

## АННОТАЦИЯ

к диссертационной работе Сызганбаевой Сауле Аскарловны «**Динамические характеристики и оптические свойства неидеальной плазмы в рамках интерполяционного моментного подхода**», представленную на соискание степени доктора философии (PhD) по специальности «6D060400 – Физика»

**Общая характеристика работы.** Настоящая диссертационная работа посвящена исследованию динамических и оптических свойств неидеальной плазмы с использованием модифицированного интерполяционного подхода самосогласованного метода моментов. Теоретические методы апробированы, а для сравнения результатов исследования были использованы численные расчеты и экспериментальные данные.

**Актуальность темы исследования.** Физика плазмы в настоящее время переживает период интенсивного развития. Проявляемый интерес к свойствам так называемого четвертого состояния вещества вызван множеством причин. Одна из основных — это решение энергетических проблем, в связи с сокращением природного топлива. Как известно, есть несколько путей выхода из надвигающегося кризиса: возобновляемые источники энергии, ядерная энергия и энергия, получаемая в установках термоядерного синтеза. Последний, как оказалось, является наиболее выгодным. Во-первых, эта энергия может обеспечить основную часть мирового спроса, во-вторых, реактор в УТС содержит гораздо меньше радиоактивных материалов, чем атомный реактор деления, и поэтому последствия случайного выброса радиоактивных продуктов менее опасны, в-третьих, в УТС допускается прямое получение электроэнергии. Для получения энергии в УТС в настоящее время имеются два пути. Первый основан на магнитном удержании плазмы, нагретой до температуры в несколько сотен миллионов градусов. Второй – интенсивный разогрев термоядерного горючего до высоких температур при одновременном его сжатии потоками интенсивного электромагнитного излучения или пучками тяжелых ионов. Как известно, на УТС в Калифорнии недавно удалось получить больше энергии, чем было затрачено для разогрева и сжатия дейтерио-тритиевой плазмы. Сами по себе экспериментальные исследования плотной плазмы достаточно сложны и требуют немалых финансовых расходов, поэтому был разработан целый ряд теоретических методов анализа, позволяющих получать достоверные данные о термодинамических, оптических и электродинамических свойствах плотной, высокотемпературной плазмы.

Конечно, кроме установок управляемого термоядерного синтеза, сферы применения неидеальной плазмы, где средняя потенциальная энергия взаимодействия между заряженными частицами порядка и более их средней кинетической энергии теплового движения взрывоподобно расширились: от недр звезд и планет до производства бытовых приборов. С помощью плазмы можно максимально экологично сжигать городские отходы и очищать воду, и

даже лечить раны. Тенденцией последнего времени является появление мощных источников воздействия на конденсированное вещество. Это резко увеличило наши возможности различных реализаций неидеальной плазмы экстремальных параметров и получения богатого набора явлений. Такими, в частности, являются мощные фемтосекундные лазеры и пучки тяжелых ионов, которыми мы сегодня можем поверхностно и объемно нагревать конденсированное вещество и изучать различные плазменные эффекты. Это — специфическая физика, не говоря уже о мощных взрывах, традиционно используемых для генерации неидеальной плазмы.

Как было написано выше, Мир взял курс на развитие высокоэнергетических экспериментальных устройств, в частности систем инерционного термоядерного синтеза. Но проблема в том, что физические условия (температура и плотность) рабочего тела будущих реакторов ИТС, где мишень из изотопов водорода (дейтерия и трития), существующих в природе, сильно сжимается внешним лазерным излучением или пучками тяжелых ионов до плотностей на 5 порядков выше, чем у металлов, таковы, что в таких экстремальных условиях традиционные физические теории, основанные на разложениях по некоторым малым параметрам, терпят неудачу, и для диагностики и управления процессами в рабочем теле необходимы альтернативные непerturbативные теоретические подходы.

В последнее время, наряду с теоретическими исследованиями, произошел быстрый прогресс вычислительной техники, позволяющий проводить все более сложное и все более изощренное, так называемое «прямое» численное моделирование сложных физических процессов в неидеальной плазме (метод квантовой молекулярной динамики и квантового Монте-Карло и др.). Результаты численного моделирования являются одними из самых надёжных, так как основываются на «первых» принципах. Определенное место занимают также методы частиц в ячейках, предназначенные для моделирования различных физических систем как сплошных сред.

Построение последовательной квантовомеханической теории описания характеристик неидеальной плазмы с использованием кулоновского потенциала межчастичного взаимодействия приводит к вычислительным проблемам. Следовательно, в статистической теории плазмы появились так называемые псевдопотенциальные модели, основанные на замене кулоновского потенциала взаимодействия некими эффективными потенциалами, которые учитывают эффекты различного рода. Эти потенциалы конечны на малых расстояниях, а на больших расстояниях совпадают с кулоновским, т.е. остаются дальнедействующими.

Особое место среди теоретических методов исследования систем с кулоновским взаимодействием между частицами занимает метод моментов. Его суть заключается в том, что функция линейного отклика системы параметризуется как дробно-линейное преобразование функции - параметра с определенными математическими свойствами. Коэффициенты преобразования представляют собой ортогональные полиномы, вычисленные

из первых моментов мнимой части функции отклика, определяющей саму функцию отклика через соотношения Крамерса-Кронига. моменты могут быть рассчитаны независимо и точно в рамках теории линейного отклика Кубо методом вторичного квантования. Наш самосогласованный подход позволяет реконструировать динамические характеристики физической системы, которую мы изучаем, основываясь на знании или путём моделирования статических характеристик. Особую привлекательность придает возможность проведения расчетов для непертурбативных статистических систем взаимодействующих зарядов при любой степени их неидеальности. При этом не требуется проводить никакого разложения по степени неидеальности, как, например, в кинетической теории

На основании вышеизложенного можно заключить, что исследования, которые позволяют получать достоверную информацию о динамических и оптических свойствах неидеальной плазмы методом моментов, представляются актуальными.

**Цель работы** - исследовать динамические и оптические свойства плотной неидеальной плазмы в рамках метода моментов.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить поставленные **задачи**:

- вычислить и проанализировать динамические структурные факторы и сравнить результаты с данными численных экспериментов;
- проанализировать дисперсию и декремент затухания плазменных мод;
- рассчитать энергетические потери заряженных частиц в электронном газе;
- вычислить и проанализировать коэффициент отражения электромагнитных волн от плотной плазмы;

**Объектом исследования** является плотная неидеальная плазма.

**Предмет исследования** – динамические и оптические свойства плотной неидеальной плазмы.

**Методы исследования.** При решении задач, необходимых для достижения поставленных целей, будет использован интерполяционный самосогласованный метод моментов.

**Новизна работы.** В диссертационной работе впервые:

- рассчитаны и проанализированы динамические структурные факторы в моделях однокомпонентной плазмы и электронного газа, результаты согласуются с данными других авторов;
- исследованы дисперсия и затухание коллективных мод в системе;
- в рамках интерполяционного самосогласованного подхода метода моментов исследована тормозная способность электронного газа;
- проведены расчеты коэффициента отражения без использования подгоночных параметров и показано хорошее согласие с результатами уникального эксперимента и численного моделирования.

**Теоретическая и практическая значимость исследования.** Проведенные исследования и результаты, полученные в диссертации, позволяют предсказывать динамические характеристики экспериментально

изучаемых видов плазмы, встречающихся в установках управляемого термоядерного синтеза и астрофизических объектах.

Результаты исследований развивают теорию плотных кулоновских систем, имеют определенное практическое значение для диагностики плазмы.

#### **Положения, выносимые на защиту**

-Диэлектрические характеристики плазменных волн в классической неидеальной однокомпонентной плазме (при параметре неидеальности  $5 \leq \Gamma \leq 160$ ) согласуются с данными численных экспериментов с погрешностью до  $\sim 3,75\%$ , так что диэлектрическая функция удовлетворяет первым пяти правилам сумм.

- Поляризационные потери энергии налетающей заряженной частицы в электронном газе, найденные в рамках интерполяционного самосогласованного метода моментов при параметрах плотности  $r_s \geq 1$ , ( $n_e \geq 10^{22} \text{ см}^{-3}$ ), согласуются с данными современных численных экспериментов с погрешностью до  $\sim 5\%$  во всем интервале скоростей.

- Значения коэффициентов отражения от слоя ударно-сжатой плазмы для р-поляризованного электромагнитного излучения в диапазоне длин волн 532-1064нм, рассчитанные в рамках метода моментов в широком интервале изменения углов падения (от 0 до  $\frac{\pi}{3}$ ) на плазму без учета ширины переходного слоя согласуются с данными реальных экспериментов с погрешностью до  $\sim 5,5\%$ , величина которой уменьшается при перпендикулярном падении.

**Достоверность результатов работы.** В диссертационной работе использовались известные и апробированные физические модели с применением доказанных математических теорем. Полученные соотношения основаны на известных фундаментальных уравнениях и математических выражениях.

**Связь с другими исследованиями.** Диссертация связана с экспериментальными работами по инерционному термоядерному синтезу, с моделированием физических процессов и теоретическими работами в области плотной неидеальной плазмы.

**Публикации.** По материалам диссертационной работы опубликовано 25 печатных работ: 8 в журналах из перечня КОКСОН МОН РК, 6 статьи в журналах дальнего зарубежья с импакт-фактором, входящих в международный информационный ресурс Web of Science и Scopus, 11 работ в материалах международных научных конференций.

**Статьи с импакт-фактором по базе данных Thomson Reuters или в изданиях, входящих в международную научную базу данных Scopus:**

- S.A. Syzganbayeva, J. Ara, A. Askaruly, A.B. Ashikbayeva, I.M. Tkachenko, and Y.V. Arkhipov// Collective phenomena in a quasi-classical electron fluid within the interpolational self-consistent method of moments// Europhysics Letters. –2022. –Volume 140. –Number 1. – 11001p.

- Yu.V. Arkhipov, A. Ashikbayeva, A. Askaruly, A.E. Davletov, D.Yu. Dubovtsev, Kh. S. Santybayev, S.A. Syzganbayeva, L. Conde, I.M. Tkachenko.

Dynamic characteristics of three-dimensional strongly coupled plasmas// Physical Review E. –2020. –Vol.102(5). – P. 053215.

- Yu. V. Arkhipov, D. Yu. Dubovtsev, **S.A. Syzganbayeva**, I.M. Tkachenko. Optical properties of dense plasmas// Plasma Physics Reports. –2020. –V.46(1). – P.71-76.

- Yu. V. Arkhipov, A.B. Ashikbayeva, A. Askaruly, D. Yu. Dubovtsev, **S.A. Syzganbayeva**, I.M. Tkachenko. Stopping power of an electron gas: The sum rule approach // Contributions to Plasma Physics. –2019. –V.59(6). – P. e201800171.

- Yu. V. Arkhipov, A.B. Ashikbayeva, A. Askaruly, M. Bonitz, L. Conde, A.E. Davletov, T. Dornheim, D. Yu. Dubovtsev, S. Groth, Kh. Santybayev, **S.A. Syzganbayeva**, I.M. Tkachenko. Sum rules and exact inequalities for strongly coupled one-component plasmas // Contributions to Plasma Physics. – 2018. – V.58(10). – P. 967-975.

- Yu. V. Arkhipov, A.B. Ashikbayeva, A. Askaruly, A.E. Davletov, **S. Syzganbaeva**, I.M. Tkachenko. Dense Plasma Dynamic Structure Factor Simulation Data vs. the Method of Moments – 2015.- Vol. 55. – No.5. – P.381-389.

**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.

**Диссертационная работа была выполнена** в рамках научно-исследовательской работы МОН РК по теме: «Прямое определение динамических свойств неидеальной плазмы» (AP05132333), «Динамические свойства кулоновских систем в 2D и 3D геометрии» (AP09260349)