценка вклада высших борновских слагаемых в амплитуды и дифференциальные сечения многократных ионизационных процессов представляется чрезвычайно актуальной задачей, поскольку без такой оценки ценность метода, основанного на доминировании первого борновского приближения, становится необоснованной. Следует отметить, что последовательного теоретического исследования области применимости метода ЭИС и его основообразующего приближения PWIA до сих пор не проводилось.

Решение этой проблемы необходимо для анализа серии недавних экспериментов ЭИС по однократной и двукратной ионизации атома гелия быстрым электроном при больших переданных импульсах, выполненных японскими учеными в Университете Тохоку. Эти эксперименты позволили существенно сузить круг приемлемых пробных волновых функций атома-мишени, которые правильно воспроизводят форму измеренных импульсных распределений, однако при этом проявилось расхождение теоретических оценок и экспериментальных данных по абсолютной величине сечений, природа которого пока до конца не ясна. Она может порождаться как качеством пробной волновой функции многоэлектронной мишени, так и вкладом динамических механизмов, описываемых вторым и высшими борновскими приближениями.

Как отмечалось выше, изучение степени информативности метода исследования строения квантового объекта является чрезвычайно актуальной задачей теории рассеяния. В этой связи

реакция захвата протоном электрона из атомной мишени и метод детектирования на совпадение продуктов реакции захвата при сверхмалых углах рассеяния образовавшегося атома водорода в свете недавних экспериментов, выполненных на спектрометре COLTRIMS (cold target recoil ion momentum spectroscopy) в Институте ядерной физики Университета Франкфурт (г.Франкфурт, Германия), могли бы рассматриваться и как альтернативные, и как дополнительные методу ЭИС. И в этом случае исследование поправок к плоскотоволновому приближению Оппенгеймера-Бринкмана-Крамерса (ОБК), содержащему прямую информацию об электронных корреляциях в атоме-мишени, является исключительно важным, поскольку эти поправки могут оказаться существенными и значительно исказить эту информацию.

- **Цель диссертационной работы** – исследование вклада эффектов второго порядка в дифференциальные сечения реакций взаимодействия быстрых частиц с легкими атомами на фоне различных процессов многократной ионизации первого порядка, которая содержит прямую информацию о структуре и электронных корреляциях в атоме-мишени и обозначает область применения методов ЭИС или детектирования на совпадение продуктов реакции захвата.

Достижение цели диссертационной работы осуществляется решением следующих **задач**:

- построение интегральных представлений матричных элементов второго борновского приближения для амплитуды рассеяния, создание и реализация численно-аналитических схем для расчета поправок в методе ЭИС, включающих процедуру перенормировки -- устранение расходимостей интегральных представлений;
- исследование механизмов многократных перерассеяний и эффектов корреляции электронов при квазиупругом столкновении электрона с

легким атомом, оставляющем ион в возбужденном или двукратно-ионизованном состоянии, и анализ недавних экспериментов по ионизации атома гелия с большой передачей импульса;

- исследование влияния условий Като на угловую зависимость дифференциальных сечений $(e, 2e)$ - и $(e, 3e)$ - реакций;
- построение и реализация численно-аналитических схем вычисления борновских членов (в том числе ряда Борна-Фаддеева) и исследование поправок к плосковолновому приближению Оппенгеймера-Бринкмана-Крамерса в случае реакции захвата электрона быстрым протоном из атома-мишени, включая анализ экспериментов по реакции перезарядки на атоме водорода и ионизации атома гелия при сверхмалых углах рассеяния образовавшегося атома водорода.

Новые результаты, полученные в диссертации:

1. Сформулирован общий формализм устранения расходимостей матричных элементов высших борновских плосковолновых приближений, описывающих механизмы многократных перерассеяний в квазиупругих $(e, 2e)$ - и $(e, 3e)$ -реакциях с большой передачей импульса. Определена процедура перенормировки расходящихся интегралов, описывающих матричные элементы процессов перерассеяния.
2. Построены интегральные представления матричных элементов второго борновского приближения для одноэлектронной задачи в случае квазиупругой $(e, 2e)$ -реакции и произведен соответствующий расчет дифференциального сечения реакции рассеяния быстрого электрона на атоме водорода в ЭИС кинематике. Выявлен эффект «негативного» роста сечения при учете возбуждения промежуточного континуума атома водорода во втором порядке

теории возмущений, который исчезает при включении в рассмотрение высших борновских членов.

3. Получены интегральные представления матричных элементов второго борновского приближения для двухэлектронной задачи в случае квазиупругой $(e,2e)$ -реакции с возбуждением конечного иона и $(e,3e)$ -реакции. Произведен расчет в контактном приближении дифференциального сечения $(e,3e)$ -реакции рассеяния быстрого электрона на атоме гелия в ЭИС кинематике. Показано, что вклад возбуждений промежуточного однозарядного иона гелия обеспечивает основной прирост дифференциального сечения.
4. Выполнен расчет в рамках PWIA дифференциальных сечений $(e,2e)$ -реакции с возбуждением конечного иона и $(e,3e)$ -реакции на атоме гелия. Показано, что пробные волновые функции атома гелия с энергией связи близкой к экспериментальной дают практически совпадающие между собой импульсные профили, по форме близкие к экспериментальным. Подтвержден вывод о том, что, в отличие от $(e,2e)$ -реакции без возбуждения иона остатка, квазиупругие реакции с большой передачей импульса, оставляющие ион в возбужденном и даже ионизованном состоянии, являются значительно более чувствительными к электронным корреляциям в атоме-мишени, не учитываемым в рамках хартри-фоковского описания.
5. Исследовано влияние условий Като на качество дифференциальных сечений, для чего построена удобная для расчетов вариационная функция гелия, удовлетворяющая "усредненным" условиям типа Като как в области парных, так и тройных соударений. Высокое качество этой пробной функции подтверждено расчетами дифференциальных сечений дипольных $(e,3e)$ -реакций с малой передачей импульса. Показано, что эта же

функция в случае квазиупругих $(e, 2e)$ -реакций с возбуждением конечного иона и $(e, 3e)$ -реакций ни чем не лучше других приемлемых пробных функций атома гелия.

6. Выполнен численный расчет многомерных интегралов, описывающих матричные элементы второго борновского приближения в случае реакции захвата быстрым протоном электрона из атомной мишени при сверхмалых углах рассеяния образовавшегося атома водорода. Расчеты проводились как в приближении плоских волн борновского ряда, так и в приближении искаженных волн ряда Борна-Фаддеева.
7. Показана несостоятельность сформулированной ранее гипотезы о том, что при очень малых углах рассеяния конечного атома водорода можно использовать реакции захвата с целью угловой спектроскопии электронных корреляций в атоме-мишени. Установлено, что этот факт является следствием существенного вклада эффектов перерассеяния.
8. Созданы и реализованы доступные фортрановские программы расчета многомерных интегралов матричных элементов с учетом процедуры перенормировки и с применением широко используемого в физике элементарных частиц преобразования Лапласа для вычисления диаграмм Фейнмана, которое позволило в ряде случаев существенно понизить размерность интегралов.

Научная новизна. Сформулирован общий формализм устранения расходимостей матричных элементов высших борновских плосковолновых приближений, описывающих механизмы многократных перерассеяний в квазиупругих $(e, 2e)$ - и $(e, 3e)$ - реакциях с большой передачей импульса. Определена процедура перенормировки расходящихся интегралов. Построены интегральные представления матричных элементов второго борновского приближения для

одноэлектронной задачи в случае $(e, 2e)$ -реакции и двухэлектронной задачи в случае $(e, 2e)$ -реакции с возбуждением конечного иона и $(e, 3e)$ -реакции. Разработана соответствующая численно-аналитическая схема, проведены расчеты дифференциальных сечений рассматриваемых реакций в приближениях второго порядка и выполнен анализ недавнего эксперимента по ионизации атома гелия быстрыми электронами с большой передачей импульса. Предложен способ сопоставления результатов измерения дифференциальных сечений однотипных квазиупругих реакций, позволяющий их рассматривать в квази-абсолютной шкале.

Показано, что вклад возбуждения промежуточного континуума атома водорода во втором порядке теории возмущений компенсируется включением высших борновских членов, а в случае атома гелия вклад возбуждений промежуточного однозарядного иона гелия обеспечивает основной прирост дифференциального сечения и приближает теоретические предсказания к экспериментальным данным, что подтверждается результатами недавних работ в этой области.

Проведен расчет амплитуды реакции захвата электрона быстрым протоном из атомной мишени, в том числе и с одновременной ионизацией иона остатка, в приближениях второго порядка как с плоскими, так и с искаженными волнами. Выполнен анализ экспериментов и показана несостоятельность сформулированной ранее гипотезы, о том, что при очень малых углах рассеяния образовавшегося атома водорода можно использовать реакции захвата для угловой спектроскопии электронных корреляций в мишени.

Практическая значимость. Диссертационная работа является теоретическим и прикладным исследованием. Сформулированная процедура перенормировки расходящихся интегралов позволяет теперь проводить компьютерные расчеты процессов второго и более

высоких порядков в случае реакций с быстрыми заряженными частицами как в атомной, так и в ядерной физике. Построенные интегральные представления матричных элементов первых и вторых борновских приближений могут использоваться как базовые для проведения расчетов другими исследователями. Кроме того, разработанные численно-аналитические алгоритмы и программы вполне применимы для исследования других кинематически подобных реакций.

Развитый подход использовался для анализа экспериментов ЭИС, выполненных в Университете Тохоку (г. Сендай, Япония) и экспериментов по реакции захвата протоном электрона из гелиевой мишени, выполненных с помощью спектрометра COLTRIMS в Институте ядерной физики Университета Франкфурта-на-Майне, а также в совместных проектах с Университетом им. Поля Вердена (г. Метц, Франция).

Результаты, представленные в диссертации, могут найти и частично уже нашли применение в теоретических и экспериментальных исследованиях свойств атомных ядер, атомов, молекул и тонких пленок с помощью реакций взаимодействия быстрых заряженных частиц, которые проводятся в российских и зарубежных научных центрах, например, в НИИЯФ МГУ, в Институте атомной энергетики (г. Обнинск), в ОИЯИ (г. Дубна), РНЦ " Курчатowski институт", в Университете им. Поля Вердена (г. Метц, Франция) и в Университете Тохоку (г. Сендай, Япония).

Апробация результатов. Материалы диссертации докладывались на следующих конференциях: "Int. Conf. on Electron and Photon Impact Ionization and Related Topics" (Франция, Метц, 2002), ICPEAC XVIII (Швеция, Стокгольм, 2003), ISIAC XVIII (Хельсинки, Финляндия, 2003), Workshop on Computational Physics Dedicated to the Memory of Stanislav Merkuriev (Россия, Санкт-Петербург, 2003), "Летняя Школа по Физике Фонда Династия" (Россия, Москва, 2004), "Int. Symp. on (e,2e), Double

Photoionization and Related Topics" (Германия, Кенигштайн, 2004), "Математические идеи П.Л. Чебышева и их приложение к современным проблемам естествознания" (Россия, Обнинск, 2004), ECAMP8 (Франция, Ренны, 2004), "Int. Conf. On Electron and Photon Impact Ionization and Related Topics" (Бельгия, Люван-ля-Нев, 2004), "Int. Symp. on (e,2e), Double Photoionization and Related Topics" (Аргентина, Буэнос-Айрес, 2005), ICPEAC XXIV (Аргентина, Розарио, 2005), "Int. Conf. on Many Particle Spectroscopy of Atoms, Molecules, Clusters and Surfaces" (Италия, Рим, 2006), "Int. Symp. on (e,2e), Double Photoionization and Related Processes" (Германия, Кенигштайн, 2007), "20th Eur. Conf. on Few-Body Problems in Physics" (Италия, Пиза, 2007).

Публикации. Основное содержание диссертации отражено в 32 публикациях [1-32]. Пять из них являются статьями в ведущих рецензируемых журналах [1,32,12,13,19]: Журнал экспериментальной и теоретической физики, Вестник МГУ, Phys.Rev. A , - и три доклада представлены в трудах ведущих международных конференций [20, 21, 25].

Личный вклад соискателя в проведение исследований и анализ полученных в диссертации результатов является определяющим. Ее автор, работая с сотрудниками НИИЯФ МГУ и Физического факультета МГУ, ЛТФ ОИЯИ, Университета им. Поля Вердена, Университета Тохоку, самостоятельно вывел аналитические представления амплитуд рассеяния, разработал все алгоритмы и программы, по которым проводились численные расчеты.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка. В последних разделах каждой главы представлены выводы и краткий анализ изложенных в ней исследований. Общий объем диссертации – 155

страниц, в т.ч. 35 рисунков. Список литературы включает 118 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность проблемы, сформулирована цель и задачи диссертации, схематично изложено ее содержание.

Глава 1 основана на работах [31,11, 25] и посвящена изложению основ теории ЭИС атомов как задачи нескольких заряженных частиц. Описаны основные приближения (плосковолновое борновское и импульсное приближения, приближение искаженных волн) и особенности, которые возникают при их использовании. Представлены все основные формулы в интегральном виде, что необходимо для разработки численно-аналитической схемы и может использоваться как справочный материал. Анализируются вопросы расходимости высших борновских членов для рассматриваемых процессов и обсуждается процедура их регуляризации.

В разделе 1.1 приведены основные формулы и выражения для расчета дифференциального сечения и амплитуды рассеяния в случае квазиупругой кинематики реакции, описаны основные обозначения, используемые в работе.

В разделе 1.2 дан анализ проблемы расходимости матричных элементов высших членов ряда теории возмущений. Сформулирован общий формализм перенормировки интегралов, описывающих механизмы многократных перерассеяний в квазиупругих $(e,2e)$ - и $(e,3e)$ -реакциях с большой передачей импульса.

В разделе 1.3 с целью полноты изложения рассмотрено плосковолновое импульсное приближение и приведены формулы для амплитуды рассеяния $(e,2e)$ -реакции.

В разделе 1.4 на основе фаддеевской редукции уравнения Шредингера выведена удобная формула для амплитуды $(e,2e)$ -реакции,

являющаяся основой большинства приближений искаженных волн, включающая как искажения в начальном, так и конечном состоянии системы трех заряженных частиц. Показано, что из нее следуют и простейшее плосковолновое FBA приближение, и PWIA приближение.

В главе 2 представлена предложенная в [32] схема расчета поправок плосковолновой теории возмущений, который заключается в вычислении многомерных интегралов матричных элементов, что требует разработки эффективных компьютерных программ их вычисления. Исследование выполнено на примере рассеяния электронов на атоме водорода в рамках кинематики ЭИС, где матричные элементы высших борновских диаграмм описываются к тому же расходящимися интегралами и требуют физически обоснованных перенормировок. Все полученные формулы запрограммированы, и, кроме того, выполнен расчет в контактном приближении.

В разделе 2.1 представлены основные формулы для вычисления амплитуды рассеяния рассматриваемого процесса.

В разделе 2.2 дано описание плосковолновых борновских приближений в виде интегралов в импульсном представлении до второго порядка включительно. Отдельно описана процедура перенормировки в данном частном случае. Второе борновское приближение сформулировано, в частности, в контактном приближении, которое часто используется для проведения оценочных расчетов в случае больших энергий столкновения.

В разделе 2.3 представлены и проанализированы результаты численных расчетов. Вычислены дифференциальные сечения рассеяния в первом и во втором порядках теории возмущений в контактном приближении и с использованием конечной $3C$ -функции, являющейся произведением трех кулоновских волн непрерывного спектра и имеющей правильную асимптотику во всех двухчастичных

каналах (одна из известных разновидностей приближения искаженных волн). На основе полученных результатов показано, что в случае одноэлектронной системы возбуждение промежуточного континуума во втором порядке ухудшает качество приближения. Показано, что для улучшения точности расчетов надо использовать не плосковолновую теорию возмущений, а разложения Борна-Фаддеева (базис искаженных волн), не смотря на то, что базис плоских волн чрезвычайно удобен, а теория перенормировок ряда Борна-Фаддеева пока не развита.

В главе 3 на основе работ [13,19-21, 25] исследованы процессы перерассеяния и строения атома-мишени в реакциях типа $(e,2e)$ и $(e,3-1e)$ в случае простейшей многоэлектронной мишени – атома гелия. В результате показано, что этот атом является фундаментальным объектом для теоретического исследования таких реакций, а явные парные корреляции электронов, связанных в кулоновском поле ядра необходимо учитывать в процессах ионизации.

В разделе 3.1 приведены общее выражение для амплитуды рассеяния и интегральные представления матричных элементов первого и второго порядков плосковолновой теории возмущений для квазиупругих реакций.

В разделе 3.2 представлены результаты PWIA расчетов для $(e,2e)$ - и $(e,3-1e)$ -процессов с использованием различных пробных волновых функций основного состояния атома гелия, включающих в себя (ee) -корреляции различной сложности. Стоит подчеркнуть, что вследствие этих корреляций энергия связи атома гелия почти на 30% меньше того значения, которое получается в отсутствие взаимодействия между электронами. Показано, что реакции $(e,2e)$ с возбуждением иона-остатка и реакции $(e,3-1e)$ при больших значениях переданного импульса чрезвычайно чувствительны к электронным корреляциям начального состояния атома-мишени. Кроме того, обнаружено, что

пробные функции, энергии связи которых близки к экспериментальному значению до третьего знака, дают практически совпадающие импульсные профили в широком диапазоне изменения импульса q , качественно соответствующие форме экспериментальных распределений. В рамках сформулированной квази-абсолютной шкалы для схожих по кинематике $(e, 2e)$ - и $(e, 3-1e)$ - экспериментов установлено заметное отличие интенсивности экспериментальных и расчетных профилей. Предложено искать источник этого различия в динамике реакции за рамками PWIA приближения.

В разделе 3.3 определена процедура перенормировки расходящихся интегралов в случае двухэлектронной задачи.

В разделе 3.4 приведены результаты численных расчетов дифференциального сечения квазиупругой $(e, 3-1e)$ -реакции на атоме гелия в контактном приближении с усредненным учетом полного спектра возбуждений промежуточного виртуального однозарядного иона гелия при промежуточных начальных энергиях. Показано, что вследствие возбуждений этого иона возникают заметные различия между расчетами дифференциального сечения в первом и втором плосковолновых борновских приближениях. Это утверждение совпадает с выводами других авторов.

В разделе 3.5 дан анализ интенсивно обсуждаемого в настоящее время влияние классических условий Като для точной волновой функции многоэлектронной системы на угловую зависимость дифференциальных сечений реакций ионизации различной кратности. Для исследования этого влияния предложена удобная для расчетов вариационная волновая функция основного состояния атома гелия, которая удовлетворяет усредненным условиям Като и дает необходимую точность для энергии основного состояния.

Показано, что в случае квазиупругих $(e, 2e)$ -процессов с возбуждением конечного иона и $(e, 3-1e)$ -реакций не выделяется на фоне других

приемлемых пробных функций атома гелия, не удовлетворяющих этим условиям.

Глава 4 посвящена исследованию [1,12] реакции захвата электрона быстрым протоном из гелиевой мишени, в том числе и с одновременной ионизацией иона-остатка. Уникальность исследуемой реакции состоит в том, что надежно детектируемый угол рассеяния образовавшегося быстрого атома водорода может быть крайне малым ($\sim 0.1-0.5$ мрад). Такие реакции представляется возможным использовать в качестве метода, альтернативного методу ЭИС. Для проверки этой гипотезы был проведен ряд расчетов в случае атомов гелия и водорода.

В разделе 4.1 кратко изложены теоретические подходы к описанию реакций захвата, и выбрана схема, используемая в настоящей диссертационной работе.

В разделе 4.2 перечислены основные формулы для описания столкновения протона с атомами водорода и гелия. Выведены интегральные представления матричных элементов для плосковолновых борновских приближений и приближений Борна-Фаддеева.

В разделе 4.3 проанализированы результаты оценочных расчетов в приближении ОБК для атома гелия и в результате доказана эквивалентность ОБК-приближения и PWIA-приближения в теории ЭИС. Согласно выполненным расчетам, поправки к приближению ОБК не убывают с ростом энергии пучка, как это имеет место в методе ЭИС, и весьма существенны в некоторых угловых диапазонах. Показано, что, в отличие от ЭИС, FBA в реакциях захвата включает три слагаемых, равносильных по их вкладу в дифференциальное сечение, а наличие именно этих слагаемых искажает прямую информацию о волновой функции мишени, содержащуюся в ОБК члене. Эти выводы подтверждены численными расчетами дифференциальных сечений

реакции перезарядки на атома водорода вплоть до второго порядка теории возмущений как с плоскими, так и искаженными волнами. В итоге установлена несостоятельность гипотезы, о том, что реакции захвата при сверхмалых углах рассеяния водорода можно использовать для целей прямой угловой спектроскопии электронных корреляций в мишени.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертации и их возможные применения.

Основные публикации по теме диссертации

1. Ю.В.Попов, О.Чулуунбаатар, С.И.Виницкий, У.Анкарани, К.Даль Каппелло, П.С.Виницкий. "Теоретическое исследование реакций $p + He = H + He^+$ и $p + He = H + e + He^{++}$ при сверхмалых углах рассеяния водорода", ЖЭТФ 122 (2002), 717-722.
2. Yu.V.Popov, L.U.Ancarani, C.Dal Cappello, O.Chuluunbaatar, S.I.Vinitsky, P.S.Vinitsky. "Notes on dynamics of transfer ionization processes at very small scattering angles". Abstracts of International Conference on Electron and Photon Impact Ionization and Related Topics (Metz, France 2002), p. P31.
3. A.A.Gusev, Yu.V.Popov, P.S.Vinitsky. "Semiclassical model of double ionization of helium atom", in Proc. SPIE "Saratov Fall Meeting 2001. Laser Physics and Photonics, Spectroscopy and Molecular Modeling", eds. V.L.Derbov, L.A.Melnikov, L.M.Babkov, 4706 (2002), 199 - 205.
4. Yu.V.Popov, O.Chuluunbaatar, S.I.Vinitsky, L.U.Ancarani, C.Dal Cappello, P.S.Vinitsky. "Notes on the transfer ionization reactions at super small scattering angles", JINR Preprint E4-2002-140 (2002).
5. Yu.V.Popov, P.S.Vinitsky, O.Chuluunbaatar, S.I.Vinitsky. "High velocity proton-atom collisions at supersmall scattering angles", Abstracts of contributed papers to XXIII ICPEAC (Stockholm, Sweden, 2003), v.2, p. Mo129.
6. P.S.Vinitsky, O.Chuluunbaatar, Yu.V.Popov. "Fast proton - hydrogen and proton - helium capture reactions at supersmall scattering angles: a comparative analysis". Book of Abstracts of Int. Symp. on (e,2e), Double Photoionization and Related Topics (Koenigstein, Germany, 2003), p. P22.
7. P.S.Vinitsky, O.Chuluunbaatar, Yu.V.Popov. "Fast proton - hydrogen and proton - helium capture reactions at supersmall scattering angles: a comparative analysis". Book of Abstracts of Workshop on Computational Physics Dedicated to the Memory of Stanislav Merkuriev (St Petersburg, Russia, 2003), p. 26.
8. P.S.Vinitsky, O.Chuluunbaatar, Yu.V.Popov. "Numerical calculations for fast proton-hydrogen charge-transfer reactions: Born-Faddeev approach". Abstracts of 8th Eur. Conf. on Atomic and Molecular Physics (ECAMP8) (Rennes, France, 2004), p. 3-133.
9. P.S.Vinitsky, O.Chuluunbaatar, Y.Khajuria, K.A.Kouzakov, Yu.V.Popov, M.Takahashi, Y. Udagawa, N.Watanabe. "Analysis of recent (e,3-1e) experiment at large momentum transfer in symmetric non-coplanar geometry". Abstracts of 8th

Eur. Conf. on Atomic and Molecular Physics (ECAMP8) (Rennes, France, 2004), p. 3-132.

10. P.S.Vinitsky, O.Chuluunbaatar, Y.Khajuria, K.A.Kouzakov, Yu.V.Popov, M.Takahashi, Y.Udagawa, N.Watanabe. "(e,3-1e) reactions at large momentum transfer: analysis of recent experimental results". Abstracts of Int. Conf. On Electron and Photon Impact Ionization and Related Topics (EPIIRT 04) (Louvain-la-Neuve, Belgium, 2004), p.P52.

11. В.А. Билык, П.С.Виницкий, Ю.В.Попов, В.Л.Шаблов. «Диagramмная техника в применении к теории рассеяния нескольких заряженных частиц». Тезисы докладов II Международной конф. «Математические идеи П.Л.Чебышева и их приложение к современным проблемам естествознания» (Обнинск, 2004), изд. ОГТУАЭ, 2004, с. 11-13.

12. P.S.Vinitsky, Yu.V.Popov, O.Chuluunbaatar. "Fast proton - hydrogen charge exchange reaction at small scattering angles". Phys. Rev. A 71 (2005), 12706 (9pp).

13. N. Watanabe, Y. Khajuria, M. Takahashi, Y. Udagawa, P. S. Vinitsky, Yu. V. Popov, O. Chuluunbaatar and K. A. Kouzakov. "(e,2e) and (e,3-1e) studies on double processes of He at large momentum transfer", Phys. Rev. A 72 (2005), 32705 (11pp).

14. N. Watanabe, Y. Khajuria, M. Takahashi, Y. Udagawa, P. S. Vinitsky, Yu. V. Popov, O. Chuluunbaatar, K. A. Kouzakov. "(e,3-1e) study on double ionization of helium at large momentum transfer", Abstracts of contributed papers to XXIV ICPEAC (Rosario, Argentina, 2005), v. 1, p. Th036.

15. P. S. Vinitsky, Yu. V. Popov, K. A. Kouzakov, N. Watanabe, M. Takahashi. "(e,2e) and (e,3-1e) studies on double processes of He at large momentum transfer: the second Born calculations", Abstracts of contributed papers to XXIV ICPEAC (Rosario, Argentina, 2005), v. 1, p. Th045.

16. N. Watanabe, Y. Khajuria, M. Takahashi, Y. Udagawa, P. S. Vinitsky, Yu. V. Popov, O. Chuluunbaatar and K. A. Kouzakov. "(e,2e) and (e,3-1e) studies on double processes of He at large momentum transfer". Book of Abstracts of Int. Symp. on (e,2e), Double Photoionization and Related Topics & XXIII Int. Symp. on Polarization, and Correlation in Electronic and Atomic Collisions (Buenos Aires, Argentina, 2005), p. T22.

17. P. S. Vinitsky, Yu. V. Popov, K. A. Kouzakov, N. Watanabe, M. Takahashi. "(e,3-1e) reactions at large momentum transfer", Book of Abstracts of Int. Symp. on (e,2e), Double Photoionization and Related Topics & XXIII Int. Symp. on Polarization, and Correlation in Electronic and Atomic Collisions (Buenos Aires, Argentina, 2005), p. T23.

18. P. S. Vinitsky, Yu. V. Popov, K. A. Kouzakov, N. Watanabe, M. Takahashi. "(e,2e) and (e,3-1e) studies on double processes on He at large momentum transfer: the second Born calculations", Book of Abstracts of Int. Symp. on (e,2e), Double Photoionization and Related Topics & XXIII Int. Symp. on Polarization, and Correlation in Electronic and Atomic Collisions (Buenos Aires, Argentina, 2005), p. P34.

19. C. Chuluunbaatar, I.V. Puzinin, P.S. Vinitsky, Yu.V. Popov, K.A. Kouzakov and C. Dal Cappello. "Role of the cusp conditions in electron-atom double ionization", Phys. Rev. A 74 (2006), 014703 (4pp).

20. P. S. Vinitzky, Yu. V. Popov, K. A. Kouzakov, N. Watanabe, M. Takahashi. "(e,3-1e) reactions at large momentum transfer" in "Correlations, polarization and ionization in atomic systems", AIP Conf. Proc. 811 (2006), 102-107.
21. N. Watanabe, Y. Khajuria, M. Takahashi, Y. Udagawa, P. S. Vinitzky, Yu. V. Popov, O. Chuluunbaatar and K. A. Kouzakov. "(e,2e) and (e,3-1e) studies on double processes of He at large momentum transfer" in "Correlations, polarization and ionization in atomic systems", AIP Conf. Proc. 811 (2006), 96-101.
22. K. A. Kouzakov, P. S. Vinitzky, Yu. V. Popov and C. Dal Cappello. "Electron impact ionization of atoms at large momentum transfer: renormalized plane wave first-order models", Abstracts of Int. Conf. on Many Particle Spectroscopy of Atoms, Molecules, Clusters and Surfaces (Rome, Italy, 2006), p.91.
23. C. Chuluunbaatar, P.S. Vinitzky, Yu.V. Popov, K.A. Kouzakov and C. Dal Cappello. "Electron-helium double ionization: role of the cusp conditions", Abstracts of Int. Conf. on Many Particle Spectroscopy of Atoms, Molecules, Clusters and Surfaces (Rome, Italy, 2006), p.101.
24. K. A. Kouzakov, P. S. Vinitzky, Yu. V. Popov and C. Dal Cappello. "Electron-atom ionization near the Bethe ridge: revision of plane wave first-order theories", Preprint physics/0610113 (http://lanl.arxiv.org/PS_cache/physics/pdf/0610/0610113.pdf) (2006), 16pp.
25. K. A. Kouzakov, P. S. Vinitzky, Yu. V. Popov and C. Dal Cappello. "Electron impact ionization of atoms at large momentum transfer: renormalized plane wave first-order models", J. Electron Spectrosc. Rel. Phenom. 161 (2007), 35-37.
26. P.S. Vinitzky, K.A. Kouzakov, Yu.V. Popov. "Higher-order Born calculations for (e,2e) reactions at large momentum transfer", Abstracts of 9th Eur. Conf. on Atomic and Molecular Physics (ECAMP9) (Crete, Greece, 2007), p. Tu1-29.
27. P.S. Vinitzky, K.A. Kouzakov, Yu.V. Popov, C. Dal Cappello. "(e,2e) reactions near the Bethe-ridge: an analysis of first-order models", Abstracts of 9th Eur. Conf. on Atomic and Molecular Physics (ECAMP9) (Crete, Greece, 2007), p. Tu1-30.
28. K. A. Kouzakov, P. S. Vinitzky, Yu. V. Popov, C. Dal Cappello. "Higher-order effects in electron-hydrogen ionization at high impact energy and large momentum transfer", Abstracts of contributed papers to XXV ICPEAC (Freiburg, Germany, 2007), p. Tu064.
29. Yu. V. Popov, K. A. Kouzakov, P. S. Vinitzky, N. Watanabe, M. Takahashi, and C. Dal Cappello. "Second-order electron momentum spectroscopy", Abstracts of 14th Int. Symp. on Polarization and Correlation in Electronic and Atomic Collisions and the Int. Symp. on (e,2e), Double Photoionization and Related Processes (Königstein, Germany, 2007), p. It10.
30. K. A. Kouzakov, P. S. Vinitzky, and Yu. V. Popov. "Higher-order approximations to electron-atom ionization at high impact energy and near the Bethe ridge", Abstracts of 20th Eur. Conf. on Few-Body Problems in Physics (Pisa, Italy, 2007), p. 157.
31. П.С. Виноцкий. "Исследование методов прямого зондирования квантовой структуры атома пучком быстрых частиц", Тезисы XLIII Всероссийской Конференции по Проблемам Математики, Информатики, Физики и Химии (Москва, Россия, 2007), изд. РУДН, стр. 19.
32. П.С. Виноцкий, К.А. Кузаков, Ю.В. Попов, К. Даль Каппелло. "Исследование вклада эффектов высших порядков в процесс (e,2e) на атоме водорода", Вестник МГУ, сер.3: физика, астрономия (2008), №1, 28-32.

Автореферат

Виницкий Павел Сергеевич

Исследование вклада эффектов второго порядка в дифференциальные сечения реакций взаимодействия быстрых частиц с легкими атомами

Работа поступила в ОНТИ: 22 октября 2008 года

Тираж: 100 экз.

Отпечатано в типографии КДУ

Тел./факс: (495) 939-57-32. E-mail: press@kdu.ru