

01;04

Влияние анизотропии удерживающего поля на структуру плазменно-пылевого кластера

© А.В. Абдрашитов, К.П. Зольников, С.Г. Псахье

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск
E-mail: Simoom@sibmail.com

Поступило в Редакцию 29 апреля 2010 г.

Проведено молекулярно-динамическое изучение структуры плазменно-пылевых кластеров в основном состоянии для различных конфигураций удерживающего поля. Взаимодействие между пылевыми частицами сферической формы, из которых состояли моделируемые кластеры, описывалось парным потенциалом Юкавы. В зависимости от степени анизотропии удерживающего поля (отличие по величине удерживающих сил в вертикальном и горизонтальном направлениях) были определены условия, при которых трехмерная структура в основном состоянии (случай изотропного удерживающего поля) переходит в двухмерную. Исследованы форма, геометрические размеры и структура плазменно-пылевых кластеров в зависимости от числа пылевых частиц и степени анизотропии удерживающего поля.

Поведение микро- и наноразмерных частиц в комплексной плазме активно исследуется во многих работах, например [1–4]. Это связано с широкой распространенностью плазменно-пылевых систем как в космосе, так и в земных условиях, и во многом объясняется их уникальными свойствами, изучение которых представляет значительный научный и практический интерес. В случае конечного числа заряженных пылевых частиц (как правило, не более нескольких тысяч), удерживаемых от разлета электростатическим полем, рассматриваемая система называется пылевым кластером, изучение которой, как правило, проводится в большинстве экспериментальных и расчетных работ [3–7]. Микроразмерные пылевые частицы в комплексной плазме могут приобретать достаточно большой отрицательный заряд (несколько тысяч зарядов электрона), что ведет к тому, что их поведение во многом определяется кулоновским межчастичным взаимодействием. Кроме того, на их поведение могут существенно влиять гравитационная, электроста-

тическая, магнитная, термофоретическая и другие внешние силы. Для того чтобы удержать пылевые частицы в исследовательской установке, необходимо сформировать потенциальную ловушку, представляющую определенную конфигурацию внешних полей, препятствующую их разлету. При этом в вертикальном и горизонтальном направлении на пылевые частицы могут действовать различные как по своей физической природе, так и по величине внешние силы. Это приводит к тому, что структура полей потенциальной ловушки, удерживающей частицы от разлета, является анизотропной. Следует отметить, что анизотропия удерживающего поля ловушки может оказывать существенное влияние не только на форму, но и на структуру плазменно-пылевой системы, а значит и на ее отклик при внешних электрических, магнитных, лазерных и других воздействиях. В связи с этим представляет интерес исследовать возможности целенаправленного формирования различных структурно-фазовых состояний плазменно-пылевого кластера, варьируя анизотропные свойства удерживающего поля ловушки.

Решение поставленной задачи проводилось в рамках метода частиц применительно к пылевым частицам сферической формы, обладающим плотностью меламин-формальдегида. Подобные частицы широко используются во многих экспериментальных работах для изучения свойств и поведения плазменно-пылевых кластеров. Для сопоставления результатов моделирования с имеющимися экспериментальными данными [5] в данной работе диаметр пылевой частицы составлял $7 \cdot 10 \mu\text{m}$, а заряд — 2660 е. Так же как и в предыдущих работах [6,7], было принято, что межчастичное взаимодействие определяется дебаевским потенциалом:

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

где λ_D — радиус экранирования Дебая, Q — величина заряда пылевой частицы. Удерживающее поле имело вид:

$$F = \alpha_z Qz + \alpha_\rho Q\rho,$$

где $\rho = (x^2 + y^2)^{1/2}$, α_z и α_ρ — коэффициенты, определяющие силу удерживающего поля в вертикальном и горизонтальном направлениях соответственно. Для численного определения степени анизотропии удерживающего поля вводился безразмерный параметр $\xi = \alpha_z/\alpha_\rho$. Количество пылевых частиц в моделируемых плазменно-пылевых кластерах варьировалось от 14 до 2880.

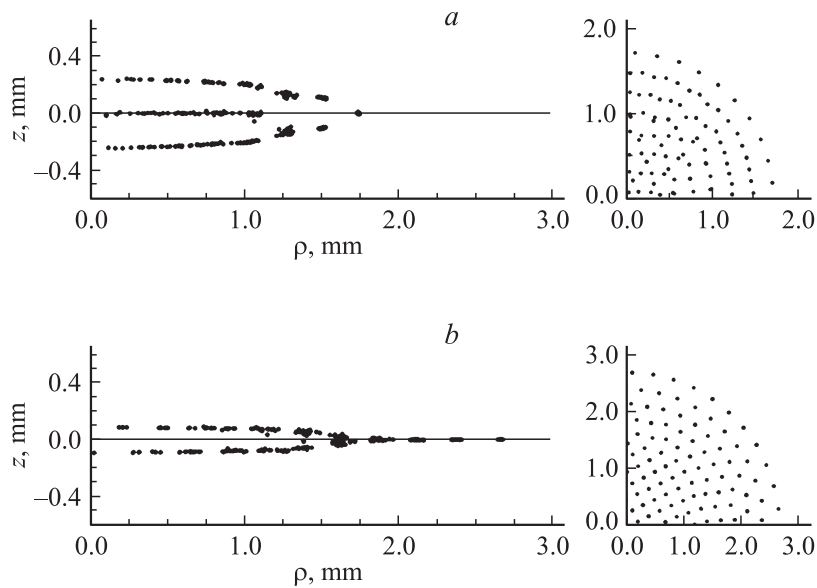


Рис. 1. Структура плазменно-пылевого кластера из 360 пылевых частиц при различных значениях параметра анизотропии: $\xi = 8$ (*a*), $\xi = 32$ (*b*) (слева в проекции на плоскость ρ - z цилиндрической системы координат, справа в проекции на плоскость x - y).

Используемый подход позволяет с высокой степенью точности воспроизводить структуру как трехмерных пылевых кластеров [6–8], так и двумерных структур [9]. В частности, он воспроизводит заселенность оболочек кулоновских шаров, конфигурацию и межчастичное расстояние двумерных структур.

Результаты расчетов показали, что плазменно-пылевой кластер в рассмотренных условиях имеет оболочечную структуру. Проекция структуры плазменно-пылевого кластера из 360 пылевых частиц на оси цилиндрических координат для различных значений безразмерного параметра ξ представлена на рис. 1. Отметим, что в изотропном удерживающем поле моделируемая система представляет собой кулоновский шар с характерной оболочечной структурой. При увеличении значения параметра анизотропии ξ форма и структура моделируемой системы

изменяются. При этом размеры кластера увеличиваются в горизонтальном направлении и уменьшаются в вертикальном (рис. 1 *a, b*). При достижении некоторого порогового значения параметра анизотропии структура моделируемого кластера становится плоской. Пороговое значение безразмерного параметра, при котором структура становится двумерной, зависит также от числа пылевых частиц в системе. Исследования показали, что увеличение числа пылевых частиц ведет к увеличению порогового значения ξ , при котором моделируемая система переходит в двумерное состояние. Следует отметить, что при уменьшении безразмерного параметра ξ до величин, значительно меньших единицы, моделируемые пылевые частицы имеют тенденцию выстраиваться в вертикальную цепочку.

Расчеты показали, что как в изотропном, так и в анизотропном удерживающем поле число пылевых частиц в моделируемой системе оказывает существенное влияние на структуру плазменно-пылевого кластера. При достаточно малом числе пылевых частиц моделируемый кластер в анизотропном удерживающем поле формирует плоскую структуру. При увеличении числа пылевых частиц структура моделируемого кластера усложняется, становится трехмерной, формируя внутренние оболочки. Пороговое значение числа пылевых частиц необходимого для перехода кластера из плоской структуры в трехмерную зависит от значения безразмерного параметра ξ . Результаты моделирования структур плазменно-пылевых кластеров с различным числом пылевых частиц, находящихся в удерживающем поле, характеризующиеся значением безразмерного параметра $\xi = 32$, приведены на рис. 2. Из рисунка видно, что с увеличением числа пылевых частиц в плазменно-пылевом кластере начинают формироваться дополнительные оболочки. Такое поведение моделируемой системы может быть связано с тем фактом, что с увеличением числа пылевых частиц их плотность в центре кластера возрастает [7], следовательно, усиливается межчастичное кулоновское взаимодействие, которое может служить основной причиной „расщепления“ — переход из двухмерного в трехмерное структурное состояние моделируемого плазменно-пылевого кластера.

Увеличение числа пылевых частиц приводит не только к увеличению размера плазменно-пылевого кластера, но и к его „расщеплению“ в вертикальном направлении. Необходимо отметить, что этот эффект зависит как от числа пылевых частиц, так и от степени анизотропии удерживающего поля (рис. 3, *a*). „Ступенька“ на кривой, соответствующей

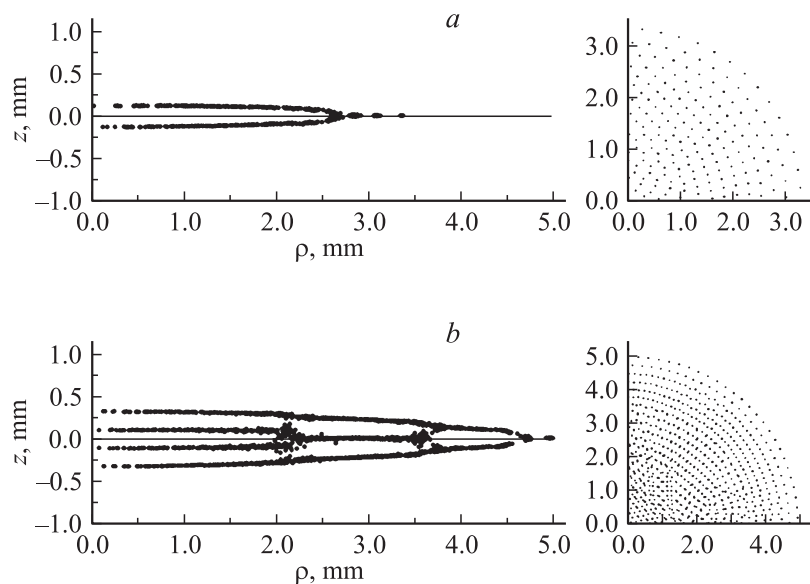


Рис. 2. Структура плазменно-пылевого кластера в анизотропном удерживающем поле ($\xi = 32$) для различного числа пылевых частиц: 720 (*a*), 2880 (*b*) (слева в проекции на плоскость ρ - z цилиндрической системы координат, справа в проекции на плоскость x - y).

$\xi = 22$, связана с изменением структуры, а именно, с возникновением новой оболочки в плазменно-пылевом кластере. Расчеты показали, что „расщепление“ плоского плазменно-пылевого кластера при уменьшении параметра анизотропии или увеличении числа пылевых частиц начинается в его центральной зоне. Затем с увеличением числа пылевых частиц границы расщепленной области увеличиваются, удаляясь от центра плазменно-пылевого кластера (рис. 3, *b*).

Таким образом, полученные результаты показывают, что на форму и структуру плазменно-пылевого кластера можно менять направленным образом, варьируя число пылевых частиц и управляя конфигурацией потенциального поля удерживающей ловушки. Так, в изотропном удерживающем поле моделируемая система представляет собой шар, имеющий оболочечную структуру в „кристаллическом“ состоянии.

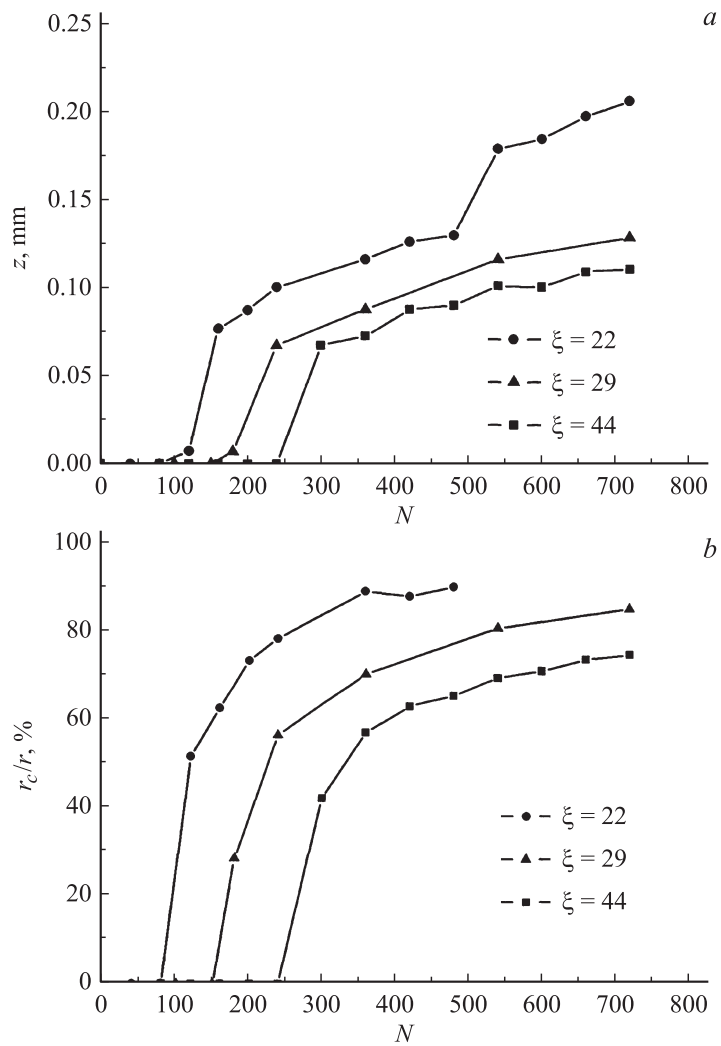


Рис. 3. Размеры плазменно-пылевого кластера в вертикальном направлении в зависимости от числа пылевых частиц (N) для различных значений параметра анизотропии удерживающего поля (а). Положение точки „расщепления“ структуры кластера в зависимости от числа пылевых частиц (N) (r_c — расстояние от оси z до точки расщепления, r — расстояние от оси z до края кластера) (б).

Увеличение числа частиц сопровождается ростом размеров плазменно-пылевой системы и скачкообразным формированием дополнительных оболочек. При увеличении параметра анизотропии и уменьшении числа пылевых частиц моделируемая трехмерная система пылевых частиц имеет тенденцию перехода в плоский кластер. В свою очередь, плоский кластер можно перевести в трехмерный, уменьшая степень анизотропии системы и/или увеличивая число частиц в ней. В последнем случае формирование трехмерной структуры начинается в центральной области, которая характеризуется более высокой плотностью пылевых частиц. Следует отметить, что указанные выше „прямой“ и „обратный“ переходы могут идти по разным траекториям в фазовом пространстве, что обусловлено большим количеством метастабильных состояний исследуемой системы.

Список литературы

- [1] *Фортвов В.Е., Храпак А.Г., Храпак С.А.* и др. // УФН. 2004. Т. 174. С. 495–544.
- [2] *Psakhie S.G., Zolnikov K.P., Skorentsev L.F., Kryzhevich D.S., Abdrashitov A.V.* // Physics of plasmas. 2008 V. 15. P. 053701.
- [3] *Baumgartner H., Block D., Bonitz M.* // Contrib. Plasma Phys. 2009. V. 49. P. 281–302.
- [4] *Arp O., Block S., Piel A., Melzer A.* // Phys. Rev. Lett. 2004. V. 95. P. 165004.
- [5] *Vasilyak L.M., Vetchinin S.P., Polyakov D.N.* et al. // Physics of Extreme states of Matter-2009. Institute of Problems of Chemical Physics RAS. Edited by Fortov V.E. et al. Chernogolovka, 2009. ISBN 978-5-901675-89-2. P. 220–223.
- [6] *Псахье С.Г., Зольников К.П., Скоренцев Л.Ф., Крыжевнич Д.С., Абдрашитов А.В.* // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. № 8. С. 6–12.
- [7] *Псахье С.Г., Зольников К.П., Абдрашитов А.В.* // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. № 3. С. 46–52.
- [8] *Henning C., Baumgartner H., Piel A.* et al. // Phys. Rev. E. 2006. V. 76. P. 056403.
- [9] *Liu Y.H., Chen Z.Y., Yu M.Y., Bogaerts A.* // Phys. Rev. E. 2006. V. 74. P. 056401.