

ОТЗЫВ

**официального оппонента на диссертацию Аркара Чжо
«Динамика и структуры активных броуновских частиц в плазме»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы**

Диссертация Аркара Чжо посвящена экспериментальному исследованию динамики активных броуновских частиц 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.

Важным объектом исследования в диссертации является так называемая «активная броуновская частица». Такого рода нано- и микромасштабные частицы, способные преобразовывать получаемую извне энергию в энергию собственного направленного движения, находятся в центре внимания научных сообществ, занимающихся физическими и биофизическими исследованиями. Часто описываемые в экспериментах 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. В диссертации исследованиям Янус-частиц уделено существенное внимание. 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. Управление динамикой и состояниями таких систем играет важную роль при проектировании новых «интеллектуальных» устройств и материалов. В плазме поведение активных Янус-частиц только начинают изучать. Таким

образом, диссертационная работа Аркара Чжо представляется актуальной и важной с точки зрения приложений.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Ее рукопись занимает 103 страницы текста и включает 24 рисунка и 1 таблицу. Список цитируемой литературы содержит 154 наименования.

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, теории эволюции, теории хаоса, 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 пылевой (коллоидной) плазме, приводится описание основных свойств пылевой плазмы, а также методов ее исследования, диагностики и определения параметров пылевых структур в плазме газового разряда и магнитных ловушках. В этой главе также дано описание методов диагностики, используемых автором в диссертационной работе.

Во **Второй главе** описаны основные части экспериментальной установки и используемых средств диагностики, а также условия проводимых автором экспериментов по изучению динамики макрочастиц в плазме высокочастотного емкостного разряда. В частности, 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 и персонального компьютера. Кроме того, во второй главе приведено описание методики получения используемых в экспериментах Янус-частиц, основанной на технологиях плазменной модификации поверхности, а также методики формирования электростатической потенциальной ловушки для предотвращения разлета одноименно заряженных макрочастиц.

В **Третьей главе** представлены результаты экспериментального исследования активного броуновского движения уединенных пылевых частиц, индуцированного лазерным излучением в симметричной электростатической ловушке ВЧ-разряда. Отмечается, что рассматриваемое движение можно считать активным. Существенное место в данной главе занимает описание сравнения динамики пылевых частиц разного типа, характеризующихся, в основном, различными свойствами их поверхности, в одинаковых экспериментальных условиях. Автором показано, что характер движения Янус-частиц является более сложным по сравнению со случаем регулярных частиц. Например, для траекторий регулярных частиц свойственен характер преимущественно кругового движения, тогда как траектории Янус-частиц состоят, в основном, из совокупности дуг различной кривизны. Оказалось, что механизм активного броуновского движения основан на явлении фотофореза. Автором установлены важные закономерности активного движения Янус-частиц. Показано, что зависимость их кинетической энергии от мощности лазера имеет аномальный немонотонный характер.

В **четвертой главе** приводится описание условий экспериментов и результатов исследований процессов самоорганизации и эволюции 7-частичного кластера, сформированного активными броуновскими Янус-частицами в приэлектродном слое ВЧ-разряда при воздействии лазерного излучения. Автор проводит анализ экспериментальных результатов. В частности, для анализа полученных результатов автор использует функции динамической энтропии исследуемых активных броуновских частиц. Автором получены средние области локализации и фрактальные размерности

траекторий частиц. Проведено сравнение результатов для системы Янус-частиц (наполовину покрытых железом) с результатами, полученными для системы из полностью покрытых частиц. Делается вывод о том, что с увеличением мощности облучения лазером сначала происходит увеличение потенциальной энергии взаимодействия пылевых частиц благодаря глобальному разогреву частиц плазмы и буферного газа, при котором становится возможным изменение как параметра экранирования, так и заряда пылевых частиц. После прохождения некоторого определенного минимума кинетической энергии механизм активного броуновского движения вновь начинает преобладать, и система «разогревается». Движение частично покрытых железом Янус-частиц и полностью покрытых частиц отличается от классического броуновского движения, фрактальная размерность которого равна двум. Возникает так называемое дробное или фрактальное броуновское движение. Автор связывает возникновение такого характера движения с наличием дополнительной постоянной силы, направление которой хаотически меняется, то есть активным характером броуновского движения исследуемых частиц.

Основные результаты и выводы сформулированы автором в **Заключении** диссертации. Полученные результаты являются достоверными и новыми, а выводы – обоснованными.

Новизна и достоверность приведенных автором диссертации результатов не вызывают сомнений. Основной материал диссертации полностью отражен в научных работах автора, опубликованных в печати.

В целом диссертация представляет собой добротное исследование. Полученные в ней результаты важны для понимания процессов, происходящих в пылевой плазме. Вместе с тем, диссертация несвободна от недостатков. Имеются, в частности, следующие замечания:

- 1) Автор изучает процессы самоорганизации. Для их анализа в диссертации используются функции динамической энтропии исследуемых активных броуновских частиц. Следует отметить, что

пылевая плазма представляет собой открытую неравновесную систему (как и утверждает автором в ряде мест диссертации). При этом для описания процессов самоорганизации следует получить соотношение, которое может рассматриваться как H-теорема, провести сравнение относительной степени упорядоченности различных состояний, а также произвести проверку принципа минимума производства энтропии (см., например, Климонтович Ю.Л. Энтропия и производство энтропии при ламинарном и турбулентном течениях // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10, No. 2. С. 80-83; Klimontovich Yu.L. Entropy evolution in self-organization processes. H-theorem and S-theorem // Physica. 1987. V. 142A, Nos. 1-3. P. 390-404; Климонтович Ю.Л. Проблемы статистической теории открытых систем: критерии относительной степени упорядоченности состояний в процессах самоорганизации // Успехи физических наук. 1989. Т. 158, No. 1. С. 59-91; Климонтович Ю.Л. Турбулентное движение и структура хаоса: Новый подход к статистической теории открытых систем. М.: Наука, 1990. 320 с.; Климонтович Ю.Л. Статистическая теория открытых систем. М.: ТОО «Янус», 1995. 624 с.). Для перехода из состояния слабой в состояние сильной турбулентности в плазме подобный анализ проведен в работе Popel S.I. Entropy and Entropy Production in Modulational Interaction. Transition from Weak to Strong Plasma Turbulence // Physica Scripta. 1998. V. 57, No. 2. P. 272-275. Автору следовало бы использовать предложенную выше схему с тем, чтобы удостовериться, являются ли описанные в диссертации процессы процессами самоорганизации, и определить степень упорядоченности системы в различных состояниях.

- 2) Раздел 3.2 имеет название «Теоретическая модель». В нем приведено фактически лишь качественное описание в применении к активному броуновскому движению уединенных пылевых частиц,

индуцированному лазерным излучением в электростатической симметричной ловушке ВЧ-разряда. В данном разделе фактически не используется никаких формул. В этой связи использование названия «Теоретическая модель» для данного раздела представляется неуместным. Раздел следовало бы назвать, например, как «Качественное описание».

- 3) Автору следовало бы улучшить качество оформления диссертации, в частности, исправить опечатки и ошибки русского языка в тексте, перенумеровать и структурировать выводы в разделе «Заключение».

В целом приведенные выше замечания нисколько не умаляют значимости результатов, полученных в диссертации, и не затрагивают основных ее положений, выносимых на защиту. Автореферат диссертации соответствует ее содержанию. Диссертация выполнена на высоком научном уровне и вносит большой вклад в область экспериментального исследования броуновского движения в плазме. В целом диссертация Аркара Чжо характеризуется актуальностью проведенных исследований, практической значимостью результатов, которые можно квалифицировать как решение научной задачи изучения динамики и структуры активных броуновских частиц в плазме, имеющей значение для развития физики плазмы.

Результаты, полученные в работе Аркара Чжо, имеют высокую научную ценность и могут быть использованы широким кругом специалистов, занимающихся изучением свойств броуновского движения, пылевой плазмы и различных практических приложений. В работе представлено решение ряда актуальных задач, которые представляют самостоятельный интерес и могут быть полезны для постановки новых экспериментов по исследованию пылевой плазмы. Результаты работы целесообразно использовать в Институте космических исследований РАН, Объединенном институте высоких температур РАН, Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт», Физическом институте им. П.Н.Лебедева РАН, Московском энергетическом институте, Санкт-Петербургском государственном

университете, Московском физико-техническом институте, Институте химической физики РАН, Московском инженерно-физическом институте, Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Институте проблем механики РАН и других научных организациях.

Диссертационная работа Аркара Чжо «Динамика и структуры активных броуновских частиц в плазме» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, полностью соответствующую всем требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Работа удовлетворяет критериям, установленным п. 9-14 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013 г., а ее автор Аркар Чжо заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт космических исследований Российской Академии
Наук (ИКИ РАН) 117997, Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная
84/32

Заведующий лабораторией
плазменно-пылевых процессов в
космических объектах ИКИ РАН,
доктор физико-математических
наук, профессор
тел.: +7 (916) 625 62 64
e-mail: popel@iki.rssi.ru



С.И. Попель

Подпись С.И. Попеля заверяю

Ученый секретарь ИКИ РАН,
кандидат физико-математических
наук
тел.: +7 (495) 333-45-34
e-mail: asadovsk@iki.rssi.ru



А.М. Садовский