АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени доктора философии (PhD)
по специальности «*6D060400 – Физика*»

ЕРИМБЕТОВА ЛАЗЗАТ ТАСТАНБЕКОВНА

САМОСОГЛАСОВАННАЯ МОДЕЛЬ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЫ

В диссертационной работе исследованы статические и динамические свойства пылевой плазмы на основе предложенного эффективного потенциала взаимодействия пылевых частиц конечных размеров.

Актуальность темы

Пылевая плазма, или плазма с частицами макроскопических размеров, называемых пылинками, уже в течение нескольких десятилетий привлекает внимание учёных. Этот интерес обусловлен тем, что пылевая плазма с одной стороны широко распространена в космическом пространстве, а с другой стороны является рабочим телом в технологических установках. Помимо этого, пылевая плазма намеренно создается как объект исследования в лабораторных условиях с целью изучения ее разнообразных свойств. Все это приводит к тому, что в настоящее время процессы, протекающие в пылевой плазме, интенсивно изучаются теоретически, экспериментально, а также с помощью методов компьютерного моделирования.

Особо следует выделить одну из главных задач, возникающих в связи с проблемой осуществления управляемого термоядерного синтеза – нагрев и удержание высокотемпературной плазмы. Дело в том, что избежать контакта высокотемпературной плазмы со стенками реактора не удается и, по-видимому, предотвратить его полностью не представляется возможным. Этот контакт приводит к образованию пылевой компоненты внутри термоядерных установок, состоящей из материала первой стенки. Появление пыли в пристеночной области немедленно отражается на процессах теплообмена между первой стенкой и нагретой до высоких температур плазмой, что сказывается на процессе удержания плазмы, а, следовательно, поведение пылевой компоненты, ее влияние на плазму и физические свойства материала стенок реактора приводит к необходимости решения *актуальной* задачи по исследованию ее термодинамических свойств и электродинамических характеристик.

Уникальные свойства пылевой плазмы объясняются тем, что пылинки в плазме приобретают большой электрический заряд. При этом, строго говоря, пылевая плазма представляет собой открытую систему, физические свойства которой определяются очень большим числом процессов и явлений. Поэтому пылевая плазма все чаще в литературе называется комплексной. Несмотря на то, что с момента начала исследований пылевой плазмы был достигнут существенный прогресс в понимании ее поведения в различных внешних условиях, целый ряд полученных результатов все ещё нуждается в физической интерпретации, что, в свою очередь, стимулирует дальнейшее развитие данной области.

Общепризнано, что пылевая плазма в самое ближайшее время найдет широкое практическое применение, но она еще интересна тем, что динамику пылевых частиц можно непосредственно зафиксировать в эксперименте с помощью высокоскоростной видеокамеры, а это дает возможность напрямую тестировать теоретические подходы, разработанные для систем многих заряженных частиц.

На основании вышеизложенного следует, что диссертационная работа является актуальной, так как посвящена построению самосогласованной теории статических и динамических свойств пылевой плазмы, которая позволит определять такие характеристики, как заряд пылевых частиц, потенциальная энергия их межчастичного взаимодействия, и на их основе рассчитывать корреляционные функции и термодинамические потенциалы, а также в рамках метода моментов – динамические структурные факторы и диэлектрические характеристики пылевой подсистемы.

Основной целью работы является построение самосогласованной теории статических и динамических свойств пылевой плазмы, которая последовательно учитывает конечность размера пылевых частиц. Это позволяет в едином подходе описывать различные коллективные явления, такие как спектр пыле-акустических волн с учетом перезарядки пылевых частиц в процессе их распространения.

Объектом исследования является пылевая плазма с пылинками конечных размеров.

Предмет исследования – статические и динамические характеристики пылевой компоненты, такие как потенциал взаимодействия частиц, радиальные функции распределения и статические структурные факторы, термодинамические функции, динамический структурный фактор и его моменты, дисперсия и декремент затухания пыле-акустических волн.

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

– исследовать зависимость заряда пылевых частиц от параметров буферной плазмы;

– построить и проанализировать эффективные потенциалы межчастичного взаимодействия заряженных пылинок конечных размеров в плазме;

– рассчитать корреляционные функции пылевых частиц методом интегральных уравнений (уравнение Орнштейна-Цернике в гиперцепном приближении и его обобщениях);

– определить термодинамические свойства пылевой компоненты плазмы на основе полученных корреляционных функций;

– с использованием метода моментов получить динамические структурные факторы сильносвязанной пылевой компоненты плазмы, рассчитать дисперсию и декремент затухания пыле-акустических волн.

Положения, выносимые на защиту:

– потенциал взаимодействия пылевых частиц, учитывающий конечность их размера в рамках теории линейного диэлектрического отклика, практически совпадает с потенциалом Юкавы при малых значениях параметра экранирования $\kappa \ll 1$, а с его ростом лежит систематически выше;

– положение первого максимума на кривой статического структурного фактора смещается в сторону меньших волновых чисел на $\sim 10\%$ при увеличении параметра связи в интервале $\Gamma = 20 \div 100$ и при уменьшении параметра экранирования в интервале $\kappa = 1 \div 3$, а при изменении плотности упаковки пылевых частиц на порядки в интервале $\eta = 10^{-8} \div 10^{-1}$ положение первого пика остается практически неизменным;

– спектр пыле-акустических волн, учитывающий явление перезарядки пылевых частиц в изотермической сжимаемости сильно связанной пылевой компоненты, качественно меняет свой вид при изменении параметра плотности упаковки пылинок в интервале $\eta = 10^{-9} \div 10^{-5}$ так, что наличие максимума сменяется монотонным возрастанием в зависимости от волнового числа;

– в спектре пыле-акустических волн при достаточно больших параметрах связи появляется ротонный минимум, положение которого соответствует положению первого максимума на кривой статического структурного фактора, что напрямую подтверждает гипотезу Фейнмана об их взаимно обратной зависимости. В соответствии с этим волновое число ротонного минимума остается практически неизменным при варьировании плотности упаковки пылевых частиц в интервале $\eta = 10^{-8} \div 10^{-1}$.

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

– в рамках классической электродинамики плазмы разработана модель взаимодействия частиц в пылевой плазме, учитывающая конечность размеров пылинок и явление экранировки поля, что позволяет корректно учитывать граничное условие на поверхности пылевых частиц;

– установлено, что положение первого пика на кривой статического структурного фактора практически не зависит от плотности упаковки пылевых частиц и определяется параметрами связи и экранирования;

– в изотермической сжимаемости сильно связанной пылевой компоненты учтены процессы перезарядки пылевых частиц, что приводит к качественному изменению в поведении спектра пыле-акустических волн даже для пылевых частиц очень малых размеров;

– с помощью метода моментов установлена связь между положениями ротонного минимума и первого максимума на кривой статического структурного фактора.

Теоретическая и практическая значимость исследования. В диссертационной работе развита последовательная теорию статических и динамических характеристик пылевой компоненты плазмы с частицами конечных размеров. Построенная самосогласованная модель корректно описывает равновесные свойства системы и может быть использована для расчёта уравнения состояния и корреляционной энергии неидеальной пылевой компоненты, параметры которой соответствуют различным астрофизическим объектам, условиям термоядерного синтеза в пристеночной области токамаков, а также экспериментам на международной космической станции. Динамические структурные факторы и спектры пыле-акустических волн могут использоваться для проведения диагностики самой плазменной среды.

Таким образом, все вышеупомянутые результаты представляют, как практическую, так и теоретическую значимость для решения задач, связанных с исследованием различных процессов, происходящих в пылевой плазме.

Достоверность и обоснованность полученных результатов.

В диссертационной работе использовались известные физические модели и апробированные математические методы. Результаты полученные, на основе компьютерного моделирования, согласуются с различными теоретическими подходами, такими как метод молекулярной динамики, метод Монте-Карло. При применении различных подходов статистической физики неидеальных систем, таких как метод интегральных уравнений и моделирование методом Монте-Карло при не слишком больших плотностях упаковки дают хорошо согласующиеся результаты при расчете корреляционных функции с авторами других подходов. При не слишком больших плотностях упаковки уравнение Орнштейна-Цернике в гиперцепном и базовом гиперцепном приближениях,

дают практически совпадающие результаты по радиальной функции распределения.

Полученные результаты характеризуются внутренним единством, обусловленным внутренней логикой поставленных целей, и являются достоверными, так как основаны на известных и апробированных методах физики плазмы, разработанных для систем с сильным межчастичным взаимодействием.

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, а также 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 30 печатных работ: 14 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); 11 работ в сборниках Международных научных конференций, в том числе 6 в материалах зарубежных конференций.

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

- на научных семинарах кафедры физики плазмы, нанотехнологии и компьютерной физики КазНУ им. аль-Фараби.
- на международной конференции «Актуальные проблемы современной физики», посвященная 75-летию академика НАН РК Абдильдина М.М., Алматы, 2013;
- на 8-ой международной научной конференции «Современные достижения физики и фундаментальное физическое образование», 9-11 октября 2013 года, Алматы, Казахстан;
- на международной конференции «Современные проблемы физики и новых технологий», 21-22 февраля 2014 года;
- International Conference “Strongly Coupled Coulomb Systems”, Santa Fe, USA, 2014;

– 14th International Conference on the Physics of Dusty Plasmas, 26-29 May, 2015, Auburn, Alabama, USA;

– International Conference on the Physics of Non-ideal Plasmas – 15, 2015 (Almaty, Kazakhstan);

– VIII International Conference on Plasma Physics and Plasma Technology, September 14-18, 2015, Minsk, Belarus, Contributed Papers;

– 42nd IEEE International Conference on Plasma Science, 2015, Belek, Turkey;

– 42nd European Physical Society Conference on Plasma Physics, Lisbon, Portugal, 2015;

– 43rd IEEE International Conference Plasma Science, June 19-23, 2016, Banff, Alberta, Canada;

– II, III и IV Международные Фарабиевские чтения, 2015, 2016 и 2017 гг. (Алматы, КазНУ им. аль-Фараби); а также на научном семинаре «Нелинейные и корреляционные явления в физике плазмы» физико-технического факультета КазНУ им.аль-Фараби;

– 9-я Международная научная конференция «Современные достижения физики и фундаментальное физическое образование», Казахстан, Алматы, 12-14 октября, 2016;

– International Conference on Strongly Coupled Coulomb Systems, 2017 (Kiel, Germany);

– 16th International Conference on the Physics of Non-ideal Plasmas – Saint-Malo, France, 2018.

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:

– «Исследование свойств пылевой плазмы на основе предлагаемой модели взаимодействия частиц» (2012-2014 гг., № госрегистрации 0112РК00935, шифр 1129/ГФ);

– «Самосогласованная модель статических свойств пылевой плазмы с частицами конечных размеров» (2015-2017 гг., № госрегистрации 0115РК01051, шифр 3120/ГФ4);

– «Исследование динамических и оптических свойств плотных кулоновских систем» (2015-2017 гг., № госрегистрации 0115РК01050, шифр 3119/ГФ4).

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4-х разделов, заключения и списка использованных источников из 178 наименований, содержит 125 страницы текста, включая 92 рисунка и 1 таблицы.