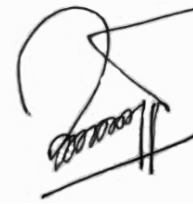


На правах рукописи

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, stylized initial 'С' followed by several loops and a vertical stroke at the end.

АРКАР Чжо

**ДИНАМИКА И СТРУКТУРЫ АКТИВНЫХ БРОУНОВСКИХ ЧАСТИЦ
В ПЛАЗМЕ**

1.3.9 – физика плазмы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Объединенном институте высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН).

Научный руководитель: д.ф.-м.н., профессор, академик РАН, главный научный сотрудник лаборатории диагностики пылевой плазмы ОИВТ РАН, ПЕТРОВ Олег Федорович

Официальные оппоненты: д.ф.-м.н., проф., Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), ПОПЕЛЬ Сергей Игоревич;
д.ф.-м.н., проф., Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ),
КАРАСЕВ Виктор Юрьевич;

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт Общей Физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (ИОФ РАН).

Защита состоится «29» декабря 2021 г. в ___ ч. ___ мин. на заседании диссертационного совета Д 002.110.02 (24.1.193.01) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук по адресу: 125412, Москва, ул. Ижорская 13, стр. 2, экспозал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИВТ РАН.

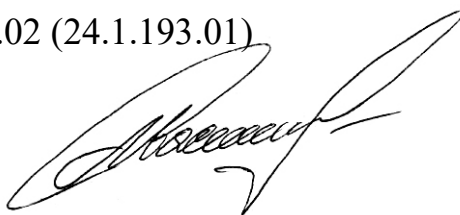
Отзывы на автореферат просьба присылать по адресу: 125412, Москва, ул. Ижорская 13, стр. 2, диссертационный совет ОИВТ РАН.

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.110.02 (24.1.193.01)

д.ф.-м.н.



М.М. Васильев

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, 2021

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена экспериментальному изучению динамики и структур заряженных макрочастиц в плазме высокочастотного разряда емкостного типа.

Актуальность работы. Согласно современным представлениям более 99 % всего видимого вещества в Вселенной является плазмой. Возникновение плазмы в звездах обусловлено высокой температурой; в туманностях, разреженном межзвездном газе и пылегазовых облаках ионизация возникает и поддерживается под воздействием излучения. При этом в межзвездном пространстве и пылегазовых облаках существуют огромное количество пылевых частиц, которые заряжаются в результате потока электронов и ионов из плазмы. В свою очередь макрочастицы в плазме могут существенным образом влиять на ее свойства. В лабораторной плазме частицы могут появляться в результате различных процессов, например в результате различных химических реакций, конденсации, ионного распыления электродов и других, а также инжектироваться в плазму преднамеренно. Для обозначения плазмы с пылевыми частицами, как правило, применяется термин «пылевая» или коллоидная плазма. При этом заряд макрочастиц, взвешенных в плазме, не постоянен, зависит от локальных условий и флуктуирует.

В настоящее время хорошо изучены процессы, происходящие в термодинамически изолированных системах, такие как фазовые переходы, процессы переноса и др. Между тем, подавляющее большинство объектов в природе представляют собой термодинамически открытые системы, что делает их более сложными для изучения, поэтому термодинамика систем далёких от равновесия – активно развивающаяся область науки. Коллоидная плазма является примером таких открытых систем, в которой могут наблюдаться активные броуновские частицы, т.е. частицы, способные преобразовывать энергию, получаемую извне, в кинетическую энергию собственного движения. При этом самоподвижность таких объектов приводит к значительному увеличению коэффициента диффузии. Примеры естественных активных броуновских частиц – подвижные клетки, многоклеточные живые организмы. Диапазон искусственных активных частиц широк; в основном, это системы коллоидов с химически активной поверхностью. Перспективным является также изучение активных Янус частиц.

Исследование динамики и эволюции систем активных макрочастиц и способов управления ими – задача, интересная с фундаментальной и практической точек зрения. Движение таких частиц представляет собой комбинацию тепловых флуктуаций и направленного движения, что приводит всю систему в состояние, далёкое от равновесия. Активные Янус частицы и системы таких сильно взаимодействующих частиц представляют наибольший интерес, и работа посвящена их исследованию.

Цели диссертационной работы заключались в экспериментальном изучении динамики активной броуновской частицы в плазме высокочастотного разряда емкостного типа при воздействии лазерного излучения, а также динамических и структурных характеристик кластеров, сформированных такими частицами в приэлектродной области газового разряда.

Для достижения поставленной цели был модифицирован экспериментальный стенд для захвата и удержания уединенных активных броуновских частиц и сформированных ими кластеров в высокочастотном емкостном разряде при внешнем воздействии лазерного излучения; проведены экспериментальные исследования динамических и структурных особенностей кластеров, а также уединенных активных броуновских частиц при лазерном воздействии в широком диапазоне параметров газового разряда; проведен анализ экспериментальных наблюдений поведения макрочастиц в плазме; а также рассмотрены механизмы, объясняющие наблюдаемые в экспериментах явления.

Научная новизна.

- Был модифицирован экспериментальный стенд для захвата и удержания уединенных активных броуновских частиц и сформированных ими кластеров в высокочастотном емкостном разряде при внешнем воздействии лазерного излучения;
- Были получены количественные данные о динамических характеристиках уединенных макрочастиц с различными свойствами поверхности и кластеров янус-частиц в широком диапазоне параметров газового разряда и воздействующего лазерного излучения;
- Было предложено объяснение немонотонного изменения динамических характеристик кластеров активных броуновских частиц при воздействии лазерного излучения.

Научная и практическая значимость работы

Результаты экспериментальных исследований, представленных в данной диссертационной работе, могут оказаться полезными широкому кругу специалистов, в том числе занимающихся изучением физических свойств сильнонеидеальных кулоновских систем и разработкой приложений, связанных с их использованием. В частности, для решения актуальных задач, связанных с оптимизацией транспортных процессов в активных средах.

Знания о динамике и способах управления активными броуновскими частицами могут оказаться полезными для контроля потоков вещества в миниатюрных устройствах типа "*lab-on-a-chip*", прицельной доставки лекарств или микроустройств к больным органам, разрушения вредных веществ в окружающей среде, при разработке каталитических нано- и микромоторов.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментальный стенд для изучения активных броуновских частиц в плазме высокочастотного разряда емкостного типа.
2. Результаты экспериментальных исследований динамических характеристик уединенных активных броуновских частиц при лазерном воздействии.
3. Экспериментальные условия и результаты исследований процессов самоорганизации и эволюции кластера, сформированного янус-частицами в приэлектродном слое при воздействии лазерного излучения.
4. Экспериментально обнаруженный эффект немонотонного изменения динамических характеристик кластера янус-частиц при монотонном увеличении мощности воздействующего лазерного излучения.

Достоверность результатов и апробация работы

Представленные в диссертации результаты экспериментальных исследований с высокой точностью повторяются в экспериментах и согласуются с результатами численных исследований и теоретическими предсказаниями других авторов.

Результаты диссертационной работы докладывались на российских и международных конференциях: 17th International Conference on the Physics of Non-Ideal Plasmas (Germany, 2021); XXXVI International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter (Elbrus, 2021); The 1st COMPACT Science Definition Workshop (Международный воркшоп 2021); XXXV International Conference on Equations of State for Matter (Elbrus, 2020); 63-ая Всероссийская научная конференция МФТИ (Долгопрудный, 2020); A Nature Conference «Advances and Applications in Plasma Physics» (Saint

Petersburg, 2019). Стенд для изучения активных броуновских частиц в плазме высокочастотного разряда емкостного типа прошёл успешную проверку в ходе большого числа экспериментальных исследований.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 9 печатных работ, включая 3 статьи в рецензируемых журналах (список публикаций приведен в конце автореферата).

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Текст диссертации составляет 103 страницы, включая 24 рисунка и 1 таблицу. Список цитируемой литературы содержит 154 наименования.

Личный вклад автора в работы, вошедшие в диссертацию, является определяющим. Автор принимал активное участие в постановке научных задач. Основные результаты, изложенные в диссертационной работе, получены из проведенных автором экспериментов. На основании проведенных исследований и анализа полученных результатов были сформулированы и обоснованы выводы и положения, вошедшие в диссертацию.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** приведено обоснование актуальности, научной новизны и практической значимости задач, решаемых в работе. Сформулирована цель работы и основные научные положения, выносимые на защиту.

Первая глава носит обзорный характер. В ней описана терминология, необходимая для дальнейшего изложения.

В **п.1.1** содержится краткое описание мирового научного опыта по проблеме активного броуновского движения, основные мотивы исследований, связь с различными областями науки и техники, фундаментальную и прикладную значимость работы, а также ее актуальность. Так первоначально исследования активного броуновского движения носили исключительно прикладной характер, связанный с увеличением эффективности катализаторов различных технологических химических реакций. Впоследствии, полученные результаты обрели более самостоятельный физический смысл и были обобщены на многие проблемы физики, биологии, социологии, экономики [1]. В более узком аспекте физика активного броуновского движения связана с такими научными направлениями как физика диссипативных структур и теория эволюции [2], теория хаоса [3], неравновесная термодинамика [4]. В первой

приведены примеры сходных с исследуемым объектов и предметов исследования. Приведены примеры активных броуновских частиц как естественного, так и искусственного происхождения. К первым относят подвижные клетки (например, сперматозоиды), подвижные микроорганизмы и др. К искусственным активным броуновским частицам можно отнести микрочастицы с химически активной поверхностью, хиральные частицы, микро- и нано-роботы и др. [5].

В п.1.2 описаны известные механизмы активности броуновских частиц в различных экспериментальных ситуациях. В большинстве рассмотренных случаев активность частиц была связана с теми или иными химическими реакциями. Чаще всего использовалась реакция разложения перекиси водорода на воду и кислород в присутствии катализаторов (например, платины), которые наносились на отдельные части микрочастицы [6-8]. При этом главной движущей силой являлась реактивная сила, возникающая при лопании пузырьков водорода, а топливом процесса являлся раствор перекиси водорода. В работе [9] предложен способ очистки водоемов от отравляющих веществ и опасных микроорганизмов с помощью большого количества активных микрочастиц. В основе механизма очистки лежала способность оксида титана (TiO_2) разлагать вредные химические агенты до простых безопасных соединений. Микрочастицы магния покрывались толстым слоем оксида титана (с добавлением нанозерен золота) и помещались в воду. В оболочке каждой частицы имелось отверстие, через которое осуществлялся контакт магниевых ядер с водой. В результате реакции $Mg+2H_2O=Mg(OH)_2+H_2$ формировались пузырьки водорода, которые создавали реактивную силу, приводящую микрочастицы в движение. Наличие активности микрочастиц многократно повышало эффективность очистки водных растворов, содержащих отравляющие агенты и болезнетворные микроорганизмы. Термофоретические механизмы активности [10] связаны с наличием градиента температуры внутри микрочастиц и (или) в окружающей частицы среде. Кратко рассмотрен механизм подвижности, основанный на использовании околоскритических бинарных жидкостей в качестве среды для активных частиц [11]. Активация такой системы производилась слабоинтенсивным лазерным излучением. Акустический механизм активности, рассмотрен в работе [12], может лечь в основу новых технологий доставки лекарств и нанороботов в медицине. В качестве активных частиц использовались янус-проволочки двух типов: состоящие из сегментов Au,Ru и Au,Pt. В качестве среды использовалась вода и солевые растворы (имитирующие кровь). Энергетика активного броуновского движения обеспечивалась за счет внешнего ультразвукового излучения на частоте в

несколько МГц. Внешнее магнитное поле также может быть источником энергии для активного броуновского движения [13]. Необходимо отметить, что в одних экспериментах активные броуновские частицы двигались независимо друг от друга, тогда как в других - проявляли коллективные свойства. Рассмотрим основные механизмы активности в пылевой (коллоидной) плазме, которая представляется перспективной средой для исследования активного броуновского движения. Действительно, пылевая разрядная плазма является термодинамически открытой системой, в которой процессы энергетической накачки уравновешены диссипативными процессами. С другой стороны исследования в плазме не перегружены сложными химическими явлениями, что позволяет лучше сосредоточиться именно на кинематике активного броуновского движения. Пылевые частицы имеют характерные размеры 1-10 мкм, что по порядку величины соответствует размерам уже рассмотренных активных броуновских микрочастиц. В разрядной пылевой плазме механизмы активности могут определяться следующими факторами: силой ионного увлечения [14]; фотофоретическими силами [15,16]; реактивными силами (*rocketeffect*) [17] и др. При этом, физика активного броуновского движения в пылевой плазме только начинает развиваться, что обуславливает актуальность проведенных исследований.

В п.1.3 содержится описание главного объекта исследования, которым является пылевая плазма. Приведено описание основных свойств пылевой плазмы, а также методов ее исследования. Кратко изложена история физики газового разряда, приведена основная классификация разрядов. Более подробно описан емкостной высокочастотный разряд. Отмечены его особенности, важные с точки зрения изучения активного броуновского движения.

Во **Второй** главе представлено описание основных частей экспериментальной установки и используемых средств диагностики (рис.1), а также приведено общее описание условий экспериментов по изучению динамики макрочастиц в плазме высокочастотного емкостного разряда. Детально описаны методика получения используемых в экспериментах янус-частиц, основанная на технологиях плазменной модификации поверхности, а также методика формирования электростатической потенциальной ловушки для предотвращения разлета одноименно заряженных макрочастиц.

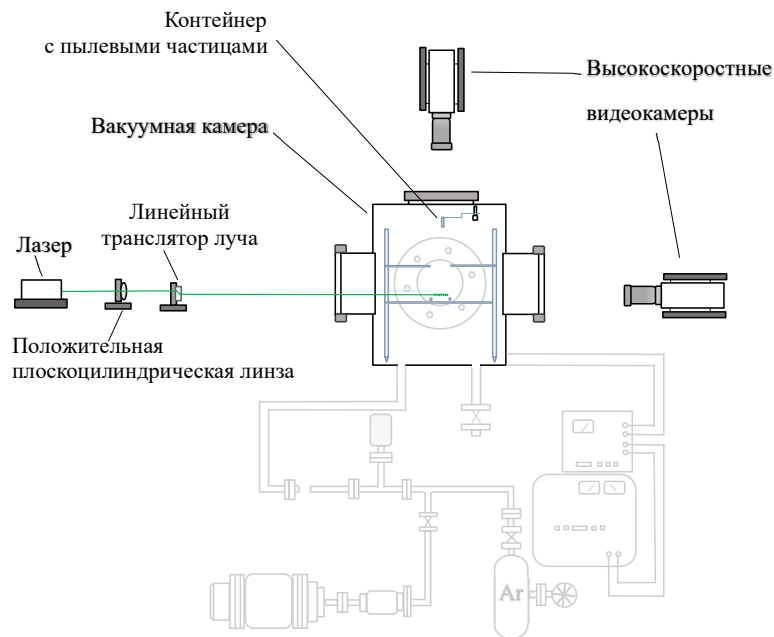


Рис. 1. Схема диагностического комплекса экспериментального стенда емкостного высокочастотного разряда низкого давления

В п.2.1. приведено подробное описание вакуумной системы и электрической части экспериментальной установки, а также описана технология получения янус-частиц и создания электростатического поля с топологией ловушки.

Основными частями вакуумной системы являются газоразрядная камера, вакуумный пост и системы газонапуска и контроля давления. После удаления газовой атмосферы из вакуумной камеры с помощью системы газонапуска и контроля давления подается рабочий газ – аргон, и в вакуумной системе устанавливается требуемое давление в диапазоне от 1 до 100 Па.

Электрическая часть экспериментального комплекса состоит из электродов внутри камеры, высокочастотного генератора и согласующего устройства, соединенных последовательно.

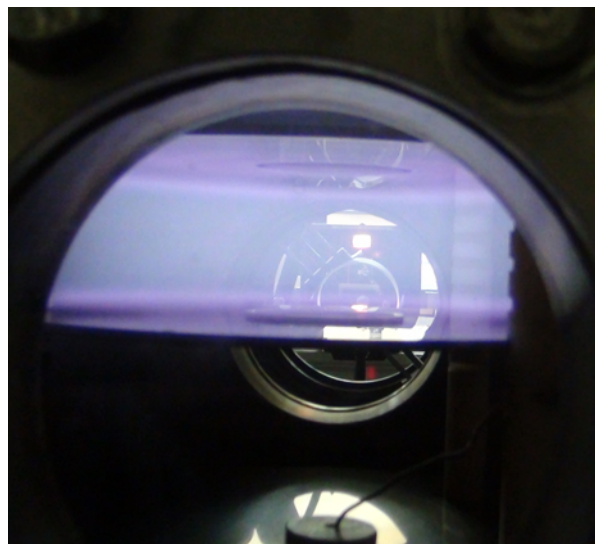


Рис. 2. Фотография межэлектродного пространства в рабочей камере экспериментального комплекса при включенном разряде в атмосфере аргона.

Высокочастотный разряд внутри камеры зажигается между двумя плоскими дискообразными медными электродами диаметром 190 мм. При подаче напряжения с частотой генерации 13,56 МГц на электроды от ВЧ генератора между электродами зажигался высокочастотный емкостной разряд (рис. 2). Подаваемая мощность переменного тока регулировалась в диапазоне 0.1-30 Вт.

Пылевые частицы инжестировались в плазму через отверстие в верхнем электроде диаметром 80 мм. В экспериментальных исследованиях использовались различные типы частиц: полимерные без покрытия, полимерные с металлическим покрытием и янус-частицы на основе полимерных частиц с частичным металлическим покрытием, полученных в экспериментальной установке. Для получения янус-частиц исходные частицы меламина-формальдегида диаметром 10.6 мкм равномерно размещались на специальной подложке, после чего подложка помещалась на нижний электрод и экспонировались в плазме ВЧ-разряда 315 минут. Генерация плазмы емкостного высокочастотного разряда осуществлялась в атмосфере аргона при давлении 5 Па, подаваемой мощности $W_{load}=15$ Вт, при этом отраженная мощность составляла $W_{ref}=3.2$ Вт.

На нижнем электроде размещалось металлическое кольцо-ловушка для создания электростатической потенциальной ловушки. Диаметр кольца-ловушки подбирался в соответствии с исследуемым типом плазменно-пылевой системы: минимального размера для уединенной частицы; для кластерных структур по размеру формируемой системы.

В п. 2.2. приведено подробное описание диагностического комплекса, состоящего из газоразрядного аргонового лазера, системы линз, системы из двух камер высокоскоростной съемки и персонального компьютера.

Высокоскоростные видеокамеры позволяют осуществлять запись положений частиц в горизонтальной и вертикальной плоскостях с частотой съемки до 1000 кадров в секунду с размерами кадра 1440 на 1440 пикселей. Полученные видеоизображения использовались для анализа динамических свойств плазменно-пылевых систем.

Для подсветки и регулируемого воздействия на плазменно-пылевую структуру, использовалось лазерное излучение от аргонового газоразрядного лазера с основной длиной волны 514 нм, проходящее через систему линз и формирующее т.н. лазерный «нож». С помощью лазерного воздействия можно изменять динамику и порядок пылевых частиц в системах, например создавать ламинарные течения в плазменно-пылевом монослое [18], исследовать характер броуновского движения пылевых частиц в квазидвумерных структурах [19, 20], наблюдать кинетический разогрев

плазменно-пылевой структуры и исследовать фазовые переходы в ней [21]. В проведенных экспериментах при исследовании изменений динамики макрочастиц производилось регистрация мощности и профиля распределения интенсивности в пучке лазерного излучения.

В п. 2.3 сформулированы выводы по Главе 2.

В Третьей главе представлены результаты экспериментального исследования активного броуновского движения уединенных пылевых частиц, индуцированное лазерным излучением в симметричной электростатической ловушке ВЧ-разряда. Показано, что рассматриваемое движение можно считать активным. Важным и новым результатом работы является сравнение динамики пылевых частиц разного типа в одинаковых экспериментальных условиях. При этом форма, размеры и масса частиц примерно совпадали, в то время как свойства их поверхности отличались. В частности, в эксперименте использовались: а) сферические меламин-формальдегидные частицы диаметром $\sim 10,6$ мкм; б) такие же частицы, но с тонким однородным медным покрытием; в) такие же частицы, но с тонким неоднородным (покрывалась только одна полусфера) железным покрытием – частицы Януса. Изображения частиц, полученные с помощью электронного микроскопа представлены на рисунке 3. В процессе исследований показано, что характер движения янус-частиц является более сложным по сравнению с регулярными частицами. Так траектории регулярных частиц были круговыми (преимущественно), в то время как траектории янус-частиц состояли из совокупности дуг разной кривизны. Показано, что механизм активного броуновского движения основан на явлении фотофореза. Установлены важные закономерности активного движения янус-частиц. Показано, что зависимость их кинетической энергии от мощности лазера имеет аномальный немонотонный характер.

В п.3.1 представлены данные эксперимента и их анализ. Эксперимент проводился в камере высокочастотного разряда низкого давления. Уединенные пылевые частицы инжесктировались в разрядную камеру

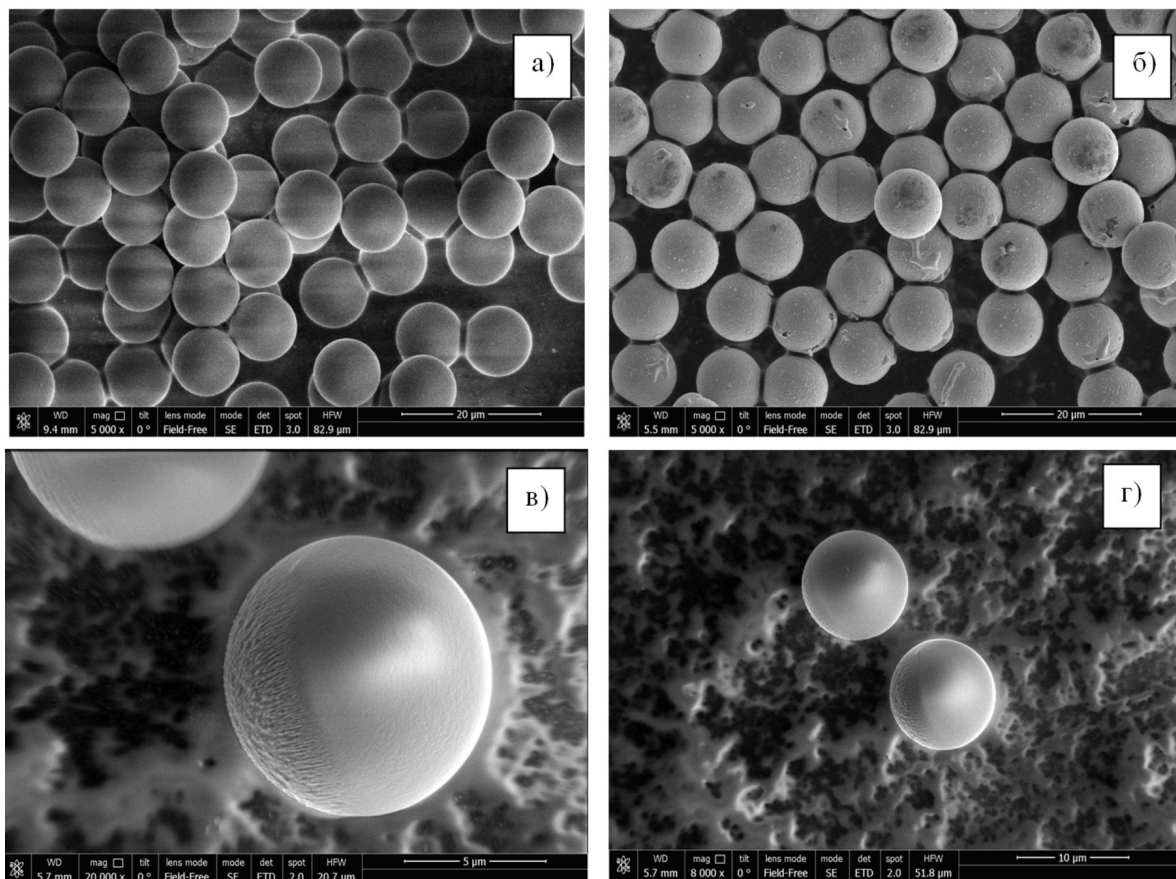


Рис. 3. Изображения используемых сферических пылевых частиц диаметром ~ 10 мкм: (а) меламин-формальдегидные однородные частицы без покрытия; (б) меламин-формальдегидные частицы с медным покрытием; (в), (г) меламин-формальдегидные частицы с частичным железным покрытием (янус-частицы)

в область разряда и подвергались воздействию бокового лазерного излучения различной мощности.

Пылевые частицы приобретали в плазме отрицательный заряд и захватывались электростатической ловушкой, сформированной с помощью медного кольца, установленного на нижнем электроде. Параметры движения записывались высокоскоростными видеокамерами и, впоследствии, обрабатывались специализированным ПО. Схема эксперимента отображена на рисунке 4.

Эксперимент проводился в плазме высокочастотного разряда с рабочей частотой 13,56 МГц, мощностью 11,8 Вт и напряжением 300В. При этом диаметр медного кольца, формирующего электростатическую ловушку составлял 35 мм. В качестве плазмообразующего газа использовался аргон при давлении 3,5 Па. Размер макрочастиц, инжестируемых в плазму составлял 10 мкм. Частота видеосъемки составляла 400 кадров в секунду.

Лазерное излучение различной мощности, воздействующее на частицу, приводило к локальному нагреву ее поверхности. Возникающие при этом термофоретические силы приводили частицу в движение. На рисунке 5 представлены характерные траектории трех типов частиц, описанных выше. При низкой мощности лазера частицы всех видов стремились к центру симметричной электростатической ловушки. Это состояние соответствует минимальной потенциальной энергии частиц. При увеличении интенсивности лазерного воздействия начинали проявляться существенные различия между траекториями движения разных типов частиц. В случае симметричных частиц движение было круговым с некоторой стохастической (броуновской) составляющей. Механизм этого движения можно связать со спин-орбитальным резонансом [22]. В отличие от частиц без покрытия, частицы с медным покрытием эффективно поглощают лазерное излучение [23]. Это, в свою очередь, приводило к увеличению фотофоретических сил и, следовательно, кинетической энергии частиц.

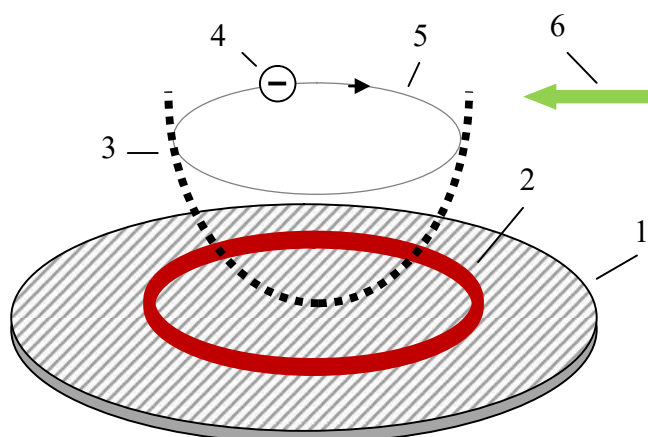


Рис.4. Схематическое отображение электростатической ловушки для пылевых частиц. 1) нижний электрод; 2) медное кольцо; 3) профиль потенциальной ямы; 4) заряженная пылевая частица; 5) траектория движения частицы; 6) лазерное излучение

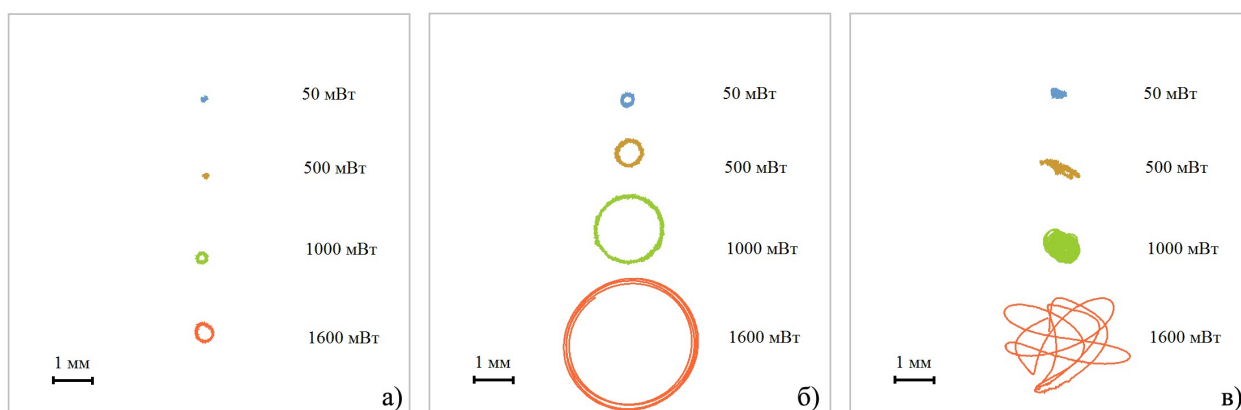


Рис. 5. Траектории частиц за промежутки времени 1 с (левая панель) и 5 с (правая панель), левитирующих в ВЧ разряде при мощности лазерного излучения 50, 500, 1000 и 1600 мВт: а) частицы без покрытия; б) частицы с однородным медным покрытием; в) янус-частицы.

Таким образом, частицы с медным покрытием имели значительно больший радиус вращения в кольцевой электростатической ловушке, чем однородные меламин-формальдегидные частицы при заданной интенсивности лазера. Это движение также является активным, поскольку оно связано с увеличением кинетической энергии направленного перемещения за счет поглощения энергии извне. Вместе с тем, движение частиц с однородной поверхностью в электростатической ловушке можно считать довольно простым. В свою очередь, динамика янус-частиц представляется более сложной. Форма их траектории сильно зависит от мощности лазерного излучения. Круговые траектории наблюдались значительно реже. При этом некоторые участки траекторий являлись дугами, особенно это заметно при больших мощностях лазера. Радиус кривизны дуг хаотически менялся. Соседние дуги соединены точкой перегиба или без нее (рис.5 в).

Для анализа динамики активных броуновских частиц была использована такая характеристика, как *средне-квадратичное смещение* [5]. Соответствующая зависимость $\langle r^2 \rangle(t)$, полученная с использованием специализированного программного обеспечения, представлена на рисунке 6 для всех типов частиц при мощности лазера 1600 мВт. Очевидно, что влияние лазерного излучения на непокрытые частицы было наименьшим в сравнении с частицами с медным покрытием и Янус частицами. Из рисунка 6 также видно, что на коротком временном масштабе функция $\langle r^2 \rangle(t)$ демонстрирует баллистический режим движения с асимптотикой $\sim t^2$ для всех типов частиц. На средних временах, $t \sim 1$ с, при большой мощности лазера частицы с однородной поверхностью демонстрируют движение по окружности, то есть наблюдается режим движения в симметричной ловушке.

Аналогичный режим движения в симметричной ловушке наблюдался в экспериментах [24] (см. рис. 5б при $a=1$). Такому режиму соответствует

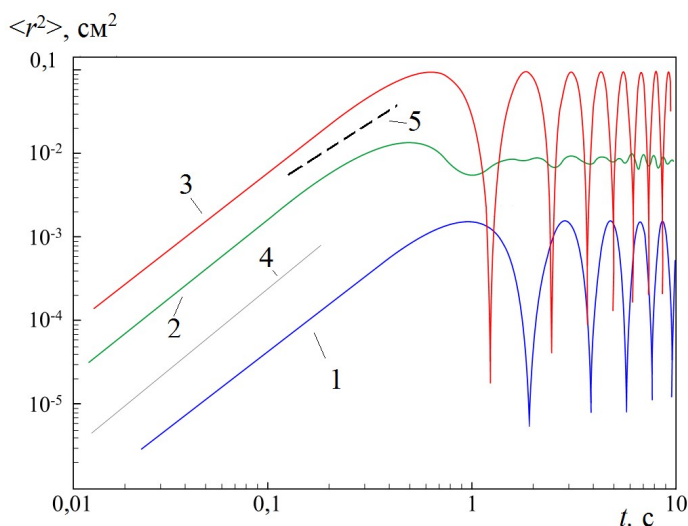


Рис. 6. Среднеквадратичное смещение для уединенных частиц трех типов при воздействии лазера мощностью 1600 мВт. 1 - для частиц без покрытия, 2 - для частиц с медным покрытием, 3 - для янус-частиц, 4 - зависимость $\langle r^2 \rangle = t^2$, 5 - зависимость $\langle r^2 \rangle = t^{3/2}$.

циклоиды на графике $\langle r^2 \rangle(t)$ (рис. 6 кривые 1, 3). Для янус-частиц вместо циклоиды наблюдается выход графика $\langle r^2 \rangle(t)$ на "плато" (кривая 2), что свидетельствует о том, что движение янус-частиц является более сложным. При этом на графике $\langle r^2 \rangle(t)$ не наблюдается асимптотики $\langle r^2 \rangle(t) \sim t^{3/2}$, характерной для активного броуновского движения, в отличие от классических экспериментов для протяженных структур [5, **Ошибка! Источник ссылки не найден.**].

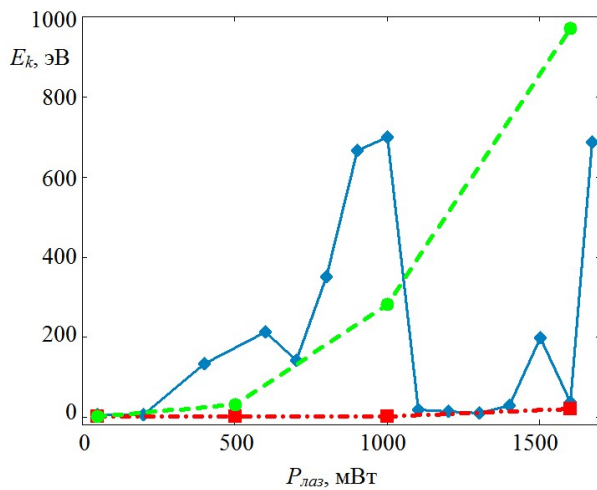


Рис. 7. Кинетическая энергия уединенных пылевых частиц при лазерном воздействии различной мощности: штрихпунктирная кривая – частицы без покрытия; штриховая кривая – частицы с медным покрытием; сплошная – янус-частицы

сплошной медной оболочкой увеличение кинетической энергии можно объяснить ростом фотофоретических сил из-за нагрева поглощающей поверхности частицы. Для частиц с однородной поверхностью зависимость $E_k(P_{\text{лаз}})$ является монотонно возрастающей функцией в рассмотренном диапазоне параметров. Для янус-частиц ситуация меняется кардинальным образом. Как видно из рисунка 7, кинетическая энергия частицы в электростатической ловушке сложным образом зависит от мощности лазера (сплошная кривая). Немонотонный характер зависимости $E_k(P_{\text{лаз}})$ хорошо согласуется с многообразием типов траекторий янус-частиц, обнаруженных в эксперименте.

В п.3.2 кратко представлена теоретическая модель, качественно интерпретирующая наблюдаемые траектории уединенных пылевых частиц в электростатической ловушке высокочастотного разряда. В основе теоретической модели лежит явление спин-орбитального резонанса,

Важным параметром движения в описываемых условиях является кинетическая энергия частиц E_k . С одной стороны, она по определению описывает активность движения. С другой стороны, кинетическая энергия не зависит от формы траекторий частиц, поэтому подходит для описания движения частиц с различными траекториями. Зависимость $E_k(P_{\text{лаз}})$ представлена на рисунке 7. Очевидно, что кинетическая энергия непокрытых частиц мала во всем диапазоне мощностей лазерного излучения, что связано со слабым поглощением света. Для частиц со

описанное в [25, 26]. Показано, что для вращения частицы вокруг собственной оси (спиновое вращение) необходимым условием является геометрическая неидеальность частицы. Орбитальное вращение возникает при наличии спинового. При равенстве частот обоих типов вращения частицы совершают круговое движение. В противном случае движение состоит из отдельных дуг. Данное утверждение подтверждается полученными экспериментальными данными.

В п.3.3 сформулированы выводы по Главе 3.

В Четвертой главе представлены экспериментальные условия и результаты исследований процессов самоорганизации и эволюции 7-частичного кластера, сформированного активными броуновскими янус-частицами в приэлектродном слое ВЧ-разряда при воздействии лазерного излучения. Для анализа полученных результатов использованы функции динамической энтропии исследуемых активных броуновских частиц, получены средние области локализации и фрактальные размерности траекторий частиц. Проведено сравнение результатов для системы янус-частиц с результатами, полученными для системы из полностью покрытых частиц.

В п.4.1 вводится определение динамической энтропии и показывается возможность применения этой величины для анализа степени упорядоченности систем взаимодействующих частиц.

Статистическое определение энтропии ввел Больцман, и появилась возможность с её помощью описывать термодинамически неравновесные процессы. В 1948 году Шеннон ввёл понятие энтропии, которое стало ключевым в теории информации [27]. Понятие информационной энтропии было позднее развито Колмогоровым [28] и Синаем [29], которые ввели новый метрический инвариант h_{KS} динамических систем, определяющий скорость увеличения энтропии S в результате перемешивания траекторий в фазовом пространстве.

Энтропию Колмогорова-Синая затруднительно применять к сложным конфигурационным изменениям динамических систем. Одна из причин этого – её расходимость для броуновского движения в связи с недифференцируемостью траекторий [30, 31]. Поэтому оказалось удобным ввести динамическую энтропию $h(\varepsilon)$, зависящую от величины разбиения ε [30]. В процитированном исследовании для вычисления динамической энтропии используется простое приближение, которое легко можно применять для анализа экспериментов и численного моделирования [30-32]: так называемая “динамическая энтропия первого пересечения” (MFPT

dynamic entropy).

Связь между кинетическими характеристиками системы и эргодической теорией для ряда динамических систем была показана несколько десятилетий назад в работе [33], а именно было установлено фундаментальное соотношение между коэффициентом диффузии, наибольшим показателем Ляпунова и энтропией Колмогорова-Синяя для газа Лоренца. А в ряде работ [34, 35] в качестве индикатора фазового перехода динамической системы использовался наибольший показатель Ляпунова. Понятие динамической энтропии первого пересечения было с успехом использовано в работах [36, 37] для исследования упорядоченности малых систем пылевых частиц в плазме.

В п.4.2 представлены эксперименты с двумя типами частиц, составляющих 7-частичный кластер, левитирующий в приэлектродном слое ВЧ разряда: 1) сферические пластиковые частицы, полностью покрытые медью; 2) сферические пластиковые частицы, наполовину покрытые железом, или так называемые янус-частицы. Данные по полностью покрытым частицам взяты из [36].

Эксперименты с полностью покрытыми частицами.

Экспериментальная работа по изучению динамики кластеров из 7 полностью покрытых медью частиц, формирующих квазидвумерную структуру, проводилась в атмосфере аргона, плазма в которой зажигалась высокочастотным разрядом. Давление газа после откачки камеры составляло 0,01 Па, затем проводилось заполнение камеры аргоном вплоть до давлений 3 - 7 Па. ВЧ-разряд достигал мощности 4 - 12 Вт. Затем в разряд вносились пылевые частицы диаметром 10.16 мкм и плотностью 1.05 г/см³. Частицы быстро приобретали значительный отрицательный электрический заряд и формировали пылевые структуры в приэлектродной области. Изменяя давление и мощность разряда, удавалось добиться осаждения избыточного числа пылевых частиц и получить левитацию единственного кластера, состоящего из 7 частиц. Визуализация структуры и оценка её динамики проводилась с помощью аргонового лазера мощностью 18-300 мВт, луч которого с помощью специального оптического устройства формировал лазерный «нож», толщина которого в области перетяжки составляла около 250 мкм. Движение частиц фиксировалось с помощью высокоскоростной видеокамеры высокого разрешения. В результате обработки видеоизображений были определены координаты частицы на каждом кадре в каждый момент времени, а затем сопоставлением последовательных кадров

определено перемещение частиц.

Эксперименты с частицами Януса.

Эксперименты по исследованию динамики квазидвумерных кластеров, состоящих из 7 наполовину покрытых железом пластиковых частиц, проводились аналогичным образом и в тех же условиях, изложенных в предыдущем пункте. Для формирования плазменно-пылевых структур в разряд инжектировались янус-частицы диаметром ~ 10 мкм. Благодаря приобретению значительного электрического заряда и достижению баланса сил, частицы формировали квазидвумерные структуры, левитируя над электродом. Для подсветки структуры и для изменения кинетических характеристик частиц также использовался аргоновый лазерный “нож” мощностью от 25 до 4500 мВт.

Зависимость средней кинетической энергии янус-частиц от мощности лазерного излучения представлена на рисунке 8. Видно, что кинетическая энергия частиц с повышением мощности лазера сначала падает, достигая минимума при $W_{\text{las}} = 2500$ мВт (5,83 эВ), затем снова возрастает.

Был сделан вывод о том, что с увеличением мощности облучения лазером сначала происходит увеличение потенциальной энергии взаимодействия пылинок благодаря глобальному разогреву частиц плазмы и буферного газа, при котором становится возможным изменение как параметра экранирования, так и заряда пылевых частиц. После прохождения минимума кинетической энергии ($W_{\text{las}} = 2500$ мВт) механизм активного броуновского движения вновь начинает преобладать, и система “разогревается”.

В п.4.3 полученные экспериментальные результаты анализируются с использованием динамической энтропии первого пересечения. Представлены графики зависимости динамической энтропии и её производной от параметра огрубления. Вводятся понятия области локализации частицы и фрактальной размерности её траектории.

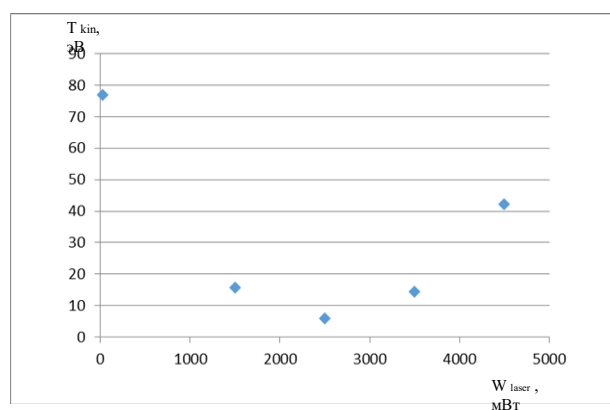


Рис. 8. Зависимость кинетической энергии янус-частиц от мощности лазерного излучения.

Область, в границах которой движется частица в ходе эксперимента, фиксировалась в виде параметра “область локализации частицы” ε_0^* такого, что $S(\varepsilon^*) = 0$ для любого $\varepsilon^* > \varepsilon_0^*$.

На рисунке 9 показана область локализации каждой из частиц кластера из серии экспериментов с полностью покрытыми частицами. Чётко прослеживаются две особые точки: первая – при $T \sim 6$ эВ, когда частицы внешней оболочки резко увеличивают область движения (с $\sim 0,8$ до $\sim 2,5$ средних межчастичных расстояний), и вторая – при $T \sim 13$ эВ, когда резко возрастает область локализации центральной частицы.

На рисунке 10 представлена зависимость областей локализации янус-частиц в зависимости от средней кинетической температуры системы. Обратим внимание, что в случае янус-частиц в упорядоченной системе (при малых температурах)

центральная частица не находится в выделенной позиции, в отличие от систем покрытых частиц. При увеличении кинетической температуры возникает дифференциация областей локализации, которая хорошо согласуется с визуальным наблюдением. Среднее значение области локализации частиц кластера испытывает скачок при значении кинетической температуры $T_{kin} \sim 15$ эВ, когда кластер теряет свою кристаллоподобную структуру.

Значение производной динамической энтропии при больших величинах параметра огрубления выходит на константу D . Эта константа, D , отражает фрактальный характер движения частицы и по абсолютной величине совпадает с фрактальной размерностью её траектории [31, 38].

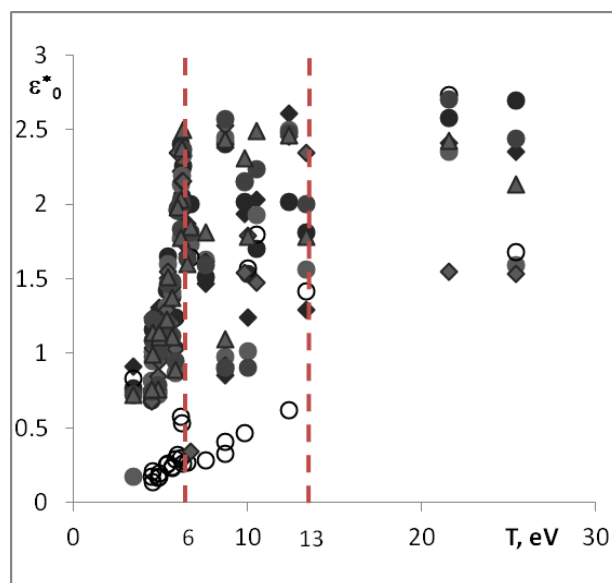


Рис. 9. Области локализации ε_0^* полностью покрытых пылевых частиц в зависимости от средней кинетической температуры T системы. Белые кружки – центральная частица, закрашенные маркеры – шесть частиц внешней оболочки. Вертикальные пунктирные линии указывают на две особые точки полученной зависимости [36].

При $D=2$ реализуется стандартное броуновское движение, которое представляет собой процесс, не проявляющий персистентности (т.е. его приращения независимы). При других значениях параметра движение можно разделить на два типа. Значения $1 < D < 2$ соответствуют персистентному дробному броуновскому движению, значения $D > 2$ – антиперсистентному дробному броуновскому движению [38].

На рисунке 11 представлены значения фрактальной размерности траекторий частиц в зависимости от температуры в экспериментально полученных кластерах, состоящих из полностью покрытых частиц и янус-частиц. При возрастании кинетической температуры системы это значение стремится к 1.5 (значение, характерное для дробного броуновского движения, полётов Леви).

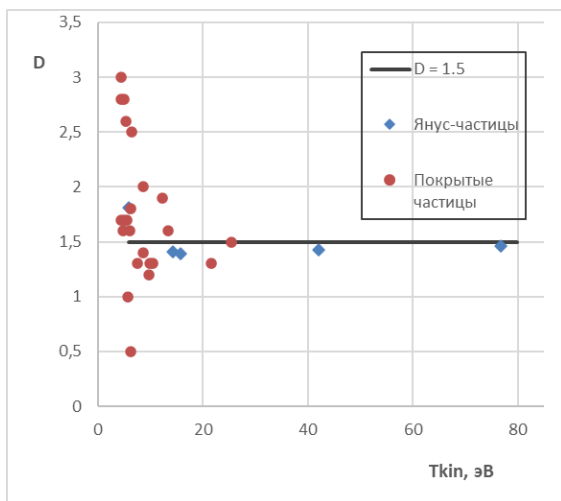


Рис. 11. Средняя фрактальная размерность D траекторий движения покрытых частиц (красные кружки) и янус-частиц (синие ромбы), составляющих 7-частичный кластер, в зависимости от кинетической температуры системы. Горизонтальная линия отмечает значение $D = 1.5$.

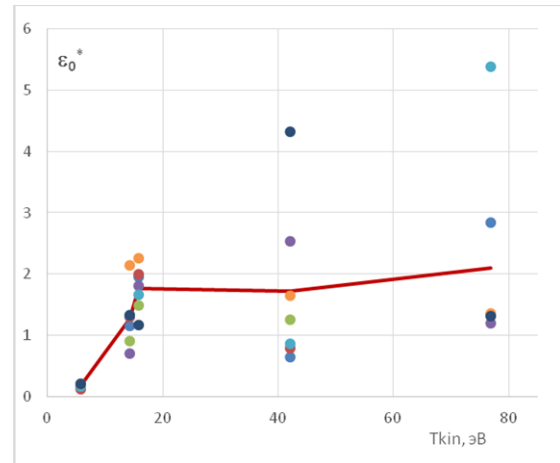


Рис. 10. Области локализации ϵ_0^* Янус-частиц в зависимости от средней кинетической температуры T_{kin} системы. Белые кружки – центральная частица, закрашенные маркеры – шесть частиц внешней оболочки.

Для полностью покрытых частиц в области малых кинетических температур значения средней фрактальной размерности близки к 2 и даже превышают это значение, что соответствует антиперсистентному дробному броуновскому движению. Для системы, состоящей из янус-частиц, в исследованном диапазоне параметров значения средней фрактальной размерности траекторий частиц не превышали 2.

Это говорит о том, что движение полностью покрытых и янус-частиц в эксперименте отличается от классического броуновского, фрактальная размерность которого

равна 2. То есть мы имеем дело с дробным, или фрактальным, броуновским движением. Судя по всему, такой характер движения обусловлен наличием дополнительной постоянной силы, направление которой хаотически меняется, то есть активным характером броуновского движения исследуемых частиц.

В п.4.4 сформулированы выводы по Главе 4.

В **Заключении** представлены основные результаты работы:

Создана модификация экспериментального стенда для захвата и удержания уединенных активных броуновских частиц и сформированных ими кластеров в плазме высокочастотного разряда. Электростатическое поле с топологией ловушки создавалось путем подбора нужной конфигурации электродов и металлических колец. Пылевые частицы инжестировались в плазменный объем посредством специального контейнера с пьезопластиной. Диагностический инструментарий включал в себя комплекс высокоскоростных видеокамер, позволяющих анализировать параметры движения.

Исследовано активное броуновское движение уединенных пылевых частиц, индуцированное лазерным излучением, в симметричной электростатической ловушке емкостного высокочастотного разряда. Показано, что пылевые частицы в плазме газового разряда могут преобразовывать энергию окружающей среды в кинетическую энергию собственного движения. Важным результатом работы является сравнение динамики частиц различного типа в одинаковых экспериментальных условиях. Установлены закономерности активного движения янус-частиц при воздействии лазерного излучения.

Представлены экспериментальные условия и результаты исследований процессов самоорганизации и эволюции 7-частичного кластера, сформированного янус-частицами в приэлектродном слое ВЧ разряда при воздействии лазерного излучения. Для анализа полученных результатов использованы функции динамической энтропии исследуемых активных броуновских частиц, получены средние области локализации и фрактальные размерности траекторий частиц. Проведено сравнение результатов для системы янус-частиц с результатами, полученными для системы из полностью покрытых частиц. Выяснено, что характер движения системы, состоящей из янус-частиц, соответствует активному броуновскому движению, но отличается от системы покрытых частиц большей однородностью при малых кинетических температурах.

Показано, что характер движения янус-частиц в симметричной электростатической ловушке высокочастотного разряда сложным образом

зависит от мощности лазера. Так траектории движения регулярных частиц были близки к круговым во всем диапазоне мощности лазера, в то время как траектории янус-частиц могли быть близкими к круговым, состоять из отдельных дуг или иметь топологию близкую к хаотической. Этот результат наглядно отображен полученной зависимостью кинетической энергии частиц от мощности лазера. В случае регулярных частиц эта зависимость была монотонно возрастающей, а в случае янус-частиц она имела множество локальных экстремумов. Причем такой характер движения наблюдался как для уединенных частиц, так и для кластера из 7 частиц.

Основные результаты диссертации представлены в 9 печатных работах, включая три статьи в реферируемых журналах:

1. Arkar K., Vasiliev M.M., Petrov O.F.; Kononov, E.A., Trukhachev F.M., Dynamics of active brownian particles in plasma // *Molecules*. – 2021. –Vol. 26, I. 3. – P. 561.

2. Vasiliev M.M., Kononov E.A., Arkar K., Petrov O.F., Dynamics of motion of particles with a modified surface in a dusty plasma monolayer // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. –Vol. 1556. – P. 012074.

3. Arkar K., Vasiliev M.M., Petrov O.F., Brownian motion of a lone dust particle in plasma of radio frequency discharge // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. –Vol. 1147. – P. 012113.

4. E.A. Sametov, E.A. Lisin, E.A. Kononov, K. Arkar et al., Effective symmetry breaking of interparticle interaction in chain structures of microparticles in a gas discharge plasma // *Book of abstracts 17th International Conference on the Physics of Non-Ideal Plasmas*. – pp. 47-48. – 2021.

5. Arkar K., Kononov E.A., Vasiliev M.M., Petrov O.F., Dynamics of single Janus particle in electrostatic trap // *Book of abstracts XXXVI International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter*. – pp. 20. – 2021.

6. Vasiliev M.M., Petrov O.F., E.A. Lisin, K. Arkar, Dynamics of Active Brownian Particles in Plasma // *The 1st COMPACT Science Definition Workshop*. – 2021.

7. Arkar K., Vasiliev M.M., Petrov O.F., Dynamics of active Brownian particles in a gas discharge plasma // *XXXV International Conference on Equations of State for Matter*. – pp. 292. – 2020.

8. Аркар Чжо, М.М. Васильев, О.Ф. Петров, Динамика активных броуновских макрочастиц в плазме ВЧ разряда // *Труды 63-й Всероссийской научной конференции МФТИ*. – стр. 72. – 2020.

9. E. Lisin., E. Kononov., E. Sametov., Arkar K. et al., Experimental study of the wakefield a dust particle in a dc discharge of the gas mixture // *Book of abstracts of a Nature Conference «Advances and Applications in Plasma Physics»*. – pp. 114. – 2019.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. C. Castellano, S. Fortunato, V. Loreto // *Rev. Mod. Phys.* **81**, 591 (2009).
2. Пригожин И. Введение в термодинамику необратимых процессов / Пер. с англ. под ред. Н. С. Акулова. 2-е изд. М. Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 160 с (2001).
3. Пригожин И., Стенгерс И., Время. Хаос. Квант // М.: Прогресс, 266 с, (1994).
4. Де Гроот С., Мазур П. Неравновесная термодинамика. М.: Мир. 456 с (1964).
5. Bechinger C. et al. // *Reviews Of Modern Physics*, **88** (2016).
6. Ismagilov R. F., Schwartz A., Bowden N. et al, // *Angew. Chem.,Int. Ed. Engl*, **41**, 652-654 (2002).
7. Paxton W.F., Kistler K.C., Olmeda C.C. et al. // *J. Am. Chem. Soc*, **126**, 13424–13431 (2004).
8. Howse J. R., Jones R. A. L., Ryan A. J. et al. // *Phys. Rev. Lett.*, **99** (4), 048102 (2007).
9. Li J., Singh V. V., Sattayasamitsathit S. et al. // *ACS Nano*, **8**, 11118-11125, (2014).
10. Jiang H. R., Yoshinaga N., Sano M. // *Phys. Rev. Lett.*, **105**, 268302 (2010).
11. Buttinoni I., Volpe G., Kümmel F. et al. // *J. Phys. Condens. Matter*, **24**, 284129 (2012).
12. Wang W., Castro L. A., Hoyos M. et. al. // *ACS Nano*, **6**, 6122-6132, (2012).
13. Dreyfus R., Baudry J., Roper M. L. et al. // *Nature*, **437**, 862-865 (2005).
14. Vladimirov S. V., Khrapak S. A., Chaudhuri M. et al. // *Phys. Rev. Lett*, **100**, 055002 (2008).
15. Du C. R., Nosenko V., Thomas H. M. et al. // *New J. Phys.*, **19**, 073015 (2017).
16. Wieben F., Block D. // *Phys. Plasmas*, **25**, 123705 (2018).
17. Nosenko V., Ivlev A. V., Morfill G. E., // *Phys. Plasmas*, **17**, 123705 (2010).
18. O.S. Vaulina, O.F. Petrov, et. al. // *Plasma Phys. Rep.* **29**, 642 (2003).
19. T.E. Sheridan // *J. Appl. Phys.* **106**, 033303 (2009).
20. Е.А. Кононов, М.М. Васильев, О.Ф.Петров // *ЖЭТФ* **153**(4), 721 (2018).
21. О.Ф. Петров, М.М. Васильев, Й. Тун, и др. // *ЖЭТФ* **147**(2), 372 (2015).
22. Jahanshahi S., Lowen H., Hagen B. // *Phys. Rev. E*, **95**, 022606 (2017).
23. Vasiliev M. M., Petrov O. F., Alekseevskaya A. A., et al. // *Molecules*, **25**, 3375, (2020).
24. Löwen H., // *J. Phys.: Condens. Matter*, **21**, 474203 (2009).
25. van Eymeren J., Wurm G. // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **420**, 183 (2012).
26. Nosenko V., Luoni F., Kaouk A. et al, // *Rev. Research*, **2**, 033226 (2020).

27. С. Е. Shannon // Bell Syst. Tech. J. **27**, 379, 1948; **27**, 623, 1948.
28. Колмогоров А.Н. // Докл. АН СССР, **119**, 861 (1958); **125**, 754 (1959).
29. Синай Я.Г. // Докл. АН СССР, Т. 124, с. 768 (1959); Т. 125, с. 1200, 1959 /
Y. G. Sinai // Dokl. Acad. Sci. USSR, 124, 768, 1959.
30. P. Gaspard and X.-J. Wang //Phys. Rep. **235**, 291, 1993.
31. P. Allegrini, J. F. Douglas, and S. C. Glotzer // PRE **60**, 5714, 1999.
32. P. Gaspard, M. E. Briggs, M. K. Francis, J. V. Sengers, R. W. Gammon,
J. R. Dorfman, and R. V. Calabrese // Nature **384**, 865, 1998.
33. P. Gaspard and G. Nicolis // Phys. Rev. Lett. **65**, 1693, 1990.
34. J. Barré and T. Dauxois, “Lyapunov exponents as a dynamical indicator of a
phase transition” // EPL (Europhysics Letters), V. 55, N.2, 2001
35. Kyung-Hoon Kwon and Byung-Yoon Park. “Lyapunov exponent and the solid-
fluid phase transition”// J. Chem. Phys. **107**, 5171, 1997
36. X. G. Koss, O. F. Petrov, K. B. Statsenko et al. // EPL, V.124, N.4, 2018.
37. К.Г. Косс, О.Ф. Петров, М.И. Мясников и др. // ЖЭТФ **150**, Вып. 1, стр.
111-121, 2016
38. В. В. Mandelbrot, The fractal geometry of nature. // W. H. Freeman and co., San
Francisco, 1982

АРКАР Чжо

ДИНАМИКА И СТРУКТУРЫ АКТИВНЫХ БРОУНОВСКИХ ЧАСТИЦ В ПЛАЗМЕ

Автореферат

Подписано в печать 21.10.21	Уч. – изд.л. 1,0	Формат 60x84/16
Печать офсетная	Заказ № 61	Усл.-печ.л. 1,0
Тираж 100 экз.		Бесплатно

ОИВТ РАН. 125412, Москва, Ижорская ул., 13, стр. 2