

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе
Санкт-Петербургского
государственного университета

/ С.В. Микушев /

сентября 2022 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертационную работу Николаева Владислава Сергеевича
«Динамические свойства и фазовые переходы
в неоднородных плазменно-пылевых системах»
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.9 – физика плазмы

Диссертация посвящена исследованию пространственного распределения динамических характеристик и изучению сценария плавления в системах заряженных частиц под влиянием удерживающего параболического потенциала. Работа носит расчетно-теоретический характер с включением сравнения с доступными в литературе экспериментальными данными. Основным объектом, на который ориентированы результаты работы, являются плазменно-пылевые системы. В диссертации показано, что в общем случае влияние удерживающей электростатической ловушки приводит к появлению структурной неоднородности, как следствие, к неоднородности динамических характеристик системы: амплитуды и спектров колебаний частиц, параметров неидеальности и Линдемманна. Предложен и обоснован локальный подход к рассмотрению таких структур, согласно которому свойства следует рассчитывать в локальном окружении частицы для учета возможной неоднородности системы. Представлен анализ влияния невзаимных эффектов во взаимодействии пылевых частиц в плазменно-пылевом монослое на сценарий его плавления.

Актуальность темы диссертации. На протяжении долгого времени плазма с конденсированной дисперсной фазой используется в качестве модельной системы для конденсированного состояния вещества. В последнее время развивается аналогия с так называемым активным веществом. Для понимания свойств пылевых структур, возникающих в плазме, и их дальнейшего изучения учет влияния удерживающего потенциала играет важную роль. Актуальность темы работы связана с тем, что на сегодняшний день полной и детальной картины процессов, происходящих в пылевой плазме, не составлено. Помимо этого, аналогичные системы широко распространены в технологических приложениях, таких, как установки для травления микросхем и термоядерные установки.

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы. Полный текст диссертации изложен на 115 страницах, список цитируемой литературы содержит 125 наименований.

Во введении дано краткое обоснование актуальности работы, сформулированы цели и задачи диссертации, основные положения, выносимые на защиты. Представлен список основных публикаций, докладов и научных наград автора. Содержание введения полностью соответствует требованиям ВАК.

В первой главе дан литературный обзор основных положений физики плазмы с конденсированной фазой, в том числе экспериментальных данных, касающихся пространственной неоднородности пылевых структур. Полно описаны уже существующие критерии плавления пылевых структур. На основе этого сформулированы задачи диссертации.

Во второй главе развивается аналитическая теория неоднородности динамических свойств систем заряженных частиц с сильно экранированным потенциалом взаимодействия в параболическом конфайнменте. Автор подробно обсуждает применимость упрощенной модели взаимодействия пылевых частиц к описанию экспериментальных данных. Используется квазигармоническое приближение теории динамики кристаллической решетки. Полученные аналитические выражения содержат ряд свободных параметров, что, тем не менее, позволяет сделать важные выводы о влиянии конфайнмента на динамические свойства. Показано, что амплитуда тепловых колебаний частиц, параметры Линдемманна и неидеальности имеют неоднородный радиальный профиль.

В третьей главе дана методика численных расчетов свойств систем заряженных частиц с использованием методов, аналогичных методу классической молекулярной динамики. Автор использует три различных дополняющих друг друга подхода к описанию взаимодействия пылевых частиц в условиях плазменно-пылевых экспериментов. Все три подхода подробно описаны в литературе, и их использование в рамках одной диссертационной работы является ее достоинством. В главе также сформулирован локальный подход для расчета структурных и динамических свойств.

В четвертой главе на основании результатов компьютерного моделирования делается вывод о принципиальной неоднородности динамических свойств систем с различной конфигурацией заряженных частиц – цепочечной, однослойной, трехмерной. Приведено убедительное сравнение с математическими выражениями, полученными во второй главе в квазигармоническом приближении. Сопоставление с экспериментальными данными индийского коллектива позволило автору восстановить недостающие параметры системы – заряд пылевых частиц, параметр ловушки, константу экранировки потенциала – и полно описать экспериментальную систему с точки зрения как структурных, так и динамических свойств.

В пятой главе основное внимание уделяется плавлению систем заряженных частиц в параболическом конфайнменте. Показано, что в зависимости от режима взаимодействия пылевых частиц плавление может протекать по различным неоднородным сценариям. В классической системе экранированных зарядов в ловушке плавление начинается на периферии системы и с повышением температуры продвигается в центральную область. В однослойной системе с так называемым эффектом ионного фокуса реализуется необычный сценарий, при котором плавление, напротив, начинается в плотной центральной области, и расплавленное ядро сосуществует с разреженными оболочками.

Особую ценность представляет предложенный автором критерий плавления, который допускает применение в локальном приближении и не зависит от флуктуаций полного импульса и момента импульса в системе.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Научная новизна работы. Результаты, вынесенные в основные положения диссертационной работы, имеют научную новизну и представляются теоретически и практически значимыми.

Наиболее важные новые результаты относятся к обоснованию локального подхода при расчете свойств систем заряженных частиц под влиянием удерживающего параболического потенциала. Автором впервые показано, что влияние удерживающей электростатической ловушки приводит к неоднородности динамических характеристик системы: амплитуды и спектров колебаний частиц, параметров неидеальности и Линдемманна. Для описания радиальных профилей этих характеристик получены аналитические соотношения, которые демонстрируют хорошую применимость как к результатам компьютерного моделирования, так и к доступным в литературе экспериментальным данным. Отдельно отметим локальный критерий плавления, предложенный автором. Этот критерий допускает применение в тех условиях, когда широко известный параметр Линдемманна дает некорректные результаты. С помощью этого критерия продемонстрированы два принципиально различных режима сосуществования фаз в плазменно-пылевом монослое.

Представляют интерес полученные автором результаты касательно режима развития неустойчивости связанных мод в плазменно-пылевом монослое. В этом режиме неустойчивость оказывается «запертой» в плотной центральной области системы и не затрагивает ее оболочки, тем самым оказывая существенное влияние на динамические свойства структуры.

Научная значимость работы определяется новизной полученных результатов практически по всем направлениям работы и вкладом в развитие методики обработки экспериментальных данных.

Предложенный автором локальный подход позволяет анализировать влияние конфайнмента и потенциала взаимодействия пылевых частиц на структуру и динамику пылевой подсистемы в плазме. Особенно интересна возможность восстановления недостающих параметров эксперимента по степени неоднородности системы.

Практическая значимость работы заключается в ее непосредственной связи с экспериментом, применимости результатов к самому широкому кругу систем – пылевой, однокомпонентной, коллоидной плазме, системам ионов в ловушках. Учет влияния конфайнмента позволяет существенно развить аналогию между пылевыми структурами и конденсированными системами.

Результаты работы применимы в исследованиях, проводимых в Объединенном институте высоких температур, Институте космических исследований РАН, Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт», Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН, Московском физико-техническом институте, МГУ им. М.В. Ломоносова, АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»,

СПбГУ и в других научных организациях, проводящих исследования в области физики пылевой плазмы.

Апробация работы. Материалы диссертации полно представлены более чем на 30 российских и международных конференциях.

Публикации. По теме работы автор имеет 10 статей из перечня ВАК, опубликованных в изданиях, индексируемых в базе данных Web of Science.

Замечания и вопросы. К любой поисковой научно-квалификационной работе всегда имеются замечания. Главные замечания по работе Николаева В.С. следующие:

- Полученные в работе результаты относятся к системе сильно экранированных зарядов равной величины в параболической удерживающей ловушке. Оба предположения – о равной величине зарядов и параболическом профиле ловушки – не являются общими для условий плазменно-пылевых экспериментов. В общем случае заряд пылевых частиц зависит от положения в структуре вследствие неоднородного распределения плотности заряженной компоненты плазмы и влияния самих пылевых частиц на заряд друг друга. Этот эффект также может повлиять на степень неоднородности пылевой подсистемы.
- В качестве пожелания хотелось бы порекомендовать автору уделить больше внимания развитию аналитической модели при различных степенях экранировки потенциала взаимодействия.

Приведенные замечания вызывают конкретные **вопросы**:

1. В монослое с радиальной переменной плотностью частиц невозможно разместить идеальную решетку, например гексагональную, как рассмотрено у автора. Какого характера эффект можно ожидать исходя из предложенной модели, если периферийная область пылевой структуры будет иметь другой порядок расположения частиц (если сосуществуют «треугольный» и «квадратный» виды упаковки, соответственно)?
2. Как можно было бы в лабораторном эксперименте проверить, вероятно, самый интересный результат диссертации – изменение порядка в классической системе и в системе с «невзаимностью» частиц (Рис.5.5 Диссертации)? Полезно сформулировать требования: число частиц в монослое, размер/заряд частиц, плотность собственно плазмы и другие параметры.

Отмеченные выше недостатки и возникшие вопросы не снижают общей высокой оценки работы. Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г., а ее автор Николаев Владислав Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – Физика плазмы.

Отзыв подготовлен профессором кафедры Общей Физики I Физического факультета СПбГУ, доктором физико-математических наук (01.04.08 - физика плазмы) Карасевым Виктором Юрьевичем.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании коллектива кафедры Общей Физики I Физического факультета СПбГУ, протокол N 4 от 09.09.2022 г.

Заведующий кафедрой Общей Физики I
Физического факультета СПбГУ,
д.ф.-м.н., профессор,(812) 428-44-66,
genphys1@phys.spbu.ru

И.Ч. Машек

Профессор кафедры Общей Физики I
Физического факультета СПбГУ, д.ф.-м.н.,
(812) 428-44-66, v.karasev@spbu.ru

В.Ю.Карасев

Подписи заверяю

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» .
Адрес 199034, Санкт-Петербург, Университетская набережная, д.7-9.
Телефон (812) 328-97-01.
E-mail: spbu@spbu.ru

Личную подпись <i>И.Ч. Машек, В.Ю. Карасев</i> заверяю И.О. начальника отдела кадров Лиз И.И. Константинова <i>Лиз</i>

