

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Федерального исследовательского центра

«Институт общей физики
им. А.М. Прохорова
Российской академии наук»
член-корреспондент РАН



/Гарнов С.В./

«10» декабря 2021 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертационную работу Аркар Чжо «Динамика и структуры активных броуновских частиц в плазме» на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы

Диссертационная работа Аркар Чжо посвящена экспериментальному исследованию динамики активной броуновской частицы в плазме высокочастотного разряда емкостного типа при воздействии лазерного излучения, а также динамических и структурных характеристик кластеров, сформированных в приэлектродной области газового разряда такими частицами.

В работе представлен экспериментальный стенд для захвата и удержания уединенных активных броуновских частиц и сформированных ими кластеров в плазме высокочастотного разряда; экспериментально исследовано активное броуновское движение уединенных пылевых частиц, индуцированное лазерным излучением в электростатической симметричной ловушке емкостного высокочастотного разряда; проведено сравнение динамики частиц различного типа в одинаковых экспериментальных условиях; 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; проведено сравнение результатов для системы Янус частиц с результатами, полученными для системы из полностью покрытых частиц.

Работа обладает **научной новизной** и является **актуальной**.

Понятие активной среды появилось в физике в связи с разработкой квантовых источников излучения мазеров и лазеров в середине прошлого века. Активной средой принято называть некоторую термодинамически открытую систему, которая за счет внешних источников энергии (световой, электрической, химической и т.д.) может находиться в возбужденном (неравновесном) состоянии. В первоначальной интерпретации концепция активных сред описывала вещества (твердые, жидкие или

газообразные), отдельные атомы (молекулы) которых могут находиться в метастабильном состоянии. Однако, в последнее время понятие «активная среда» получило более широкое применение при изучении процессов самоорганизации в термодинамически открытых системах. В этой концепции понятие активной среды охватывает широкий круг объектов как живой, так и неживой природы, которые проявляют динамические свойства, не укладывающиеся в рамки классической термодинамики и статистической физики. Составным элементом новой концепции активных сред является понятие «активная броуновская частица». Активной броуновской частицей называют броуновскую частицу, способную преобразовывать энергию, получаемую извне, в собственную кинетическую энергию направленного движения. Самодвижущиеся броуновские частицы (микро-, нанопловцы) находятся в центре внимания научных сообществ, занимающихся физическими и биофизическими исследованиями. Фундаментальная значимость исследований в области активных броуновских частиц состоит в развитии физики эволюции термодинамически открытых систем, установлении принципов самоорганизации и самосборки. Приложениями физики активных броуновских частиц являются: исследования в области доставки лекарственных веществ, разработка новых материалов с параметрами, недостижимыми для пассивных компонентов и др. Всё это определяет актуальность данной работы.

Структура диссертационной работы. Диссертационная работа Аркар Чжо состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Текст диссертации составляет 103 страницы, включая 24 рисунка и 1 таблицу. Список цитируемой литературы содержит 154 наименования.

Во **Введении** даётся обоснование актуальности темы диссертации, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы, формулируются основные положения, выносимые на защиту, и приводится список работ автора по теме диссертации.

Первая глава посвящена аналитическому обзору литературы по теме диссертации. Вводятся определения активной среды и активной броуновской частицы. Рассматриваются механизмы подвижности активных броуновских частиц и прикладные аспекты исследования активного броуновского движения. Представлены основные соотношения и параметры лабораторной пылевой плазмы, используемые в данной работе.

Во второй главе описан созданный экспериментально-диагностический комплекс для исследования активного броуновского движения заряженных микрочастиц в плазме высокочастотного разряда. Низкотемпературная плазма в данном комплексе формируется с использованием технологий высокочастотного разряда. Электростатическое поле с топологией ловушки создается путем подбора нужной конфигурации электродов и металлических колец. Пылевые частицы доставляются в плазменный объем посредством специального пьезовибратора. Диагностический инструментарий включает в себя комплекс высокоскоростных видеокамер, позволяющих исследовать трехмерные параметры движения. С помощью специализированного программного обеспечения анализируется кинетическая энергия пылевых частиц, среднеквадратичное смещение и другие параметры. Разработаны методы получения янус-частиц, основанные на технологиях плазменной модификации поверхности.

Третья глава посвящена анализу экспериментальных данных по динамике уединённых пылевых частиц в плазме. Показано, что пылевые частицы в плазме газового разряда могут преобразовывать энергию окружающей среды (лазерное излучение) в кинетическую энергию движения. Важным результатом работы является сравнение динамики различных частиц в одинаковых экспериментальных условиях. Показано, что янус-частицы имеют более сложный характер движения по сравнению с регулярными частицами. Так, траектории регулярных частиц имеют преимущественно круговой характер, в то время как траектории янус-частиц состоят из совокупности дуг разной кривизны. Сделан вывод о том, что механизм активного броуновского движения основан на явлении фотофореза. Показано, что зависимость кинетической энергии пылинок от мощности лазера имеет аномальный немонотонный характер для янус-частиц. Предложена теоретическая модель для описания наблюдаемых явлений.

В четвёртой 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. 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. Описан экспериментально обнаруженный эффект немонотонного изменения динамических характеристик кластера янус-частиц при монотонном увеличении мощности воздействующего лазерного излучения. В частности, отмечена непрямая зависимость кинетической температуры системы янус-частиц от мощности внешнего лазерного излучения. Выдвинуто предположение, что при взаимодействии с янус-частицами часть энергии лазерного излучения переходит в потенциальную энергию межчастичного взаимодействия частиц.

В Заключение сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе, и сделаны выводы.

В качестве **замечаний** необходимо отметить следующее:

1) В конструкции экспериментального стенда присутствуют две высокоскоростные видеокамеры. Однако в диссертации рассматривается движение частиц в двух измерениях. Неясно, где в анализе динамики пылевых частиц и кластеров использована третья координата, для фиксации которой нужна вторая видеокамера.

2) На стр. 55 утверждается, что "Форма траектории [янус-частиц] сильно зависит от мощности лазерного излучения". Наглядной иллюстрацией этого утверждения служит рисунок 3.6. Однако в кластерах янус-частиц при одной и той же мощности лазера у разных частиц траектории разной формы.

3) На Рисунке 3.4, очевидно, перепутаны кривые 2 и 3, что приводит к затруднению его восприятия. Также в тексте диссертации присутствует большое количество опечаток, грамматических и лексических ошибок.

4) В Главе 4 приводится сравнительный анализ динамики кластеров, состоящих из полностью покрытых частиц и янус-частиц. Следовало бы включить в это сравнение ещё и работу с кластерами из пассивных броуновских частиц.

5) Какое влияние на динамику частиц в кластерах из активных броуновских частиц оказывает количество «оболочек» кластера и число частиц их формирующих.

Эти замечания не снижают общую положительную оценку работы и важность полученных результатов, носят характер рекомендаций. Диссертационная работа Аркар Чжо выполнена на высоком научном уровне и вносит большой вклад в область исследования активных броуновских частиц, а именно сильно взаимодействующих макрочастиц в пылевой плазме газовых разрядов. Автореферат отражает содержание диссертации правильно и полно.

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.

Представляется целесообразным использовать результаты настоящей работы в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Объединённом институте высоких температур РАН, Национальном исследовательском центре "Курчатовский институт", в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН, в Федеральном государственном бюджетном учреждении высшего образования Московском энергетическом институте, в Московском физико-техническом институте (национальном исследовательском университете), в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте химической физики РАН, в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН и других научных организациях.

Публикации и личный вклад автора. Автором совместно с соавторами опубликовано 9 печатных работ, включая 3 статьи в рецензируемых журналах из перечня ВАК, которые легли в основу настоящей диссертационной работы. Диссертация обобщает результаты, представленные в научных публикациях автора. 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.

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 многократно докладывались на российских и международных конференциях. Стенд для изучения активных броуновских частиц в плазме высокочастотного разряда емкостного типа прошёл успешную проверку в ходе большого числа экспериментальных исследований.

В целом диссертация представляет собой законченную научную работу, в которой получен ряд важных научных результатов как фундаментального, так и прикладного характера. Диссертационная работа Аркар Чжо «Динамика и структуры активных броуновских частиц в плазме» полностью соответствует паспорту специальности 1.3.9. Физика плазмы и требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, установленным в «Положении о порядке присуждения ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842 с дополнениями от 21 апреля 2016 года № 335., а её автор Аркар Чжо заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы.

Отзыв на диссертационную работу Аркар Чжо «Динамика и структуры активных броуновских частиц в плазме» был одобрен на заседании Ученого совета теоретического отдела ИОФ РАН, протокол № 10 от 08 декабря 2021 г.

Председатель Ученого Совета
теоретического отдела, д-р. физ.-
мат. наук, профессор

Н.Г. Гусейн-заде

Главный научный сотрудник,
д-р. физ.-мат. наук, профессор

А.М. Игнатов