

УДК 536.3

PACS: 44.40.+a, 42.68Ay, 42.72.g

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-5-53-60

EDN: HJNBVN



## Активное броуновское движение микрочастиц в тлеющем разряде постоянного тока при воздействии лазерного излучения

А. С. Светлов, М. М. Васильев, Р. И. Голятина, С. А. Майоров, О. Ф. Петров

*Экспериментально исследовано активное броуновское движение одиночных пылевых частиц в трехмерной разрядной ловушке постоянного тока под действием лазерного излучения. В эксперименте использовались сферические частицы меламин формальдегида (МФ), часть поверхности которых имела медное покрытие (янус-частица). Проведено сопоставление анализа среднеквадратичного смещения микрочастиц при использовании двухмерного и трехмерного методик диагностики их пространственного положения. Определена средняя кинетическая энергия движения пылевых частиц при различной интенсивности лазерного воздействия. Выполнены оценки энергобаланса пылевых частиц и влияния их вращения на характер движения.*

*Ключевые слова:* пылевая плазма, газовый разряд, страты, активная частица, лазерное излучение, термофорез, энергобаланс, поступательное движение, вращение.

### Введение

Активными броуновскими частицами принято считать частицы, которые могут преобразовывать энергию окружающей среды в

энергию собственного направленного движения [1, 2]. Примером активных броуновских частиц являются многие бактерии, подвижные клетки [3–5], микро- и нанороботы [6], активные микрочастицы [7–9], пылевые частицы в разрядной плазме и сверхтекучем гелии [10–14] и т. д. Активные броуновские частицы могут двигаться как независимо, так и проявлять коллективный характер [3, 15]. Средняя кинетическая энергия активных броуновских частиц может значительно превосходить среднюю кинетическую энергию (температуру) окружающей среды, что свидетельствует о значительной неравновесности процесса [1].

Изначально прикладная значимость физики активных броуновских частиц заключалась в развитии методов повышения эффективности катализа. Со временем область приложений значительно расширилась и к настоящему времени включает: исследования в области доставки лекарственных веществ; разработка новых материалов и др. Фундаментальный аспект исследований заключается в развитии физики неравновесных систем; физики диссипативных структур; принципов самоорганизации, самосборки.

---

Светлов Антон Сергеевич<sup>1</sup>, м.н.с.

Васильев Михаил Михайлович<sup>1,2</sup>, зам. директора по научной работе, д.ф.-м.н.

Голятина Русудан Игоревна<sup>3</sup>, н.с.

Майоров Сергей Алексеевич<sup>1,4</sup>, в.н.с, д.ф.-м.н.

E-mail: mayorov\_sa@mail.ru

Петров Олег Федорович<sup>1,2</sup>, директор ОИВТ РАН, д.ф.-м.н.

<sup>1</sup> Объединённый институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН).

Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет).

Россия, 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, 9.

<sup>3</sup> Институт общей физики имени А. М. Прохорова Российской академии наук.

Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38.

<sup>4</sup> НИИЭТФ, Казахский Национальный Университет им. аль-Фараби.

Казахстан, 050040, г. Алматы, пр. аль-Фараби, 71.

Статья поступила в редакцию 22.09.2023

Принята к публикации 9.10.2023

---

© Светлов А. С., Васильев М. М., Голятина Р. И., Майоров С. А., Петров О. Ф., 2023

Коллоидная плазма является удобным объектом исследования активных броуновских частиц [11]. С одной стороны, в плазме, по сравнению с электролитами, значительно меньшую роль играют химические реакции, что позволяет более точно управлять параметрами процесса. С другой стороны, значительно меньшая вязкость плазмы позволяет использовать слабые источники энергии активного движения. В работе [11] представлены результаты экспериментального исследования параметров активного броуновского движения одиночных микрочастиц под воздействием лазерного излучения в плазме тлеющего разряда постоянного тока. Авторы приводят сравнение движения сферических частиц меламин-формальдегида (МФ) диаметром 5 мкм с различным типом покрытия. В частности, исследовалось три типа частиц: частицы без покрытия; частицы с однородным тонким медным покрытием; янус-частицы, одна часть поверхности которых имела медное покрытие, оставшаяся часть являлась непокрытой. Свойства янус-частиц детально описаны в [16]. Как показали исследования [11], характер движения янус-частиц оказался наиболее многообразным по сравнению с другими частицами. Так частицы с однородным покрытием демонстрировали преимущественно орбитальное движение в трехмерной ловушке тлеющего разряда, их траектории были близки к окружностям разного диаметра в зависимости от мощности лазера. В то же время, динамика янус-частиц представляла сложную комбинацию орбитального и хаотического движений.

Целью данной работы является исследование активного броуновского движения янус-частиц при воздействии лазерного излучения в тлеющем разряде постоянного тока, а также сопоставление двухмерной и трёхмерной методик анализа для исследования активного броуновского движения.

### Экспериментальная установка и средства диагностики

Схема экспериментальной установки тлеющего разряда постоянного тока представлена на рисунке 1. В ходе эксперимента стеклянная трубка откачивалась с помощью тур-

бомолекулярного насоса. В качестве плазмообразующего газа использовали аргон. Давление в трубке составляло 10 Па и поддерживалось непрерывной подачей рабочего газа со скоростью 4 стандартных см<sup>3</sup>/мин. Напряжение и ток разряда составляли  $V = 2,0$  кВ,  $i = 1,25$  мА, соответственно. Подсветка частиц и воздействие на них осуществлялось однородным лучом аргонового лазера с длиной волны 488 нм и радиусом пучка 10 мм. Положение пылевых частиц фиксировалось двумя высокоскоростными видеокамерами, расположенными под углом 90 градусов друг к другу, с частотой 400 кадров в секунду и разрешением 1440×1440 (17,9 мкм/пиксель), что позволило получить качественные и подробные видеоизображения, которые в дальнейшем обрабатывались при помощи специальных компьютерных программ. Одиночные пылевые янус-частицы размером 5 мкм инжектировались в разрядную камеру с помощью магнитного воздействия (встряхивания) контейнера с частицами. После инжекции частицы падали в область положительного столба разряда, где происходила их зарядка и захват в областях ионизации – стратах. Для стабилизации положения страт была использована диэлектрическая конусообразная деталь (вставка), концентрирующая поток электронов и ионов по оси трубки.



Рис. 1. Схема экспериментальной установки

### Экспериментальные данные

Динамика одиночных пылевых частиц в тлеющем разряде определяется рядом сил, главными из которых являются: сила гравитации,  $F_g$ ; электрическая сила со стороны пост-

янного поля разряда,  $F_E$ ; силы ионного и нейтрального увлечения  $F_{id}$ ,  $F_{nd}$ ; фотофоретические силы  $F_f$  [14]. Причем состояние равновесия обеспечивают, как правило, первые три силы  $F_g$ ,  $F_E$ ,  $F_{id}$ . Электрическая сила определяется зарядом пылевых частиц. Для изолированных частиц можно использовать простое приближение ограниченного орбитального движения (OML). Согласно известным моделям [17], величина заряда частицы, погруженной в газовый разряд, зависит от площади поверхности.

Для исследования активного движения частиц в трехмерной конфигурации одиночная микрочастица инжектировалась в стратифицированный тлеющий разряд постоянного тока, где в результате баланса сил  $F_g$ ,  $F_E$  и  $F_{id}$  наблюдалась ее левитация. Для возбуждения активного движения левитирующие частицы облучались лазерным излучением различной интенсивности. Для анализа трехмерного динамического процесса в нашем эксперименте использовались две синхронизированные видеокамеры, фиксирующие движение частиц в двух перпендикулярных плоскостях, что позволило определить их положение в трехмерном пространстве в любой момент времени.

С помощью автоматизированной системы обработки видеоизображений были рассчитаны такие параметры движения как временные зависимости среднеквадратичного смещения частиц, а также их средние кинетические энергии. Таким образом при использовании двух высокоскоростных видеокамер мы можем получить важные для анализа активного броуновского движения характеристики для двухмерного случая (в одной плоскости) для каждой камеры отдельно и для трехмерного случая, учитывая взаимное расположение видеокамер.

Важной характеристикой движения частиц является среднеквадратичное смещение, определяемое по формуле:

$$\langle r^2(t) \rangle = \langle [r(t) - r(0)]^2 \rangle, \quad (1)$$

где  $r(0)$  – вектор начального положения частицы,  $r(t)$  – положение частицы в момент времени  $t$ .

В случае одной частицы производится усреднение по времени, графики представлены на рисунке 2.

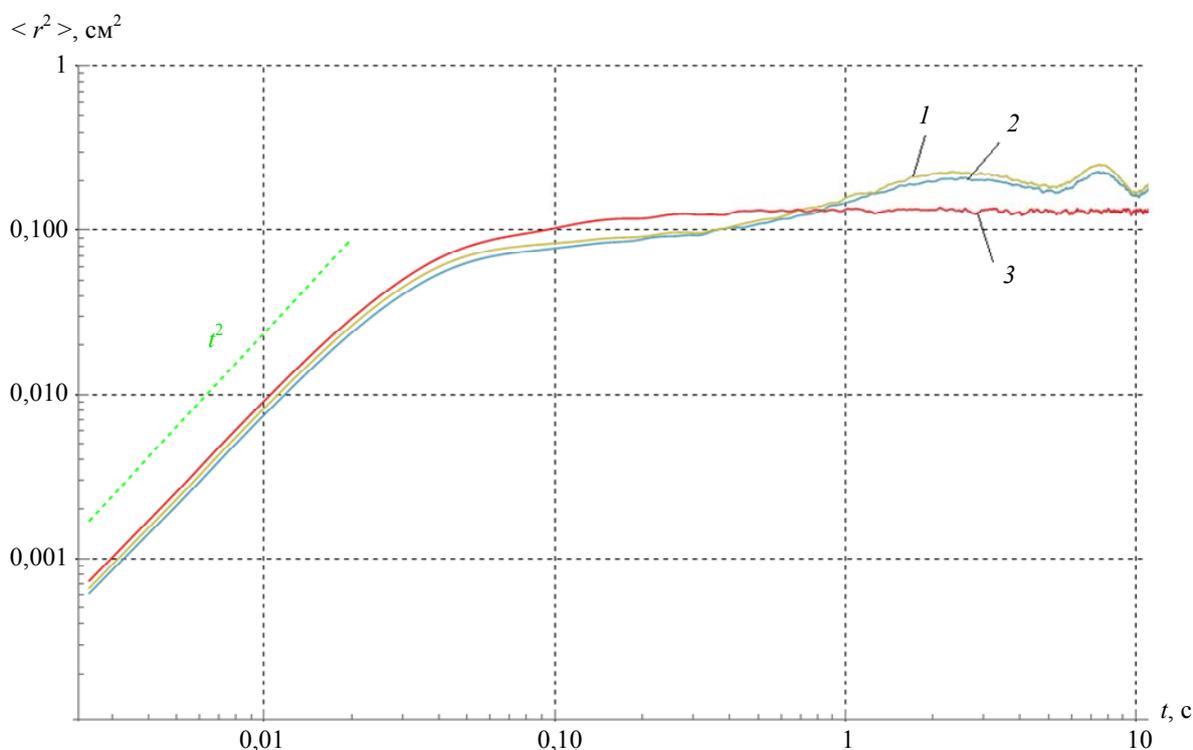


Рис. 2. Среднеквадратичное смещение частиц под воздействием лазера мощностью 900 мВт (плотностью мощности 1,15 Вт/см²): кривая 1 (желтая) – для первой камеры; кривая 2 (синяя) – для второй камеры; кривая 3 (красная) – трехмерный случай

Как видно, характер движения подобен движению одиночных частиц в работе [11]. На малом временном масштабе графики демонстрируют баллистический режим движения с асимптотикой  $\sim t^2$  (зеленая линия). Начиная с момента времени  $t \sim 0,1$  с наблюдается режим движения «в ловушке» с определенным периодом. Так же, как и в [11] наблюдается асимптотика  $\sim t^{3/2}$ , характерная для активного броуновского движения, например, как в классических исследованиях для протяженных структур [2]. Помимо этого, можно наблюдать, что для качественной оценки среднеквадратичных смещений можно использовать методики анализа, как и для двухмерного случая (с одной видеокамерой), так и для трехмерного (используя две видеокамеры), а количественная разница отличается в зависимости от участка кривой, для промежутка до  $t \sim 0,1$  с погрешность составляет не более 5 %, для дальнейшего временного промежутка не более 10 %.

Еще одной характеристикой активного броуновского движения является средняя кинетическая энергия частиц. На рисунке 3 приведена зависимость средней кинетической энергии движения янус-частицы, усредненной по времени ( $t = 60$  с)  $T_k$  от плотности мощности лазера ( $I$ , Вт/см<sup>2</sup>), рассчитанная для трехмерного случая. Кинетическая энергия частиц росла по мере увеличения плотности мощности лазерного воздействия в диапазоне от 0,3 до 1,5 Вт/см<sup>2</sup> следующим образом: от  $T_k \approx 6$  эВ до  $T_k \approx 190$  эВ.

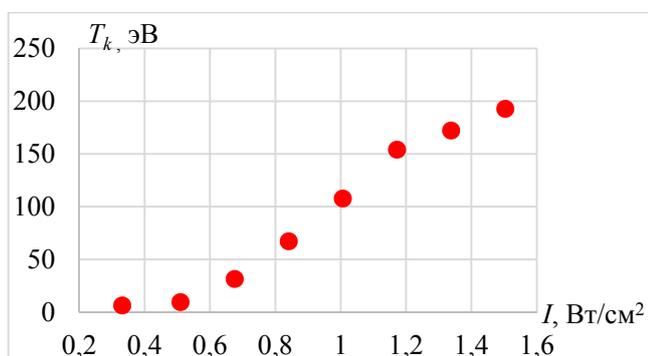


Рис. 3. Зависимость средней кинетической энергии одиночной янус-частицы от плотности мощности лазерного воздействия

Из рисунка 3 видно, что незначительное увеличение интенсивности лазерного излучения приводит к увеличению кинетической

энергии частиц на порядок. При этом при плотности мощности 1,5 Вт/см<sup>2</sup> достигается предельное значение кинетической энергии. Следует отметить, что кинетическая энергия микрочастицы значительно превышает среднюю кинетическую энергию атомов буферного газа ( $T_n \sim 0,03$  эВ), что указывает на активный характер движения.

### Анализ данных

Анализу физических механизмов, порождающих весьма сложную динамику пылевых частиц в низкотемпературной плазме посвящено много работ, см., например [18–29]. В данной работе проведем качественный анализ основных параметров плазмы и динамики янус-частиц в ней для описанных выше экспериментальных результатов. Более подробный анализ будет приведен в отдельной работе.

Механизм активного броуновского движения в данном случае связан с тем, что действие лазерного излучения на частицу может привести к появлению радиометрической силы, связанной с неоднородным поглощением поверхности и, как следствие, неравномерному нагреву и неравномерному распределению температуры по поверхности частицы.

Явление, приводящее к радиометрическому эффекту, имеет молекулярно-кинетическую природу: сталкивающиеся молекулы газа с более нагретой поверхностью частицы после отскока имеют более высокую кинетическую энергию, чем молекулы, сталкивающиеся с ее менее нагретой областью. Это означает, что молекулы, отражаясь от более нагретой области частицы, придают ей больший импульс, чем молекулы, отраженные от менее нагретой части. Таким образом, возникает спонтанное нарушение симметрии, и частице передается нескомпенсированный импульс, флуктуирующий по величине и направлению. В результате интенсивность поступательного и вращательного движения частицы увеличиваются и, таким образом, наблюдается активное броуновское движение.

Сила тяжести, действующая на пылевую микрочастицу из меламин-формальдегида (МФ) диаметром 5 мкм и массой  $M = 0,99 \times 10^{-12}$  г, равна  $F_g = Mg = 0,97$  пН. В условиях левитации сила тяжести является нижней оценкой для сил, действующих на частицу. Односто-

роннее давление на нее при 10 Па равно  $F_g = 196$  пН. Поэтому уже 2 % неоднородность температуры поверхности микрочастицы будет порождать радиометрическую силу, сравнимую с гравитационной.

Рассмотрим энергетический баланс для микрочастицы. Удельная теплоемкость МФ равна 1200 Дж/кг·К, соответственно, тепловая энергия частицы при 300 К равна 2,56 мкДж. В предположении полного поглощения излучения лазерного излучения с интенсивностью 1 Вт/см<sup>2</sup>, поглощаемая мощность равна 0,39 мкВт. Соответственно, при отсутствии потерь энергии, под воздействием лазерного излучения за время  $\Delta t = 8$  с частица достигла бы температуры разложения и самовоспламенения 620 К. Баланс между поглощенной энергией лазера и излученной в приближении полного поглощения и излучения черного тела наступает при температуре 545 К.

Падающий на пылевую частицу электрон приносит энергию  $2T_e$ , поток ионов на микрочастицы в основном обусловлен столкновениями связанных ионов с атомами с резонансной передачей заряда [30]. В таком приближении средняя кинетическая энергия падающих на частицу ионов равна поверхностному потенциалу частицы, который по порядку величины равен утроенной температуре электронов. Попавший на поверхность частицы ион рекомбинирует, и при этом выделяется энергия равная потенциалу ионизации 15,8 эВ. Положим для оценки температуру электронов  $T_e = 7$  эВ, тогда при каждом столкновении иона с микрочастицей будет выделяться энергия равна  $\Delta \epsilon_{rec} = 5T_e + I \approx 50$  эВ.

Задаче определения потока ионов на пылевую частицу посвящено много работ, см., например, обзор и аппроксимацию в работах [25, 30]. Для этого необходимо знание параметров разряда. При напряжении 2000 В трубке длиной 120 см с аргоном при давлении 10 Па приведенная напряженность среднего поля примерно равна 300 Тд. Соответственно, скорости дрейфа ионов и электронов равны 0,9 и 140 км/с, эффективные температуры 0,12 и 7 эВ. Отсюда при токе разряда 1,25 мА и диаметре трубки 4 см получаем числовую плотность электронов  $10^8$  в см<sup>3</sup>. Довольно грубая оценка дает заряд пылевой частицы  $10^4 e$ , а мощность энерговыделения на ее поверхности за счет рекомбинации на два-три

порядка меньше мощности поглощаемого лазерного излучения.

Пылевая частица имеет также собственное вращение [21, 22, 29]. Энергия вращения шара определяется его массой, радиусом и частотой вращения:  $\epsilon_\omega = \frac{1}{2}MR^2\omega^2$ . В условиях равновесия с газом при температуре  $T_a$  функция распределения энергии собственного вращения является максвелловской со средним значением энергии, равным температуре газа:  $\langle \epsilon_\omega \rangle = \frac{3}{2}T_\omega = T_a = \frac{2}{3} \langle \epsilon_a \rangle$  [21]. Соответственно, при температуре газа  $T_a = 300$  К энергия поступательного движения атомов равна 0,039 эВ, а средняя энергия вращения будет равна 0,026 эВ с частотой 73 Гц и скоростью поверхности 0,12 мм/с. Если движение микрочастиц характеризуется температурой 1 или 100 эВ, то частота их вращения в условии равновесия поступательных и вращательных степеней свободы будет соответственно равна 454 и 4541 Гц, соответственно. В случае равенства поступательной и вращательной энергии шара радиуса  $R$  его частота вращения зависит только от скорости шара:  $\omega = V / 4R$ .

Измерения функций распределения скоростей частицы показывают, что они хорошо описываются распределением Гаусса, но с сильно различающимися температурами для движения в горизонтальной плоскости и в вертикальном направлении (вдоль оси трубки) [11]. Этот факт указывает на сильно подавленный энергообмен между различными степенями свободы, обусловленный видимо различной жесткостью электростатической ловушки в продольном и горизонтальном направлениях, а также сильной анизотропией скоростей ионов. Более подробное исследование этого явления планируется в дальнейшей работе.

## Выводы

Экспериментально исследован характер движения одиночных сферических янус-частиц в страте тлеющего разряда под действием лазерного излучения, проведено сопоставление методик для двухмерного и трехмерного анализа среднеквадратичных смещений. На основе анализа показано, что янус-частицы в электро-

статической ловушке тлеющего разряда постоянного тока под действием лазерного излучения совершают активное броуновское движение т. е. преобразуют энергию излучения в кинетическую энергию собственного движения.

Экспериментально показано, что увеличение интенсивности воздействующего лазерного излучения в диапазоне от 0,3 до 1,5 Вт/см<sup>2</sup> на янус-частицу приводило к существенному повышению кинетической энергии.

В результате анализа выявлено, что для качественной оценки среднеквадратичных смещений можно использовать методики анализа, как для двухмерного случая, когда для визуализации и анализа используется видеосъемка движения частиц одной видеокамерой, а изображение траектории движения частицы получается в проекции на плоскость матрицы этой видеокамеры. Количественная разница при этом в отличии от трехмерной диагностики движения отличается в зависимости от исследуемого временного промежутка, в нашем случае до  $t \sim 0,1$  секунды погрешность составляет не более 5 %. При больших временах отличие достигает 10 %.

Представлены результаты аналитических оценок энергобаланса для активных броуновских частиц, поглощающих лазерное излучение. Особое внимание уделено влиянию их собственного вращения на характер движения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Арансон И. С. / УФН. 2013. Т. 183. № 1. С. 87–102.
2. Bechinger C., DiLeonardo R., Löwen H., Reichhardt C., Volpe G. / Rev. Mod. Phys. 2016. Vol. 88. P. 045006.
3. Selmeçietal D. / The European Physical Journal Special Topics. 2008. Vol. 157. № 1. P. 1–15.
4. Berg H. C. Springer Science & Business Media. 2008.
5. Cates M. E. / Rep. Prog. Phys. 2012. Vol. 75. P. 042601.
6. Sanchez S., Ananth A. N., Fomin V. M. / J. Am. Chem. Soc. 2011. Vol. 133. P. 14860–14863.
7. Li J., Singh V. V., Sattayasamitsathit S. / ACS Nano. 2014. Vol. 8. P. 11118–11125.
8. Paxton W. F., Kistler K. C., Olmeda C. C. / Am. Chem. Soc. 2004. Vol. 126. P. 13424–13431.
9. Koss X. G., Petrov O. F., Statsenko K. B., Vasilive M. M. / EPL. 2018. Vol. 124. P. 45001.
10. Nosenko V., Luoni F., Kaouk A., Rubin-Zuzic M., Thomas H. / Phys. Rev. Research. 2020. Vol. 2. P. 033226.
11. Svetlov A. S., Vasiliev M. M., Kononov E. A., Petrov O. F., Trukhachev F. M. / Molecules. 2023. Vol. 28. P. 1790. <https://doi.org/10.3390/molecules28041790>
12. Fairushin I. I., Vasiliev M. M., Petrov O. F. / Molecules. 2021. Vol. 26, P. 6974. <https://doi.org/10.3390/molecules26226974>
13. Koss X. G., Kononov E. A., Lisina I. I., Vasilive M. M., Petrov O. F. / Molecules. 2022. Vol. 27. P. 1614. <https://doi.org/10.3390/molecules27051614>
14. Petrov O. F., Statsenko K. B., Vasiliev M. M. / Scientific Reports. 2022. Vol. 12. P. 8618. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12354-7>
15. Ismagilov R. F., Schwartz A., Bowden N. / Angew. Chem., Int. Ed. Engl. 2002. Vol. 41. P. 652–654.
16. Perro A., Reculosa S., Ravaine S., Bourgeat-Lamic E., Duguet E. / J. Mater. Chem. 2005. Vol. 15. P. 3745–3760.
17. Kononov E. A., Vasiliev M. M., Vasilieva E. V., Petrov O. F. / Nanomaterials. 2021. Vol. 11, P. 2931.
18. Fily Y., Baskaran A., Hagan M. F. arXiv.1601.00324, 2016. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1601>
19. Marchetti M. C., Joanny J. F., Ramaswamy S., Liverpool T. B., Prost J., Rao Madan, Aditi Simha R. / Rev. Mod. Phys. 2013. Vol. 85. P. 1143–1189.
20. Sanchez S., Ananth A. N., Fomin V. M., Vieh-rig M., Schmidt O. G. / J. Am. Chem. Soc. 2011. Vol. 133. P. 14860–14863.
21. Ignatov A. M., Trigger S. A., Maiorov S. A., Ebeling W. / Phys. Rev. E. 2002. Vol. 65. P. 046413.
22. Karasev V. Y., Dzlieva E. S., Pavlov S. I., Novikov L. A., Mashek I. C. / Technical Physics. 2019. Vol. 64. № 1. P. 42–46. <https://doi.org/10.1134/S1063784219010158>
23. Ramazanov T. S., Moldabekov Zh. A., Muratov M. M. / Physics of Plasmas. 2017. Vol. 24. P. 050701. <https://doi.org/10.1063/1.4982606>
24. Свиридов А. Н., Сагинов Л. Д. / Прикладная физика. 2023. № 4. С. 5–15.
25. Khrapak S. A., Morfill G. E. / Phys. Plasmas. 2006. Vol. 13. P. 104506.
26. Swinkels G. H. P. M., Kersten H., Deutsch H., Kroesen G. M. W. / J. Appl. Phys. 2000. Vol. 88. P. 1747–1755. doi: 10.1063/1.1302993
27. Liu F., Daun K. J., Snelling D. R., Smallwood G. J. / Appl. Phys. B. 2006. Vol. 83. P. 355–382.
28. Tsytoovich V. N., Khodataev Ya. K., Morfill G. E., Bingham R., Winter J. / Comments Plasma Phys. Controlled Fusion. 1998. Vol. 18, P. 281.
29. Eymeren J., Wurm G. / Mon. Not. R. Astron. Soc. 2012. Vol. 420. P. 183.
30. Майоров С. А. / Физика плазмы. 2005. № 31. С. 749.

## Active Brownian motion of microparticles in a DC glow discharge during by laser radiation

A. S. Svetlov<sup>1</sup>, M. M. Vasiliev<sup>1,2</sup>, R. I. Golyatina<sup>3</sup>, S. A. Maiorov<sup>1,4</sup> and O. F. Petrov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences  
Bd. 2, 13 Izhorskaya st., Moscow, 125412, Russia  
E-mail: mayorov\_sa@mail.ru

<sup>2</sup> Moscow Institute of Physics and Technology  
9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia

<sup>3</sup> Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences  
38 Vavilov st., Moscow, 119991, Russia

<sup>4</sup> Institute for Experimental and Theoretical Physics, Al-Farabi Kazakh National University  
71, Al-Farabi Ave., Almaty, 050040, Kazakhstan

Received 22.09.2023; accepted 9.10.2023

*The active Brownian motion of single dust particles in a three-dimensional electrostatic DC discharge trap under the action of laser radiation was experimentally studied. The experiment used spherical particles of melamine formaldehyde (MF), part of the surface of which had a copper coating (Janus particle). A comparison of two-dimensional and three-dimensional analysis methods for root-mean-square displacements was carried out. The average kinetic energy of motion of dust particles at different laser irradiation intensities was determined.*

*Keywords:* dusty plasma, gas discharge, stratum, active particle, laser radiation, thermophoresis, energy balance, forward motion, rotation.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-5-53-60

### REFERENCES

1. Aranson I. S., Phys. Usp. **56** (1), 79–92 (2013).
2. Bechinger C., DiLeonardo R., Löwen H., Reichhardt C. and Volpe G., Rev. Mod. Phys. **88**, 045006 (2016).
3. Selmeçzietal D., The European Physical Journal Special Topics **157** (1), 1–15 (2008).
4. Berg H. C., Springer Science & Business Media, 2008.
5. Cates M. E., Rep. Prog. Phys. **75**, 042601 (2012).
6. Sanchez S., Ananth A. N. and Fomin V. M., J. Am. Chem. Soc. **133**, 14860–14863 (2011).
7. Li J., Singh V. V. and Sattayasamitsathit S., ACS Nano **8**, 11118–11125 (2014).
8. Paxton W. F., Kistler K. C. and Olmeda C. C., Am. Chem. Soc. **126**, 13424–13431 (2004).
9. Koss X. G., Petrov O. F., Statsenko K. B. and Vasiliev M. M., EPL **124**, 45001 (2018).
10. Nosenko V., Luoni F., Kaouk A., Rubin-Zuzic M. and Thomas H., Phys. Rev. Research **2**, 033226 (2020).
11. Svetlov A. S., Vasiliev M. M., Kononov E. A., Petrov O. F. and Trukhachev F. M., Molecules **28**, 1790 (2023). <https://doi.org/10.3390/molecules28041790>
12. Fairushin I. I., Vasiliev M. M. and Petrov O. F., Molecules **26**, 6974 (2021). <https://doi.org/10.3390/molecules26226974>
13. Koss X. G., Kononov E. A., Lisina I. I., Vasiliev M. M. and Petrov O. F., Molecules **27**, 1614 (2022). <https://doi.org/10.3390/molecules27051614>
14. Petrov O. F., Statsenko K. B. and Vasiliev M. M., Scientific Reports **12**, 8618 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12354-7>

15. Ismagilov R. F., Schwartz A. and Bowden N., *Angew. Chem., Int. Ed. Engl.* **41**, 652–654 (2002).
16. Perro A., Reculosa S., Ravaine S., Bourgeat-Lamic E. and Duguet E., *J. Mater. Chem.* **15**, 3745–3760 (2005).
17. Kononov E. A., Vasiliev M. M., Vasilieva E. V. and Petrov O. F., *Nanomaterials* **11**, 2931 (2021). <https://doi.org/10.3390/nano11112931>
18. Fily Y., Baskaran A. and Hagan M. F. arXiv.1601.00324 (2016). <https://doi.org/10.48550/arXiv.1601>
19. Marchetti M. C., Joanny J. F., Ramaswamy S., Liverpool T. B., Prost J., Rao Madan and Aditi Simha R. *Rev. Mod. Phys.* **85**, 1143–1189 (2013).
20. Sanchez S., Ananth A. N., Fomin V. M., Viehrig M. and Schmidt O. G., *J. Am. Chem. Soc.* **133**, 14860–14863 (2011).
21. Ignatov A. M., Trigger S. A., Maiorov S. A. and Ebeling W., *Phys. Rev. E* **65**, 046413 (2002).
22. Karasev V. Y., Dzljeva E. S., Pavlov S. I., Novikov L. A. and Mashek I. C., *Technical Physics* **64** (1), 42–46 (2019). <https://doi.org/10.1134/S1063784219010158>
23. Ramazanov T. S., Moldabekov Zh. A. and Muratov M. M., *Physics of Plasmas* **24**, 050701 (2017). <https://doi.org/10.1063/1.4982606>
24. Sviridov A. N. and Saginov L. D., *Applied Physics*, № 4, 5–15 (2023) [in Russian].
25. Khrapak S. A. and Morfill G. E., *Phys. Plasmas* **13**, 104506 (2006).
26. Swinkels G. H. P. M., Kersten H., Deutsch H. and Kroesen G. M. W., *J. Appl. Phys.* **88**, 1747–1755 (2000). doi: 10.1063/1.1302993
27. Liu F., Daun K. J., Snelling D. R. and Smallwood G. J., *Appl. Phys. B* **83**, 355–382 (2006).
28. Tsytoich V. N., Khodataev Ya. K., Morfill G. E., Bingham R. and Winter J., *Comments Plasma Phys. Controlled Fusion* **18**, 281 (1998).
29. Eymeren J. and Wurm G., *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **420**, 183 (2012).
30. Maiorov S. A., *Plasma Physics Reports*, № 31, 690 (2005).