

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук Новикова Николая Викторовича на тему «Сечения перезарядки и распределение по зарядам в пучках ускоренных ионов, проходящих через газообразные и твердые мишени» по специальности 01.04.20 – «Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника»

Диссертация Н.В.Новикова посвящена исследованию особенностей прохождения ускоренных многозарядных ионов через вещество, сопровождаемого изменением их заряда и энергии.

Физика протекающих явлений в таких условиях многообразна и давно привлекает внимание исследователей, что обусловлено фундаментальным характером происходящих процессов. Эта область науки является интенсивно развивающейся. С появившимися техническими возможностями получать и ускорять тяжелые многозарядные ионы интерес к проблеме использования пучков ионов высокой энергии в ядерной физике и физике конденсированного состояния значительно возрос. Потребность в получаемых при этом результатах обусловлена, в частности, развитием ускорительной техники, радиационного материаловедения и ядерной медицины, планированием и проведением фундаментальных исследований на современных экспериментальных установках. Таким образом, актуальность проблем и задач, решаемых в диссертации Н.В.Новикова, сомнений не вызывает.

В диссертации Н.В.Новикова проведено исследование процессов изменения заряда многозарядных ионов в газовых и конденсированных средах. Задачи о взаимодействии многочастичных атомных систем с перераспределением, которые решал соискатель в своем диссертационном исследовании, достаточно сложны и многообразны. Для их решения требуется не только привлечение различных адекватных решаемым задачам

приближений, но и разработка новых методов. Автором впервые разработаны эмпирические и квантово-механические методы расчета сечений подхвата и потери электронов ускоренными ионами средних энергий, исследовано влияние процессов подхвата и потери электронов многозарядными ионами на особенности зарядовых распределений при прохождении через мишени конечной толщины и отражений от поверхности твердых тел.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Содержит 233 страницы текста, 54 рисунка, 34 таблицы и список литературы из 247 наименований.

Во введении автором кратко описаны история и состояние исследований в области физики взаимодействия многозарядных ионов с веществом к моменту начала работы, дано обоснование актуальности и необходимости проведения дальнейших исследований, сформулированы решаемые задачи и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе дан подробный обзор экспериментальных, теоретических и эмпирических методов оценки зарядового распределения ускоренных ионов, проходящих через вещество. Проведен критический анализ различных методов и приближений в решении такой сложной задачи, как столкновения многоэлектронных атомов с перераспределением. В частности, автором обращено внимание на ряд явлений, обнаруженных экспериментально в последние годы, которые объясняются влиянием эффектов перезарядки многозарядных ионов при их прохождении через различные среды. Рассмотрены особенности формирования энергетических, угловых и зарядовых распределений ионов, отраженных от поверхности, методы моделирования и имеющиеся компьютерные программы для расчетов потерь энергии и неравновесных зарядовых распределений ускоренных ионов, а также область применения этих программ.

Вторая глава диссертации посвящена описанию используемых квантово-механических моделей для расчетов сечений потери и захвата электрона быстрыми ионами. Теоретическое описание потери электрона быстрыми ионами и атомами традиционно основано на борновском приближении и приближении Хартри–Фока для описания электронных состояний в ионе и атоме мишени. Для вычислений сечений подхвата и потери электронов быстрыми ионами автором предложена модификация этой модели, в которой каналы возбуждения атома мишени учтены в явном виде. В основу модели положено хорошо известное приближение Оппенгеймера–Бринкмана–Крамерса, которое модифицировано для учета кулоновского взаимодействия ионов в конечном состоянии. Результаты расчетов в предложенной теоретической модели описания процесса захвата электрона быстрым ионом показали, что взаимодействие ионов в конечном состоянии уменьшает величину сечения. Физическая причина состоит в том, что кулоновское взаимодействие иона с остовом атома мишени выталкивает ион из области малых межъядерных расстояний и таким образом уменьшает вероятность захвата ионом одного из электронов атома мишени. Рассчитанная зависимость сечения захвата электрона быстрым ионом от энергии с учетом кулоновского взаимодействия ионов неплохо совпадает с экспериментальными данными. Для проведения квантово-механических расчетов сечения захвата электрона в возбужденное состояние быстрого иона автором были получены аналитические волновые функции возбужденных состояний более 150 возбужденных атомов и ионов.

Третья глава посвящена описанию эмпирического метода расчета сечений перезарядки в газообразных и твердотельных мишенях, который основан как на экспериментальных данных о сечениях, так и на теоретических оценках зависимости этих сечений от энергии и заряда ионов, а также на корректировке сечений перезарядки в твердотельной мишени. В результате проведенной компиляции экспериментальных и теоретических данных о сечениях потери и захвата электронов ионами, о равновесных

зарядовых фракциях и параметрах равновесного зарядового распределения ускоренных ионов автором была создана информационная база данных, которая позволяет осуществлять быстрый поиск информации, ее наглядное представление, сравнение и анализ. Глава завершается описанием кода Charge–Changing Cross Sections, который был разработан автором для вычисления сечений потери и захвата одного и двух электронов ионами в широком диапазоне зарядов и энергий ионов в многокомпонентных газообразных и твердотельных мишенях.

В четвертой главе приведены результаты расчетов, полученных с использованием разработанного метода оценки сечений перезарядки в решении некоторых задач с участием ионных пучков. Предложенный Н.В.Новиковым метод позволил исследовать процесс установления равновесного зарядового распределения в ионном пучке, ширины и асимметрии его зарядового распределения. Рассчитанные ширины равновесного зарядового распределения удовлетворительно описывают экспериментальные данные в широком диапазоне значений энергий ионов. Исследованы угловые, энергетические и зарядовые распределения быстрых ионов, отраженных от поверхности при малых углах скольжения. Показано, что зарядовое распределение отраженных от поверхности частиц не зависит от заряда падающей частицы и определяется равновесными зарядовыми фракциями. Полученные сечения подхвата и потери электрона позволили проанализировать вклад процессов с изменением заряда ионов в неупругие потери энергии ускоренных ионов.

В заключении автором перечислены основные результаты, полученные в работе, среди которых следует отметить, во-первых, предложенный Н.В.Новиковым метод расчета сечения захвата электрона ускоренными ионами в газах. Метод основан на численном интегрировании выражения для амплитуды захвата электрона с учетом аналитических волновых функций возбужденных состояний и кулоновского взаимодействия между рассеянным ионом и ионом мишени. Во-вторых, особый интерес представляют

результаты масштабного анализа экспериментальных данных и теоретических расчетов процессов перезарядки в газообразных и твердотельных мишенях. Это позволило автору создать уникальный, на мой взгляд, код для вычисления сечений потери и захвата одного и двух электронов ионами в широком диапазоне зарядов и энергий ионов в многокомпонентных газообразных и твердотельных мишенях. Практическая значимость полученных результатов несомненна, и результаты работы найдут применение во многих направлениях физики от решения прикладных задач ион-атомных столкновений до фундаментальных проблем астрофизики.

Положения, выносимые на защиту, обоснованы и вносят существенный вклад в развитие физики атомных столкновений. Все поставленные в диссертационной работе цели достигнуты и соответствуют положениям, выносимым на защиту. Полученные результаты могут быть использованы при рассмотрении разноплановых задач, связанных с физикой взаимодействия ионизирующих излучений с веществом, радиационным материаловедением и ядерной медициной. Развитый автором подход имеет предсказательную силу, что немаловажно для дальнейшего развития данного направления.

Работа не без недостатков. По работе можно сделать следующие замечания:

1. При анализе влияния кулоновского взаимодействия ионов на сечение подхвата электрона автор в выражении для амплитуды процесса использует в качестве конечного состояния налетающего иона асимптотику кулоновской волновой функции непрерывного спектра. Очевидно, что правомерность использования асимптотической волновой функции при анализе процесса, происходящего в области перекрытия электронных оболочек, вызывает сомнение. Соискателю следовало бы более подробно осветить этот вопрос в диссертации, тем более, что и в оригинальных статьях это не было сделано.

2. Используемый автором термин «Эффект плотности» для описания различия процессов подхвата и потери электронов в газообразных и твердотельных мишенях, на мой взгляд, не совсем удачный. Термин «Эффект плотности» был впервые введен Э.Ферми и используется для описания влияния на потери энергии релятивистского сжатия поля заряженной частицы, проходящей через среду.
3. При изучении зарядовых распределений с использованием кинетических уравнений автору во избежание недоразумений следовало бы давать определения используемых в кинетических уравнениях величин и указывать их размерности. В частности, если в исходном уравнении (1.1) толщина измеряется в единицах длины, то в правой части уравнения под сечением надо понимать произведение обычного сечения на концентрацию атомов мишени. Если же толщина измеряется в единицах $\text{г}/\text{см}^2$, то под сечением надо понимать отношение обычного сечения к массе атома мишени, $\text{см}^2/\text{г}$.
4. Есть в диссертации и автореферате некоторые неточности и опiski. Так, на стр. 68 автор пишет: «Сечение захвата электрона вычисляется интегрированием амплитуды по переданному импульсу...». Следовало бы написать «Сечение захвата электрона вычисляется интегрированием квадрата модуля амплитуды по переданному импульсу...». Несколько небрежно оформлены формулы и математические символы в автореферате - слишком мелкие и искажены, что затрудняет чтение.

Отмеченные недостатки не являются принципиальными и не снижают значимости результатов диссертационного исследования. Диссертация написана хорошим и ясным языком, что свидетельствует о глубоком понимании автором изучаемых проблем. Текст автореферата соответствует диссертации. Основные результаты работы опубликованы в реферируемых журналах, в том числе в журналах из списка ВАК, и прошли апробацию на профильных Международных и Российских конференциях. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным

университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.04.20 – «Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным п.п. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена, согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Новиков Николай Викторович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.20 – «Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника».

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, заведующий кафедрой технической физики физического факультета Южного федерального университета

Малышевский Вячеслав Сергеевич

« 9 » января 2018 г.

Контактные данные:

тел.: +7(928)135-11-06, e-mail: vsmalyshevsky@sfedu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 01.04.02 – «Теоретическая физика»

Адрес места работы:

344006 (Россия) г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, д. 105/42, Южный федеральный университет, физический факультет

Тел.: +7(863) 218-40-00 доб. 11434; e-mail: pr@sfedu.ru

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет»

Личную подпись В.С. Малышевского

ЗАВЕРЯЮ:

Специалист по работе с персоналом I категории РА Кармазин

« 09 » 01 2018

