

АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени «доктор философии» (Ph.D)
по специальности «6D060400 – Физика»

ШАЛЕНОВ ЕРИК ОНГАРОВИЧ

ТРАНСПОРТНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛОТНОЙ КВАЗИКЛАССИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ

В диссертационной работе представлены результаты расчета столкновительных, транспортных и оптических свойств плотной неидеальной плазмы на основе эффективных потенциалов взаимодействия.

Актуальность темы

В настоящее время перед человечеством стоит острая проблема развития таких альтернативных источников энергии, которые бы, во-первых, позволили удовлетворить растущие потребности в энергии с большим запасом на будущее, и, во-вторых, не приводили бы к глобальным последствиям потепления. Таким требованиям отвечают установки, реализующие управляемый термоядерный синтез (УТС). В связи с этим, в последние десятилетия возникли крупные дорогостоящие транснациональные и национальные проекты (к примеру, ITER, NIF и др.), связанные с развитием термоядерной энергетики, позволяющей в большой степени решить перечисленные проблемы.

Исследование свойств плотной квазиклассической плазмы затруднено, во-первых, из-за неадекватности выбора моделей взаимодействия частиц и, во-вторых, несовершенством существующих теоретических методов (зачастую приближенно аналитических) для исследования свойств таких систем.

Таким образом, разработка моделей взаимодействия структурных элементов неидеальной квазиклассической плазмы, методов математического моделирования, и исследование на их основе элементарных столкновительных процессов, а затем кинетических, транспортных и оптических свойств системы представляет не только фундаментальный интерес, но и важно для развития технологий многих практических приложений, связанных с неидеальной квазиклассической плазмой.

Столкновительные процессы определяют практически все свойства плазмы, ее состав, термодинамику, транспортные характеристики, электродинамические свойства и т.д. Поэтому особенно важно уметь на уровне элементарных процессов корректно и достоверно проводить исследования. Традиционно, исследование элементарных процессов в рамках определенной модели начинается с получения сечений упругого рассеяния, при этом первые

оценки можно и нужно проводить на основе простых методов, к которым относится метод Борна.

Сечения столкновений напрямую зависят от значения относительной скорости сталкивающихся частиц, она сидит в самих уравнениях, позволяющих рассчитать сечение, но при этом в большинстве случаев не учитывается зависимость потенциала взаимодействия от этой скорости. Такая постановка не совсем корректна и более последовательным является применение динамического потенциала взаимодействия частиц при исследовании их столкновений. В рамках данной диссертационной работы были получены новые динамические потенциалы взаимодействия частиц неидеальной квазиклассической плазмы, учитывающие квантовомеханический эффект дифракции и динамическую экранировку поля заряженных частиц, зависящую от относительной скорости частиц.

Исследование процессов переноса на основе столкновительных характеристик является одним из важных направлений физики неидеальной плазмы. В настоящее время эта область физики продолжает интенсивно развиваться в связи с ключевой ролью процессов переноса как в технических устройствах, содержащих плазму (магнитогазодинамические и термоэмиссионные преобразователи энергии, газоразрядные лазеры, газофазные ядерные реакторы, космические аппараты и др.), так и в природных системах - ионосфере Земли и планет, межзвездной среде, недра Солнца, звезд планет-гигантов.

Интерес к изучению оптических свойств неидеальной плазмы в значительной мере обусловлен использованием лазеров для обжарки мишеней, а также перспективами оптической бесконтактной диагностики. Оптические приборы позволяют проводить самые разнообразные измерения и исследования, например, температуры, плотности плазмы, структуры плазменно-пылевых образований, размеров и формы отдельных крупных частиц и многое другое. Исследование оптических свойств представляется таким образом, не только важной теоретической задачей, но и способной привести к разработке новых технологий в области оптической диагностики плазмы инерциального термоядерного синтеза.

Цель работы

Основной целью работы является исследование с помощью эффективных потенциалов взаимодействия столкновительных, транспортных и оптических характеристик плотной неидеальной плазмы, таких как: сечения рассеяния частиц, частота столкновения, электропроводность и коэффициент отражения.

Объектом исследования является плотная квазиклассическая плазма, реализуемая в установках УТС с инерциальным удержанием и в некоторых астрофизических объектах.

Предмет исследования – столкновительные (фазы рассеяния, дифференциальные, полные и транспортные сечения рассеяния, частоты столкновений), транспортные (статическая и динамическая электропроводность

водородной плазмы) и оптические (коэффициент отражения плотной неидеальной плазмы ксенона) характеристики плотной неидеальной плазмы.

Для достижения поставленной цели в рамках эффективных потенциалов взаимодействия частиц плотной квазиклассической плазмы необходимо решить следующие задачи:

- Построить динамические эффективные модели взаимодействия частиц плотной квазиклассической плазмы
- Исследовать столкновительные процессы на основе статических и динамических эффективных потенциалов взаимодействия частиц
- Вычислить и проанализировать статическую и динамическую электропроводности плотной квазиклассической плазмы водорода с использованием полученных данных по столкновительным характеристикам
- Вычислить и проанализировать коэффициент отражения плотной квазиклассической плазмы ксенона с использованием полученных данных по столкновительным характеристикам.

Положения, выносимые на защиту:

- Эффективные потенциалы взаимодействия, учитывающие динамическую экранировку и эффект дифракции, в случае высоких значений относительной скорости стремятся к потенциалу Дойча (взаимодействие заряд-заряд) или неэкранированному потенциалу взаимодействия заряда с атомом.
- В результате учета динамического экранирования в эффективном потенциале взаимодействия частиц приводит к увеличению значений столкновительных характеристик (фазовые сдвиги, сечение рассеяния) по сравнению с данными, полученными с учетом статической экранировки.
- Учет электрон-электронных столкновений посредством коэффициента перенормировки дает лучшее согласие данных по динамической электропроводности с результатами моделирования молекулярной динамики (МД) в длинноволновом пределе.
- Лучшее согласие коэффициента отражения излучения с р-поляризацией с экспериментальными данными, а также с результатами МД моделирования наблюдается при учете динамического экранирования.

Новизна работы.

В данной работе на основе используемых эффективных потенциалов взаимодействия были впервые получены следующие результаты:

- построены эффективные динамические модели взаимодействия частиц плотной квазиклассической плазмы, учитывающие динамическую экранировку и квантово-механический эффект дифракции.
- получены новые данные по столкновительным свойствам (фазовые сдвиги, сечение рассеяния) плотной квазиклассической плазмы на основе полученных эффективных потенциалов взаимодействия

– исследована динамическая электропроводность плотной квазиклассической плазмы водорода на основе полученных столкновительных характеристик

– исследован коэффициент отражения плотной квазиклассической плазмы ксенона на основе полученных столкновительных характеристик.

Теоретическая и практическая значимость исследования. Результаты, полученные в диссертационной работе, представляют ценность для развития как псевдопотенциальной теории, так и для изучения кинетических и оптических свойств частично и полностью ионизованной плазмы. Они могут быть использованы при расчетах параметров частично и полностью ионизованной плазмы в целом ряде перспективных энергетических проектов и реальных технических устройств, в том числе, установок управляемого термоядерного синтеза (УТС), так как используемые псевдопотенциальные модели адекватно описывают коллективные эффекты при статической или динамической экранировке и квантовые эффекты во взаимодействии.

Теоретическая важность данной работы связана с возможностью использования полученных результатов при изучении процессов, происходящих в астрофизических объектах (белые карлики, Солнце и т.п.). Также полученные в работе результаты углубляют фундаментальные знания о физике плотной плазмы УТС.

Достоверность и обоснованность полученных результатов. В диссертационной работе использовались известные физические модели и апробированные математической методы. Результаты полученные, на основе компьютерного моделирования согласуются с различными теоретическими подходами, такими как метод T-матриц, метод фазовых функций, приближение Борна первого порядка. Результаты работы согласуются с экспериментальными данными, а так же с результатами компьютерного моделирования методами молекулярной динамики (МД). Также достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждаются публикациями в журналах дальнего зарубежья с высокими импакт-факторами и в изданиях, рекомендованных Комитетом по контролю в сфере образования и науки МОН РК, и в трудах международных научных конференций ближнего и дальнего зарубежья.

Личный вклад автора заключается в том, что весь объем диссертационной работы, выбор метода исследования, решения задач и численные расчеты выполнены автором самостоятельно. Постановка задач и обсуждение результатов проводились совместно с научными руководителями.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 25 печатных работ: 3 в журналах из Перечня ККСОН МОН РК для опубликования основных результатов диссертаций на соискание степени PhD и 5 статей в журналах дальнего зарубежья с высоким импакт-фактором, входящих в международный информационный ресурс Web of Knowledge (Thomson Reuters,

США) и Scopus (Elsevier, Нидерланды); 17 работ в сборниках Международных научных конференций, в том числе 13 в материалах зарубежных конференций.

Апробация диссертационной работы. Результаты, полученные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались:

– на Международной конференции «International Conference on Phenomena in Ionized Gases (ICPIG)» (2015, Iasi, Romania);

– на Международной конференции «15th International Conference on the Physics of Non-Ideal Plasmas (PNP)» (2015, Almaty, Kazakhstan);

– на Международном симпозиуме «21st International Symposium of Heavy-Ion Inertial Fusion (HIF)» (2016, Astana, Kazakhstan);

– на Международной конференции «XXII Europhysics Conference on Atomic and Molecular Physics of Ionized Gases (ESCAMPIG)» (2016, Bratislava, Slovakia);

– на Международной конференции «International Conference on Strongly Coupled Coulomb Systems (SCCS)» (2017, Kiel, Germany);

– на Международной конференции «The International Conference on Research and Application of Plasmas (PLASMA)» (2017, Warsaw, Poland);

– на Международной конференции «42nd European Physical Society Conference on Plasma Physics (EPS)» (2018, Prague, Czech Republic);

– на Международной конференции «XV Russian conference (with international participation) on thermophysical properties of substances (RCTP-15)» (2018, Moscow, Russia);

– на Международной научной конференции «Современные достижения физики и фундаментальное физическое образование» (2016, КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан);

– на Международной конференции студентов и молодых ученых «Фараби Әлемі» (2015, 2016, 2017, КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан);

– на научных семинарах кафедры физика плазмы, нанотехнологии и компьютерной физики КазНУ им. аль-Фараби, Университета Росток в г. Росток, Германия.

обсуждались с профессорами: Райнхольц Х. (Германия), Репке Г. (Германия) в рамках международного сотрудничества.

Связь темы диссертации с планами научных работ. Диссертационная работа выполнена в соответствии с планами фундаментальной научно-исследовательской работы (НИР) КН МОН РК «Грантовое финансирование научных исследований» по темам:

– «Элементарные процессы и оптические свойства плазмы сложного состава инерциального термоядерного синтеза» (2015-2017гг., № госрегистрации 0115РК01037, шифр 3102/ГФ4);

– «Компьютерное моделирование свойств магнитоактивной плазмы сложного состава» (2015-2017 гг., № госрегистрации 0115РК01042, шифр 3087/ГФ4);

– «Исследование пыле-звуковых солитонов в магнитоактивной плазме сложного состава» (2018-2020 гг., № госрегистрации 0118РК00609, шифр АР05132665/ГФ);

– программы целевого финансирования «Исследование фундаментальных проблем физики плазмы и плазмоподобных сред» (2018-2020 гг., шифр ВР05236730/ГФ).

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 разделов, заключения и списка использованных источников из 255 наименований, содержит 115 страниц основного компьютерного текста, включая 49 рисунков.