

АННОТАЦИЯ

к диссертационной работе Исмагамбетовой Томирис Нурлановны
«Структурные и термодинамические свойства неидеальной квантовой плазмы», представленную на соискание степени доктора философии (PhD)
по специальности «6D060400 – Физика»

Общая характеристика работы. В диссертационной работе представлены результаты исследования структурных и термодинамических свойств неидеальной квантовой плазмы на основе эффективных моделей взаимодействия частиц.

Актуальность темы.

Исследование взаимодействия между частицами в плотной плазме, а также в экстремальных условиях, имеет как фундаментальное значение (для понимания физики планет-гигантов и звезд, горячего плотного вещества (Warm Dense Matter, WDM)), так и для практических приложений, например, для инерциального управляемого термоядерного синтеза (ИТС – Inertial confinement fusion, ICF). Плотная плазма определяется как плазма, в которой значительную роль играют межчастичные взаимодействия. Когда межчастичное расстояние в плотной плазме уменьшается настолько, что оно сравнимо с длиной волны де Бройля, становится важным учет квантовой природы взаимодействующих частиц, и хотя бы одна из компонент плазмы (обычно электроны из-за меньшей массы, чем у ионов) становится вырожденной и такую плазму называют квантовой или вырожденной.

Наземные эксперименты, в которых изучается квантовая плазма, проводятся на таких установках, как NIF (The National Ignition Facility – Национальный комплекс лазерных термоядерных реакций) в Ливерморской национальной лаборатории им. Э. Лоуренса (Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL) в США), намагниченный Z-пинч и Z-машина в Национальных лабораториях Сандия (Z Pulsed Power Facility, Sandia National Laboratories (SNL)) в США, установка FAIR (Центр по исследованию ионов и Антипротонов, Facility for Antiproton and Ion Research) в GSI (Центр по изучению тяжёлых ионов имени Гельмгольца, GSI Helmholtz Centre for Heavy Ion Research), Дармштадт (Германия), IMP-Ланьчжоу и X-FEL (Европейский рентгеновский лазер на свободных электронах, European X-Ray Free-Electron Laser Facility) в DESY (Немецкий Электронный Синхротрон, German Electron Synchrotron) в Гамбурге (Германия).

Следовательно, становится актуальным исследование и разработка моделей взаимодействия частиц квантовой плазмы с учетом влияния различных квантово-механических эффектов компонент (электронов и ионов) на ее структурные и другие физические свойства.

Идея данной работы заключается в исследовании структурных и термодинамических свойств неидеальной квантовой плазмы.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с планами фундаментальной научно-исследовательской работы (НИР) КН МОН РК «Грантовое финансирование научных исследований» по темам: «Исследование структурных, транспортных и термодинамических свойств неидеальной многокомпонентной плотной плазмы с тяжелыми ионами» (2020-2022 гг., шифр AP08856650, № госрегистрации 0120PK00575); «Исследование свойств плазмы и взаимодействия плазменного шнура с внутрикамерными материалами в термоядерных энергетических реакторах» (2020-2022 гг., шифр AP09259081, № госрегистрации 0121PK00295); «Исследование фундаментальных свойств неидеальной комплексной плазмы на основе моделей взаимодействия частиц» (2018-2020 гг., шифр AP05134366, № госрегистрации 0118PK00603); «Модели взаимодействия частиц и фундаментальные свойства неидеальной плазмы» (2015-2017 гг., шифр 3086/ГФ4, № госрегистрации 0115PK01046); «Релаксационные и транспортные свойства плотной плазмы энергетического реактора инерционного термоядерного синтеза» (2013-2015 гг., шифр 1573/ГФ3, № госрегистрации 0113PK00392); «Исследование свойств комплексной плазмы на основе псевдопотенциальных моделей» (2012-2014 гг., шифр 1116/ГФ, № госрегистрации 0112PK00977).

Цель работы – исследование структурных и термодинамических свойств неидеальной квантовой водородной плазмы на основе различных моделей взаимодействия, учитывающих как экранировку поля, так и квантово-механические эффекты.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Получить аналитические выражения для различных эффективных потенциалов взаимодействия.
2. Рассчитать радиальные функции распределения водородной неидеальной плазмы в рамках метода эффективного экранированного потенциала.
3. Определить термодинамические свойства водородной неидеальной плазмы (корреляционную энергию и поправку к давлению идеального газа) на основе полученных радиальных функций распределения.

Объектом исследования является неидеальная квантовая водородная плазма.

Предмет исследования – радиальные функции распределения, термодинамические функции (внутренняя энергия и уравнение состояния).

Методы исследования. При решении задач, необходимых для достижения поставленных целей, использовались следующие методы: метод функций линейного диэлектрического отклика, метод интегральных уравнений для вычисления радиальных функций распределения. Использовались эффективные модели взаимодействия частиц для расчета термодинамических характеристик путем определения радиальных функций системы.

Новизна работы. Новизна и оригинальность диссертационной работы заключаются в том, что в ней впервые:

- получен эффективный потенциал взаимодействия ионов в квантовой плазме с учетом экранирования его электронами и влияния квантовых эффектов дифракции ионов;

- на основе полученного ион-ионного потенциала был определен вклад квантовых эффектов дифракции ионов в структурные и термодинамические свойства водородной квантовой плазмы;

- исследовано влияние ориентации спинов на термодинамические свойства в рамках эффективного экранированного потенциала взаимодействия частиц в водородной плазме.

Научно-практическая значимость работы. Результаты диссертационной работы представляют ценность как для понимания эволюции Вселенной, так и для практических приложений. Знание взаимодействия между частицами, проявляющими свою волновую природу, важно для понимания свойств квантовой плазмы, получаемой ударно-волновым сжатием с использованием лазеров, ускорителей ионов и рентгеновских лучей. При близких ион-ионных столкновениях, происходящие процессы должны рассматриваться с учетом волновой природы иона-мишени. Важной проблемой является учет неидеальности ионов наряду с частичной или полной вырожденностью электронов, для решения которой может быть использован полученный эффективный потенциал взаимодействия ионов. Исследование влияния квантовых эффектов частиц на структурные и термодинамические свойства плазмы позволяет определить динамические и транспортные свойства, необходимые для моделирования процессов и проектирования мишеней в ИТС, а также для понимания эволюции таких астрофизических объектов как нейтронные звезды, белые и коричневые карлики и планеты-гиганты.

Положения, выносимые на защиту:

1. Квантовые эффекты дифракции в потенциале взаимодействия ионов приводят к ослаблению его экранирования электронами по сравнению с потенциалом Юкавы, а поляризация вырожденного электронного облака вызывает снижение значения потенциала в нуле.

2. Вклад квантовых эффектов дифракции ионов в термодинамические характеристики водородной плазмы, в частности, в корреляционную энергию и поправку к давлению, не превышает 4% в диапазоне плотностей $6 \cdot 10^{25} \text{ см}^{-3} \leq n_e \leq 1.6 \cdot 10^{30} \text{ см}^{-3}$ (параметр плотности $0.01 \leq r_s \leq 0.3$) и температур $10^2 \text{ K} < T_i < 5.9 \cdot 10^7 \text{ K}$ (параметр связи $2 < \Gamma_i < 600$).

3. Параллельная ориентация спинов электронов в диапазоне плотностей $10^{21} \text{ см}^{-3} < n_e < 10^{24} \text{ см}^{-3}$ и температур $10^4 \text{ K} < T_i < 10^6 \text{ K}$ приводит к максимальному положительному вкладу +1,07% в поправку на неидеальность к давлению электронной компоненты, а антипараллельная ориентация – к максимальному отрицательному вкладу – 3,2%.

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.

Достоверность и обоснованность полученных результатов.

В диссертационной работе использовались известные физические модели и апробированные математические методы. Также достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждаются публикациями в журналах дальнего зарубежья с 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.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликованы 22 печатные работы: 3 в журналах из Перечня ККСОН МОН РК для опубликования основных результатов диссертаций на соискание степени PhD и 4 статьи в журналах дальнего зарубежья с импакт-фактором, входящих в международный информационный ресурс Web of Knowledge (Thomson Reuters Clarivate Analytics, США) Scopus (Elsevier, Нидерланды); 15 работ в сборниках Международных научных конференций, в том числе в 11 материалах зарубежных конференций.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 6 разделов, заключения и списка использованных источников из 186 наименования, содержит 111 страниц основного компьютерного текста, включая 35 рисунков.