

01;04

Особенности строения бикомпонентных плазменно-пылевых кулоновских шаров

© С.Г. Псахье, К.П. Зольников, Л.Ф. Скоренцев,
Д.С. Крыжевич, А.В. Абдрашитов

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск
Сибирский физико-технический институт, Томск
E-mail: kost@ispms.tsc.ru

Поступило в Редакцию 10 августа 2007 г.

Проведено исследование бинарной смеси пылевых частиц в плазме, находящихся во внешнем электростатическом сферическом удерживающем поле. Расчеты проводились в рамках метода молекулярной динамики, а межчастичное взаимодействие описывалось парным изотропным потенциалом Юкавы. Показано, что частицы образуют оболочечную структуру, в которой каждая оболочка содержит только свой сорт частиц. Изучены структурные свойства бинарной смеси частиц и особенности их сегрегации в условиях недавних экспериментов по созданию кулоновских шаров.

PACS: 52.27.Gr, 36.40.Ei, 52.27.Jt

Плазменно-пылевые системы уже более десяти лет являются предметом интенсивных исследований [1]. Особый интерес был вызван открытием так называемых плазменных кристаллов — упорядоченных структур пылевых частиц (ПЧ). В ходе недавних экспериментов [2–4] удалось создать так называемые кулоновские шары (КШ) — трехмерные пылевые системы из частиц одного размера сферической формы. Наблюдения показали, что КШ имеют оболочечное строение с распределением частиц, отличным от свойственного системам с чисто кулоновским взаимодействием.

В рамках общей проблемы создания плазменных кристаллов с заданными свойствами значительный интерес представляет изучение поведения системы ПЧ разных размеров в условиях существования КШ. Различие ПЧ в размерах в условиях плазмы означает, вообще говоря, различие их зарядов и масс. Подобные системы в удерживающем поле вида $U_{ex}(r) \sim r^2$ чисто электростатической природы интенсивно изучаются в настоящее время методами компьютерного моделирования

в связи с рядом важных приложений [5,6]. Однако достаточной ясности в вопросе о природе структурных модификаций таких систем пока нет. А в случае экспериментов по созданию КШ [2–4] ситуация осложняется тем, что пылевую систему удерживают силы различной природы. Так, согласно [3], частицы КШ удерживаются в вертикальном направлении суммой гравитационной, термофоретической и электростатической сил, в то время как в горизонтальном — только электростатической. Поскольку гравитационная сила пропорциональна кубу размера пылевой частицы, термофоретическая — квадрату [1], а электростатическая, через заряд, ближе к линейной зависимости, то можно ожидать весьма нетривиального пространственного распределения пылинок разного сорта.

В соответствии с вышеизложенным целью настоящей работы является изучение строения систем заряженных частиц разного размера как в случае чисто электростатического гармонического удерживающего потенциала, так и в реалистичном случае, когда удержание в вертикальном направлении осуществляется комбинацией сил различной природы.

Прежде всего было проведено изучение гипотетической системы частиц сферической формы в чисто электростатическом удерживающем поле $U_{ex}(r) \sim r^2$ с парным изотропным потенциалом взаимодействия Юкавы:

$$\varphi(r) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r} \exp\left(-\frac{r}{\lambda_D}\right),$$

где Q — заряд частицы, λ_D — радиус экранирования. Вероятно, такая ситуация может быть реализована в условиях невесомости. Однако она представляет интерес и как промежуточный шаг для перехода к моделированию реального эксперимента по созданию КШ [2–4]. В проведенных компьютерных экспериментах рассматривалась система, состоящая из 190 сферических частиц, что обусловлено в основном удобством сопоставления с экспериментом и результатами расчетов [2,4]. Моделируемые частицы обладали массовой плотностью $\rho = 1514 \text{ kg/m}^3$ (плотность меламин-формальдегида, использованного в экспериментах [4]). Однако в отдельных случаях плотность изменялась с целью достижения требуемого силового воздействия на частицы.

Сначала используемый подход был протестирован на системе заряженных частиц одного сорта, находящихся в поле изотропного гармонического потенциала. Радиус частицы составлял $1.7 \mu\text{m}$, а заряд $4700e$ (e — заряд электрона). Полученные результаты расчетов

структурных свойств КШ из 190 заряженных сферических частиц хорошо согласуются как с расчетами, так и с экспериментом [4]. Помещенные во внешнее сдерживающее поле частицы образуют четыре сферических слоя. Расчеты показали, что с увеличением значения безразмерного параметра $\kappa = a/\lambda_D$ (a — среднее межчастичное расстояние, получаемое из парной корреляционной функции) наблюдается перемещение частиц из внешней оболочки внутрь шара. Распределение частиц по оболочкам для параметра экранирования $\kappa = 0.6$ в точности воспроизводит экспериментальную конфигурацию частиц. Полученные результаты указывают на значительное влияние степени экранирования на конфигурацию частиц в слоях КШ.

При моделировании бинарной системы частиц мы полагали, что частицы одного сорта имеют одинаковую массу, заряд и вся система способна достигать состояния, близкого к термодинамическому равновесию. В случае изотропного удерживающего потенциала чисто электростатической природы различие сортов частиц сводится к различию ПЧ по величине их электрического заряда и массы. Так же как и в тестовой задаче, общее количество частиц в моделируемой системе составляло 190. Концентрация частиц второго сорта менялась от 0 до 100% с шагом в 10%. Частицы первого сорта имели радиус $1.70 \mu\text{m}$, заряд $4700e$, а частицы второго сорта — радиус $0.57 \mu\text{m}$, а заряд $1576e$.

Расчеты показали, что бинарная смесь сферических заряженных частиц также образует оболочечную структуру. При этом основная доля частиц с меньшим зарядом формирует внешнюю оболочку, вытесняясь частицами большего заряда из внутренней области кулоновского шага. Наличие во внутренней области кулоновского шара частиц разного заряда приводит к тому, что структура внутренних оболочек становится менее регулярной и их ширина увеличивается. Расстояние между внешними оболочками частиц разного заряда уменьшается по мере уменьшения отличий в величине их заряда. Размеры КШ при увеличении заряда частиц увеличиваются. Такое поведение обусловлено преобладанием роста силы экранированного кулоновского взаимодействия над ростом сил сдерживающего поля при увеличении заряда.

Моделирование поведения системы заряженных частиц в условиях существования КШ в лабораторных условиях проводилось также для системы из 190 сферических частиц двух размеров (по 95 частиц каждого сорта). По сравнению со случаем изотропного удерживающего поля такая задача осложнялась действием в вертикальном направлении

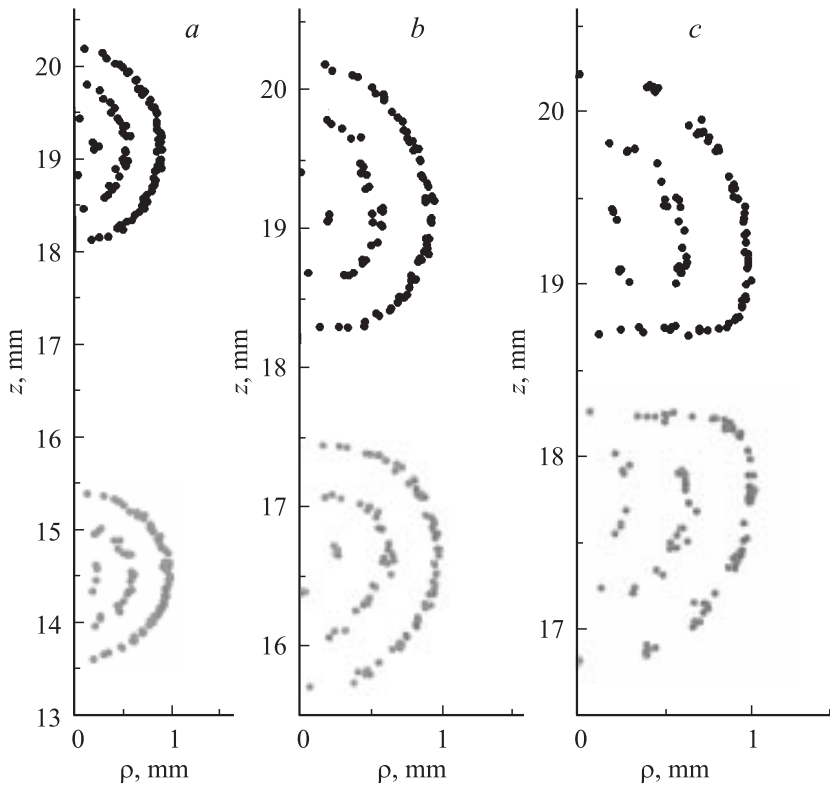


Рис. 1. Пространственное распределение частиц КШ в проекции на плоскость $(\rho-z)$ цилиндрических координат. Радиус частиц черного цвета — $2.400\ \mu\text{m}$, радиус частиц серого цвета: *a* — $2.600\ \mu\text{m}$; *b* — $2.500\ \mu\text{m}$; *c* — $2.450\ \mu\text{m}$.

сил разной природы: электростатической, термофоретической и гравитационной. Значения удерживающих ПЧ сил в зависимости от координат брались согласно [3]. Расчеты показали, что в случае, когда размеры частиц отличаются достаточно сильно, результирующая сила приводит к тому, что на разных высотах образуются два слабо взаимодействующих между собой КШ (рис. 1, *a*). По мере уменьшения разницы в размерах частиц происходит сближение КШ, они начинают сильнее взаимодействовать (рис. 1, *b*), затем деформировать свои оболочки (рис. 1, *c*). При

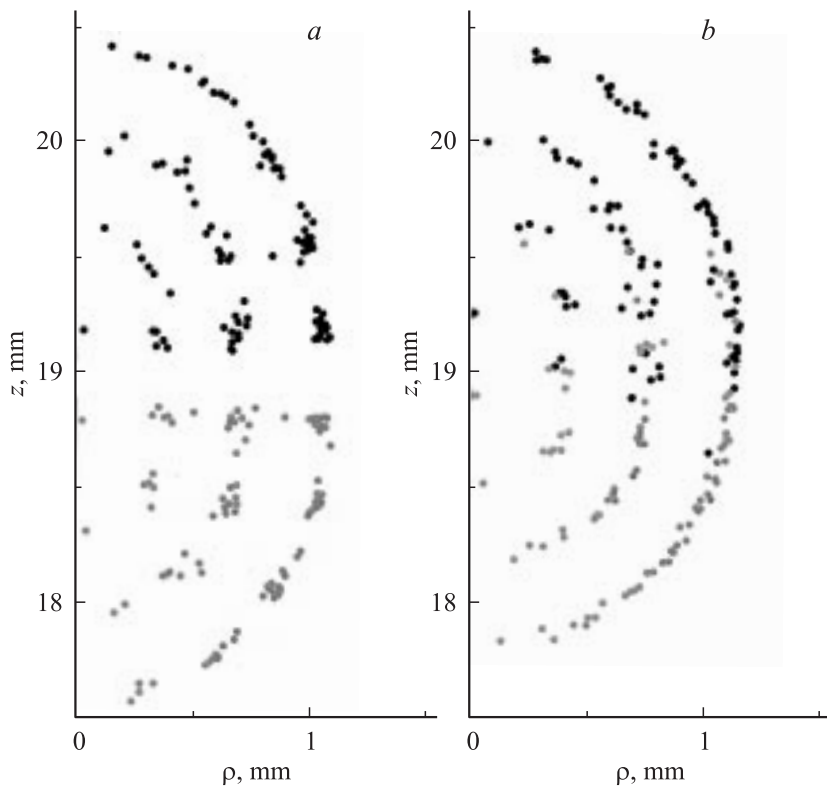


Рис. 2. Пространственное распределение частиц КШ в проекции на плоскость $(\rho-z)$ цилиндрических координат. Радиус частиц черного цвета — $2.400\ \mu\text{m}$; радиус частиц серого цвета: a — $2.410\ \mu\text{m}$; b — $2.402\ \mu\text{m}$.

значительном перекрытии КШ их оболочки взаимно подстраиваются (рис. 2, a), при этом частицы с меньшим зарядом начинают вытесняться во внешнюю оболочку (рис. 2, b).

Наличие зазора между частицами разного сорта, отчетливо видного на высоте примерно $19.0\ \text{mm}$ на рис. 2, b , связано в основном с различием в массах частиц, приводящим к тому, что более тяжелые частицы опускаются несколько ниже по высоте. Чтобы исключить возможность расслоения частиц по высоте, связанную в основном

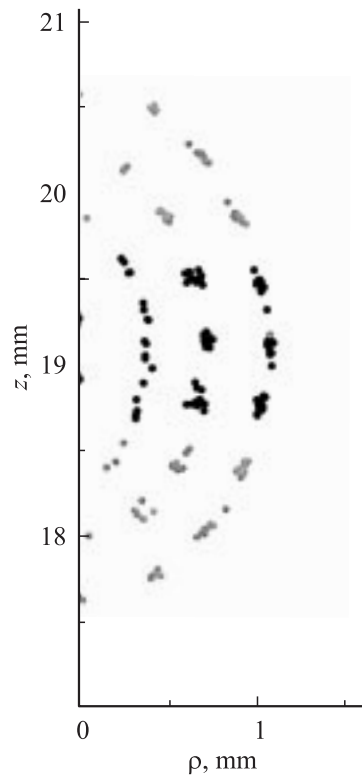


Рис. 3. Пространственное распределение частиц КШ, у которых равнодействующая обращается в ноль на одной высоте, в проекции на плоскость $(\rho-z)$ цилиндрических координат. Черным цветом обозначены частицы первого сорта, серым — второго сорта.

с воздействием гравитационной силы, плотность вещества частиц второго сорта выбирали таким образом, чтобы результирующая сила, действующая на частицы обоих сортов, поднимала их на одинаковую высоту (в нашем случае 19 mm). Такой прием позволяет варьировать размер, а значит и заряд частиц второго сорта, независимо от массы. Частицы первого сорта имели радиус $2.4 \mu\text{m}$ и заряд $2013e$, тогда как частицы второго сорта характеризовались радиусом $2.1 \mu\text{m}$, зарядом $1834e$ и большей плотностью гипотетического вещества, благодаря

чему равнодействующая для обоих сортов частиц обращалась в ноль на одной и той же высоте.

Результаты расчетов показывают, что для такой смеси частиц в центральном слое КШ (перпендикулярном высоте) расположатся частицы, для которых возвращающая результирующая сила в вертикальном направлении будет большей. В настоящем случае таковыми являются частицы первого сорта (рис. 3).

Таким образом, полученные в работе результаты показали возможность формирования различных конфигураций плазменного двухкомпонентного кристалла. Так, система сферических заряженных частиц двух сортов, находящихся в плазме и различающихся между собой размером (т.е. величиной заряда и массой), имеет тенденцию к образованию оболочечной структуры (как и в однокомпонентном случае). Характерно, что каждая из оболочек содержит частицы одного сорта. При этом частицы, обладающие меньшим зарядом, образуют внешние сферы по отношению к частицам с большим зарядом. Расстояние между ближайшими слоями, образованными частицами разных сортов, увеличивается с увеличением разницы в размерах частиц.

В случае бинарной системы, состоящей из частиц двух сортов, значительно отличающихся размерами, с учетом гравитационной, термофоретической и электростатической сил, происходит формирование двух КШ, каждый из которых образован только одним сортом частиц. При уменьшении различий в размерах частиц КШ начинают сближаться друг с другом, оболочечные структуры деформируются и при дальнейшем уменьшении различий в размерах частиц происходит перестраивание оболочек с образованием единого КШ.

Работа выполнена при поддержке проекта № 9.5 Программы президентии РАН.

Список литературы

- [1] Фортвов В.Е., Храпак А.Г., Храпак С.А. и др. // УФН. 2004. Т. 174. С. 495–544.
- [2] Arp O., Block D., Piel A., Melzer A. // Phys. Rev. Lett. 2004. V. 95. P. 165 004.
- [3] Arp O., Block D., Kindworth M., Piel A. // Phys. Plasmas. 2005. V. 12. P. 122 102.
- [4] Bonitz M., Block D., Arp O. et al. // Phys. Rev. Lett. 2006. V. 96. P. 075 001.
- [5] Mathey T., Hansen J.P., Drewsen M. // Phys. Rev. Lett. 2003. V. 9. P. 165 001.
- [6] Ferreira W.P., Munarin F.F., Nelissen K. et al. // Phys. Rev. E. 2005. V. 72. P. 021 406.