

## ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Светлова Антона Сергеевича  
«КОЛЛОИДНЫЕ СИСТЕМЫ АКТИВНЫХ БРОУНОВСКИХ ЧАСТИЦ В ТЛЕЮЩЕМ  
РАЗРЯДЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА»

на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук по специальности

1.3.9 - физика плазмы

Многолетний интерес и интенсивные исследования активного броуновского движения мелкомасштабных частиц и их структур в плазме тлеющего разряда постоянного тока при воздействии лазерного излучения обусловлены удобством моделирования динамики термодинамически открытых диссипативных неравновесных систем. Основное внимание в диссертационной работе уделено экспериментальным исследованиям поведения, так называемых, активных броуновских частиц – это нано- и микромасштабные частицы, способные преобразовывать получаемую извне энергию в энергию собственного направленного движения. Описываемые в диссертации активные броуновские частицы имеют неправильную геометрическую форму, но при этом характеризуются неоднородной поверхностью, которая может быть условно разделена на два или более однородных участка. Такие частицы принято называть янус-частицами. Движение активных янус-частиц представляет собой комбинацию тепловых флуктуаций и направленного движения, что приводит всю систему в состояние, далекое от равновесия. Поэтому такие системы представляют собой лабораторные модели для задач неравновесной физики. В плазме поведение активных янус-частиц только начинают изучать. Таким образом, тема диссертационной работы Светлова Антона Сергеевича представляется *актуальной* и важной с точки зрения различных приложений.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Ее рукопись занимает 110 страниц текста и включает 34 рисунка. Список цитируемой литературы содержит 107 наименований.

*Во введении* автором обосновывается актуальность и выбор темы диссертации, формулируются цель и задачи работы, отмечаются ее научная новизна и практическая значимость, формулируются основные положения, выносимые на защиту.

*В первой главе* приведен обзор литературы по направлениям исследований, затрагиваемым в диссертации. В частности, приводится терминология, используемая автором в диссертации, содержится краткое описание работ по проблеме активного броуновского движения, затрагиваются аспекты физики диссипативных структур, неравновесной термодинамики, приводятся примеры активных броуновских частиц, как естественного, так и искусственного происхождения, перечисляются известные механизмы активности броуновских частиц в различных экспериментальных ситуациях, рассматриваются основные механизмы активности в коллоидной плазме, приводится описание основных свойств пылевой плазмы, а также методов ее исследования,

диагностики и определения параметров пылевых структур в плазме газового разряда. В этой главе также дано описание методов диагностики, используемых автором в диссертационной работе.

*Вторая глава диссертации* посвящена описанию экспериментальной установки и используемых средств диагностики. Приведено подробное описание вакуумной системы и электрической части экспериментальной установки, диагностического комплекса, состоящего из газоразрядного аргонового лазера, системы линз, системы из двух камер высокоскоростной съемки. Описан ход эксперимента, с соответствующими иллюстрациями.

*В третьей главе* представлены результаты экспериментального исследования активного броуновского движения уединенных пылевых частиц в электростатической ловушке тлеющего разряда постоянного тока, индуцированного лазерным излучением. Отмечается, что рассматриваемое движение можно считать активным. Автором показано, что характер движения янус-частиц является более сложным по сравнению со случаем частиц с однородной поверхностью. Показано, что зависимость их кинетической энергии от мощности лазера имеет аномальный немонотонный характер.

*Четвертая глава* посвящена экспериментальному исследованию частиц в цепочечных структурах, возникающих в плазме тлеющего разряда постоянного тока. Изучены их динамические и структурные характеристики при воздействии лазерного излучения различной мощности. Активное движение частиц индуцировалось лазерным излучением, нагревающим поглощающую поверхность частиц. Экспериментально показано, что воздействие лазерного излучения на квазиодномерные (цепочечные) структуры влияет по-разному на структуры из частиц в медной оболочке и из янус-частиц. Сильное взаимодействие заряженных частиц приводило к более сложному поведению наблюдаемых структур. Описаны особенности активного броуновского движения частиц, который связан с преобразованием лазерного излучения частицами в энергию собственного (не теплового) движения.

Основные результаты и выводы сформулированы автором в *Заключении* диссертации. Полученные результаты и выводы представляются новыми и обоснованными, их достоверность не вызывает сомнения и подтверждается апробацией в многочисленных докладах на конференциях, выполненных автором.

Практическая и научная значимость полученных в диссертации результатов заключается в возможности использования разработанных подходов для анализа термодинамически открытых диссипативных систем. Развитые методы представляют интерес для проведения фундаментальных исследований процессов, происходящих в пылевой плазме.

Основной материал диссертации полностью отражен в научных работах автора, опубликованных в печати.

Автореферат полно и правильно отражает содержание диссертации.

Замечания по диссертационной работе.

1. В диссертации «Изучен механизм активного броуновского движения частиц в плазме тлеющего разряда постоянного тока при воздействии лазерного излучения. Действие лазерного излучения на частицу может привести к появлению радиометрической силы, связанной с поглощением на поверхности частиц, изучаемые частицы имеют неоднородное покрытие, что в свою очередь приводит к неравномерному распределению температуры по поверхности частицы». При таком подходе усредненная сила, действующая на частицы, направлена вдоль распространения излучения и неизменна по величине, а, главное, не меняет направления, следовательно, частицы должны двигаться в одну сторону, а в экспериментах часть времени частицы двигаются навстречу лазерному лучу. Возникает естественный вопрос, что заставляет частицы останавливаться, разворачиваться и двигаться против действия силы навстречу излучению, то есть существует другая сила, происхождение которой в диссертации не обсуждается, а это важно для понимания динамики активных частиц.

2. В диссертации декларируется, что частицы удерживаются «в трехмерной ловушке тлеющего разряда постоянного тока», однако физика образования этой ловушки не обсуждается. Было бы целесообразно обсудить этот вопрос, более того, в экспериментах есть возможность измерять и изменять параметры и характерные масштабы этой электростатической ловушки, в частности: поперечный профиль электростатического потенциала можно измерить зондовыми методами и учитывать его пространственное распределение при описании движения частиц; параметры электростатической ловушки и заряд частиц существенно зависят от температуры электронов в разряде, а ее можно изменить, сменив сорт газа, следовательно и динамика частиц может существенно измениться в случае разряда в другом газе, например в гелии; за счет изменения диаметра «капролоновой вставки» можно надеяться на изменение поперечного профиля потенциала ловушки, при этом может измениться и характер движения частиц. Проведение таких экспериментов представляется весьма интересным.

3. Во введении диссертации, в постановке задачи подробно и настойчиво проводится мысль, о том что движение самых разных активных частиц («некоторые бактерии, подвижные клетки, микро- и нанороботы, активные микрокатализаторы, микрокапли в эмульсии, пылевые частицы в разрядной плазме и сверхтекучем гелии и др.») имеют похожую динамику, а сравнительно легкое изучение движения частиц в плазме позволит описать динамику и других термодинамически открытых неравновесных систем. В этой связи в диссертации было бы уместно привести примеры, в которых полученные в работе данные помогли ответить на вопросы, возникшие в смежных областях.

Приведенные замечания не влияют на общую положительную оценку работы. Диссертация выполнена на высоком научном уровне и содержит решение сложных экспериментальных задач, связанных с изучением активного броуновского движения мелкомасштабных частиц и их структур в плазме тлеющего разряда постоянного тока при воздействии лазерного излучения.

В целом диссертационная работа представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013 г. (ред. 07.06.2021 г.), а ее автор Светлов Антон Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 -физика плазмы.

Официальный оппонент:

Главный научный сотрудник отдела физики плазмы

Института прикладной физики

Имени А.В.Гапонова-Грехова РАН (ИПФ РАН)

Доктор физико-математических наук, профессор

28 ноября 2023



С.В.Голубев

Адрес: 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46,

Институт прикладной физики имени А.В. Гапонова-Грехова РАН (ИПФ РАН)

Тел.: +7 (831) 436-62-02

E-mail: [gol@ipfran.ru](mailto:gol@ipfran.ru)

Подпись Голубева Сергея Владимировича заверяю

Ученый секретарь ИПФ РАН

к.ф.-.м.н. Корюкин И.В.

