УДК 53.097

DOI: 10.21779/2542-0321-2018-33-1-16-21

В.И. Владимиров, Л.В. Депутатова, Д.С. Лапицкий, В.Я. Печеркин, Р.А. Сыроватка, В.С. Филинов

Внутренняя энергия кулоновских структур в линейной электродинамической ловушке

Объединенный институт высоких температур Российской академии наук; Россия, 125412, г. Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2; syrovatkara@gmail.com

Проведено численное и экспериментальное исследование кулоновских структур в линейных квадрупольных электродинамических ловушках. Моделирование динамики заряженных частиц размером 2 мкм в электродинамической ловушке было проведено путем численного решения уравнения Ланжевена, в котором учитывались: сила, действующая на частицу со стороны ловушки; сила вязкости; межчастичные взаимодействия; вес частиц и случайная сила, возникающая за счет непрерывных соударений частицы с молекулами газа. В эксперименте использовались частицы стеклоуглерода размером от 10 до 20 мкм. Зарядка частиц производилась в коронном разряде. Динамика частиц, подсвеченных с помощью лазера, регистрировалась цифровой видеокамерой.

Были получены парные корреляционные функции для частиц, удерживаемых в электродинамической ловушке. В случае численного моделирования полученная корреляционная функция указывает на сильную упорядоченность кулоновской структуры. В случае эксперимента корреляционная функция имеет нехарактерно низкий первый пик и указывает на отсутствие упорядоченности.

Был произведен расчет внутренней энергии кулоновских структур методами статистической теории жидкого состояния вещества. Для численного моделирования внутренняя энергия, отнесенная на одну частицу, составила $4 \cdot 10^{-13}$ Дж, в то время как для эксперимента – $3 \cdot 10^{-15}$ Дж.

Ключевые слова: *электродинамическая ловушка, кулоновская структура, внутренняя энергия.*

Введение

Кулоновские системы представляют собой совокупность заряженных частиц, взаимодействующих друг с другом посредством сил электрической природы. Сильно коррелированные системы заряженных частиц, полученные в газовых разрядах низкого давления, демонстрируют такие представляющие научный интерес явления, как фазовые переходы, волны и неустойчивости различной природы [1]. Помимо удержания заряженных пылевых частиц в газовых разрядах, которое обусловлено комбинацией сил электрической и неэлектрической природы, возможно удержание заряженных частиц с помощью переменных электрических полей в электродинамических ловушках Пауля [2]. Одно из первых экспериментальных наблюдений кулоновских структур в электродинамических ловушках было проведено в конце 50-х годов прошлого века [3]. В этой работе смесь железных и алюминиевых частиц микронного размера удерживалась в вакууме с помощью классической ловушки Пауля, представляющей собой кольцо в форме гиперболоида вращения с двумя колпаками и с гиперболической поверхностью. В

1991 г. была опубликована работа, в которой кулоновская структура из антраценовых частиц удерживалась в классической ловушке Пауля при атмосферном давлении [4]. В работе [5] было проведено математическое моделирование динамики заряженных пылевых частиц в линейной квадрупольной электродинамической ловушке при атмосферном давлении; были определены область удержания частиц и максимальное количество частиц, захватываемых ловушкой. В настоящее время ведутся работы по исследованию возможности применения электродинамических ловушек в системах фильтрации воздуха [5]. Сепарация заряженных пылевых частиц с помощью переменных электрических полей рассматривалась в работе [6], в которой был обнаружен эффект расслаивания кулоновской структуры на два облака с частицами разного размера. Электродинамические ловушки могут применяться в исследованиях атмосферных аэрозолей [7].

Целью работы является исследование кулоновских структур в линейной квадрупольной электродинамической ловушке с помощью анализа парных корреляционных функций.

Моделирование

Методами математического моделирования исследовались кулоновские структуры в линейной квадрупольной электродинамической ловушке, состоящей из четырех параллельных цилиндрических электродов диаметром 3 мм и длиной 10 см, расположенных на расстоянии 2 см друг от друга по углам квадрата со стороной 2 см, на которые подавалось переменное напряжение $U_{\text{trap}} = U_A \sin(\omega t)$ с фазовым сдвигом, равным π между соседними электродами, с амплитудой $U_A = 5$ кВ и частотой $\omega = 2\pi \cdot 50$ Гц.

Для моделирования движения частиц в электродинамической ловушке использовался метод молекулярной динамики, для каждой частицы численно решалось уравнение Ланжевена:

$$m_i \frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2} = \mathbf{F}_{\text{trap}}(\mathbf{r}_i, t) - 6\pi\mu \frac{d_i}{2} \frac{d\mathbf{r}_i}{dt} + \sum_{j \neq i} k \frac{q_j q_i}{r_{ji}^2} \frac{\mathbf{r}_{ji}}{r_{ji}} + m_i \mathbf{g} + \mathbf{F}_{b_i}(t), \quad (1)$$

частицы с молекулами газа (температура воздуха T принималась где m_i – масса i -той частицы, $\mathbf{r}_i$ – радиус-вектор i -той частицы, $\mathbf{F}_{\text{trap}}(\mathbf{r}_i)$ – сила, действующая на частицу со стороны электродинамической ловушки, μ – динамическая вязкость воздуха, d_i – диаметр i -той частицы, q_j и q_i – заряды j -той и i -той частиц, $\mathbf{r}_{ji}$ – вектор, направленный от j -той частицы к i -той частице, модуль которого равен расстоянию между этими частицами, $\mathbf{g}$ – ускорение свободного падения, $\mathbf{F}_{b_i}(t)$ – дельта-коррелированная случайная сила, возникающая за счет непрерывных соударений равной 300 К).

При проведении численного эксперимента моделировалось движение 10 000 частиц диаметром 2 мкм с зарядом $q = 2\,500\,e$ (e – заряд электрона), плотность материала частиц принималась равной 4 г/см^3 . На рисунке 1 представлена полученная при моделировании парная корреляционная функция через десять секунд после инъекции заряженных частиц в ловушку.

Рис. 1. Полученная при моделировании парная корреляционная функция через десять секунд после инъекции частиц; $d = 1$ мкм, $q = 2\,500$ е

Расчет внутренней энергии кулоновской системы U производился в рамках статистической теории жидкого состояния вещества [8]:

$$U = \sum_N \left(\frac{m_i v_i^2}{2} + m_i g h_i \right) + N \left(\frac{3}{2} kT + \frac{2\pi}{v} \int_0^\infty \Phi(r) g(r) r^2 dr \right) \approx N \frac{2\pi}{v} \int_0^\infty \Phi(r) g(r) r^2 dr, \quad (2)$$

где первое слагаемое обозначает суммарную кинетическую энергию частиц и потенциальную энергию кулоновской структуры в поле силы тяжести, N – количество частиц в кулоновской системе, k – постоянная Больцмана, T – температура, v – объем, приходящийся на одну частицу, $\Phi(r)$ – энергия парного взаимодействия частиц. Следует отметить, что вклад в полную энергию системы энергии межчастичного взаимодействия является определяющим. Для указанных параметров численного эксперимента энергия, приходящаяся на одну частицу U/N , составила $4 \cdot 10^{-13}$ Дж.

Эксперимент

В работе использовалась горизонтальная линейная квадрупольная ловушка, состоящая из четырех стальных стержней диаметром 2 мм и длиной 10 см, находящихся на расстоянии 3 см друг от друга, на которые подавалось переменное напряжение амплитудой 2,6 кВ и частотой 50 Гц. В торцах ловушки находились дополнительные электроды, на которые подавался постоянный электрический потенциал 300 В, предотвращающий разлет частиц в аксиальном направлении. Использовались сферические частицы из стеклоуглерода диаметром от 10 до 20 мкм, заряжавшиеся в коронном разряде [9] и инжестированные внутрь ловушки.

Регистрация пылевых частиц осуществлялась с помощью видеокамеры HiSpec 1, скорость съемки совпадала с частотой переменного напряжения ловушки, что позволяло отсеять микроколебания частиц. Подсветка частиц осуществлялась плоским лазерным лучом толщиной 0,25 мм.

Кулоновская структура из частиц стеклоуглерода, удерживаемая в электродинамической ловушке, представлена на рисунке 2. Для построения парной корреляционной функции (рис. 3) с целью увеличения выборки использовалась видеозапись движения частиц из двухсот кадров. Парная корреляционная функция строилась для каждого кадра, после чего каждое дискретное значение усреднялось.

Рис. 2. Кулоновская структура из частиц стеклоглуглерода размером от 10 до 20 мкм. $U_A = 2,6$ кВ, $f = 50$ Гц

Рис. 3. Парная корреляционная функция для частиц из стеклоглуглерода

Парная корреляционная функция имеет первый пик небольшой высоты, что является нетипичным. Вероятно, это связано с тем, что в разных частях структуры концентрация частиц может различаться. Тем не менее, представленная парная корреляционная функция позволяет судить о слабом взаимодействии между частицами и об отсутствии упорядоченности.

Для описанных выше экспериментальных условий по формуле (2) получим энергию, приходящуюся на одну частицу $U/N = 3 \cdot 10^{-15}$ Дж, что на два порядка меньше результата, полученного в ходе численного эксперимента. Такое различие может быть связано с тем, что для построения парной корреляционной функции в эксперименте использовалась часть кулоновской структуры, расположенная ближе к краю ловушки, где удерживающая сила слабее. Кроме того, используемые в эксперименте и моделировании частицы существенно различались по размеру.

Заключение

Проведено численное и экспериментальное исследование динамики заряженных пылевых частиц в линейной горизонтально ориентированной электродинамической ловушке. Для структуры частиц из стеклоглуглерода, удерживаемых в ловушке, была получена парная корреляционная функция, имеющая нетипично низкий первый пик. Мето-

дами статистической теории жидкого состояния вещества была рассчитана внутренняя энергия кулоновской структуры, полученная в ходе численного и натурального экспериментов.

Литература

1. Fortov V.E., Khrapak A.G., Khrapak S.A., Molotkov V.I., Petrov O.F. Dusty plasmas // *Phys. Usp.* – 2004. – V. 47. – P. 447–492.
2. Paul W. Electromagnetic traps for charged and neutral particles // *Rev. Mod. Phys.* – 1990. – V. 63, № 3. – P. 531–540.
3. Wuerker R.F., Shelton H. and Langmuir R.V. Electrodynamic Containment of Charged Particles // *J. App. Phys.* – 1959. – V. 30, № 3. – P. 342–349.
4. Winter H. and Ortjohan H.W. Simple demonstration of storing macroscopic particles in a "Paul trap" // *Am. J. Phys.* – 1991. – V. 59, № 9. – P. 807–813.
5. Vasilyak L.M., Vladimirov V.I., Deputatova L.V., Lapitsky D.S., Molotkov V.I., Pecherkin V.Ya., Filinov V.S. and Vortov V.E. Coulomb stable structures of charged dust particles in a dynamical trap at atmospheric pressure in air // *New J. Phys.* – 2013. – V. 15. – P. 043047.
6. Лапицкий Д.С. Сепарация микрочастиц с помощью линейной ловушки Пауля // *Вестн. ДГУ* – 2017. – Т. 31, № 4. – С. 36–40.
7. Mihalcea B.M., Stan C., Giurgiu L.C., Groza A., Surmeian A., Ganciu M., Filinov V.S., Lapitsky D.S., Deputatova L.V., Vasilyak L.M., Pecherkin V.Ya., Vladimirov V.I., Syrovatka R.A. Multipole Traps as Tools in Environmental Studies // *Rom J. Phys.* – 2016. – V. 61, № 7–8. – P. 1395–1411.
8. Фишер И.З. Современное состояние теории жидкостей // *УФН* – 1962. – Т. 76. – С. 499–518.
9. Василяк Л.М., Владимиров В.И., Депутатова Л.В., Лапицкий Д.С., Печеркин В.Я., Сыроватка Р.А., Филинов В.С. Зарядка микрочастиц в коронном разряде в воздушном потоке // *Успехи прикладной физики*. – 2017. – Т. 5, № 2. – С. 329–334.

Поступила в редакцию 22 января 2018 г.

UDC 53.097

DOI: 10.21779/2542-0321-2018-33-1-16-21

Internal energy of coulomb structures in linear electrodynamic trap

**V.I. Vladimirov, L.V. Deputatova, D.S. Lapitsky, V.Ya Pecherkin, R.A. Syrovatka,
V.S. Filinov**

*Joint Institute for High Temperatures RAS; Russia, 125412, Moscow, Izhorskaya st., 13,
Bd. 2; cryolab@ihed.ras.ru*

Experimental and numerical study of Coulomb structures in linear quadrupole electrodynamic traps were made. Simulation of the dynamics of charged particles with a size of 2 μm in the electrody-

namic trap was carried out by numerically solving the Langevin equation, which took into account the force acting on the particle from the trap, viscosity, interparticle interactions, weight of the particles and the random force arising due to collisions of the particle with molecules of gas. In the experiment, we used glassy carbon particles with sizes ranging from 10 to 20 μm , which were charged in the corona discharge. The dynamics of particles illuminated with a laser was registered with the help of a digital video camera. Coupled correlation functions for particles confined in the electrodynamic trap were obtained. In the case of numerical simulation, the resulting correlation function indicates a strong ordering of the Coulomb structure. In the case of the experiment, the correlation function has an uncharacteristically low first peak and indicates a lack of ordering. The internal energy of the Coulomb structures was calculated by the statistical theory of the liquid state of matter. For numerical simulation, the internal energy per particle was $4 \cdot 10^{-13}$ J, while for the experiment it was $3 \cdot 10^{-15}$ J.

Keywords: *electrodynamic trap, Coulomb structure, internal energy.*

Received 22 January, 2018