

Плазменно-пылевые кристаллы в удерживающих полях различной конфигурации

А.В. АБДРАШИТОВ
e-mail: Simoom@sibmail.com

К.П. ЗОЛЬНИКОВ
С.Г. ПСАХЬЕ

*Учреждение Российской академии наук
Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН*

Проведено молекулярно-динамическое моделирование зависимости структуры плазменно-пылевых кристаллов в зависимости от анизотропии удерживающего поля. Взаимодействие между пылевыми частицами описывалось потенциалом Дебая-Хюкеля. Результаты расчетов показали, что анизотропия удерживающего поля существенно влияет на форму и структуру плазменно-пылевого кристалла. В случае сферически симметричного удерживающего поля однокомпонентный пылевой кристалл имеет форму Кулоновского шара с оболочечной структурой в основном состоянии. В анизотропном поле моделируемый кристалл имеет тенденцию к трансформации объемной формы в плоскую при уменьшении горизонтальной составляющей силы удерживающего поля по сравнению с вертикальной. В тоже время увеличение числа пылевых частиц в плазменном кристалле усиливает тенденцию к его трансформации из плоской формы в объемную с формированием оболочечной структуры в основном состоянии. Структура бикомпонентного плазменного кристалла в анизотропном удерживающем поле имеет ряд особенностей. В частности, пылевые частицы различного сорта сегрегируются в кристалле по высоте вследствие различий в их размерах и заряде. Области, занятые пылевыми частицами разных сортов, разделены “запрещенной зоной”. Структура плазменного бикристалла с равной долей пылевых частиц симметрична относительно центра “запрещенной зоной”.

Пылевая плазма, представляющая ионизованный газ с частичками конденсированного вещества (пылевые частицы, как правило, микронного размера), широко распространена в космосе и может быть получена в лабораторных условиях. Широкая распространенность пылевой плазмы и уникальность ее свойств делают ее привлекательным объектом изучения [1, 2, 3].

В реальном эксперименте пылевые частицы, которые имеют достаточно большой отрицательный заряд, удерживаются от разлета внешним полем, представляющим комбинацию сил, различающихся по физической природе и по степени их воздействия. Вследствие этого ловушка, удерживающая систему пылевых частиц, имеет анизотропную конфигурацию. Структуры, формируемые пылевой подсистемой в предельных случаях, когда степень анизотропии мала (система сферически симметрична) или велика (плоская система) хорошо изучены [4]. Структуры, формируемые пылевой плазмой в промежуточных случаях, исследованы слабо. В связи с вышесказанным, целью данной работы являлось изучение структуры одно и двухкомпонентных систем в зависимости от степени анизотропии удерживающего поля.

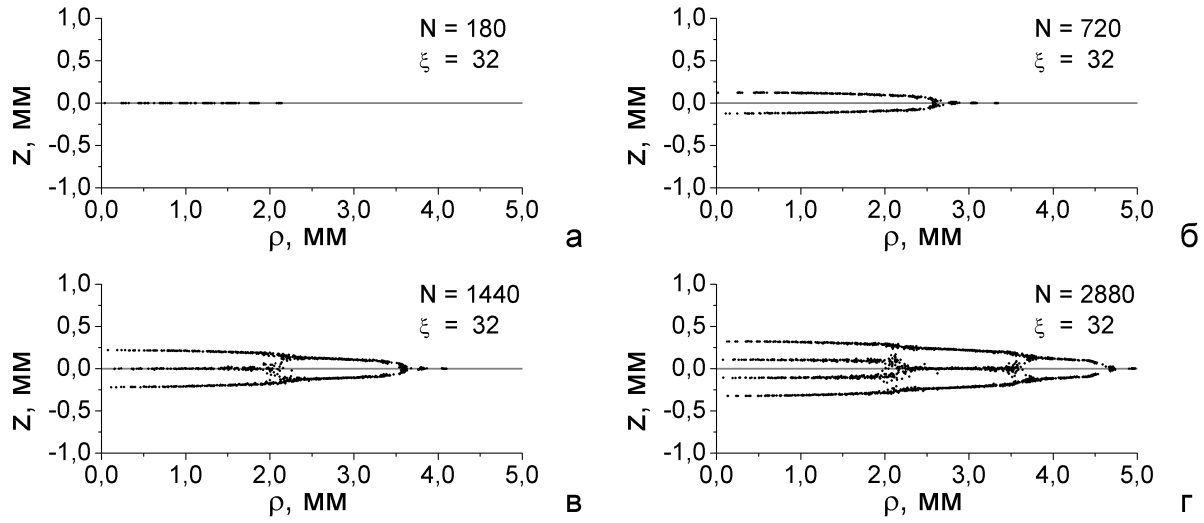


Рис. 1. Структура плазменно-пылевого кластера в анизотропном поле ($\xi = 32$) для: $N = 180$ (а), $N = 720$ (б), $N = 1440$ (в), $N = 2880$ (г)

Исследование проводилось применительно к системе пылевых частиц сферической формы, обладающих плотностью меламин-формальдегида (1519 кг/м^3). Диаметр пылевых частиц составлял 7.10 мкм , а заряд их равнялся $2660e$. Число пылевых частиц в моделируемой системе варьировалось от 360 до 3000.

Для исследования влияния анизотропии удерживающего поля на структуру плазменно-пылевой системы была предложена модель ловушки, удерживающей пылевые частицы от разлета. Внешняя сила, действующая на пылевые частицы, записывалась в виде:

$$F_z = -(\alpha_z * z + \alpha_\rho * \rho),$$

где $\rho = (x^2 + y^2)^{1/2}$, α_z и α_ρ – коэффициенты, определяющие силу удерживающего поля в вертикальном и горизонтальном направлениях, соответственно.

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, в частности, на число оболочек, формируемых в кристаллическом состоянии. При достаточно малом числе пылевых частиц моделируемый плазменно-пылевой кластер в анизотропном удерживающем поле формирует двумерную структуру. При увеличении числа пылевых частиц структура моделируемого кластера усложняется, в центре кластера формируются трехмерные оболочки Рис. 1.

В изотропном удерживающем поле моделируемая система представляет собой кулоновский шар с характерной оболочечной структурой в кристаллическом состоянии. При увеличении значения параметра анизотропии ξ форма и структура моделируемой системы изменяются. Размеры кластера увеличиваются в горизонтальном направлении и уменьшаются в вертикальном (рис. 2 а, в, д, ж). При достижении некоторого порогового значения параметра анизотропии структура моделируемого кластера становится двумерной. Пороговое значение безразмерного параметра, при котором структура становится двумерной, зависит также от числа пылевых частиц в системе.

Следует отметить, что во многих экспериментальных работах пылевые частицы удерживаются в ловушке комбинацией электростатического поля и силы тяжести. Такая конфигурация удерживающих полей приводит к тому, что высота подъема пылевых частиц зависит от их заряда и радиуса. В случае, когда исследуемая система содержит

разные по размеру пылевые частицы, такая конфигурация удерживающих полей может приводить к разным типам кристаллической структуры основного состояния [5]. В горизонтальной плоскости удерживаются полем электрической природы:

$$F_r = -\alpha_r Q\rho.$$

В то время в вертикальном направлении на частицы действует комбинация электрической и гравитационной сил:

$$F_z = \alpha z Q(z_0 - z) - mg,$$

где z_0 – параметр, определяющий высоту подъема пылевых частиц над электродом.

При изучении структуры двухкомпонентных плазменно-пылевых кластеров в условиях анизотропного поля следует учесть влияние двух параметров: различие размеров пылевых частиц обоих сортов и степень анизотропии удерживающего поля. Исследование влияния анизотропии удерживающего поля на структуру основного состояния двухкомпонентной плазмы проводился применительно к плазменно-пылевому кластеру, состоящему из 360 пылевых частиц двух сортов. Из них 180 частиц имели радиус 2.3 мкм с зарядом 1955е, а размер и заряд остальных 180 частиц варьировались и принимали значения, указанные в таблице:

Таблица. Величина заряда пылевой частицы (Q) в зависимости от ее радиуса (r)

r , мкм	Q , e_0
2.32	1966
2.35	1984
2.40	2013
2.50	2072

Исследования показали, что, как и для однокомпонентного случая, структура бикомпонентной плазменно-пылевой системы существенным образом зависит от степени анизотропии удерживающего поля, однако бикомпонентные структуры имеют ряд особенностей, которые достаточно хорошо видны на Рис. 2:

Частицы разных сортов расслаиваются и сегрегируют по высоте вследствие различия в заряде и массе.

Распределение частиц вдоль направления действия силы притяжения во многом определяется величиной результирующей силы, действующей на частицы разного размера (заряда) в данном направлении. При этом, если размеры частиц отличаются достаточно сильно, то результирующая сила приводит к тому, что на разных высотах образуются два слабо взаимодействующих кулоновских шара. По мере уменьшения разницы в размерах частиц происходит сближение кулоновских шаров, они начинают взаимодействовать, затем деформировать свои оболочки. При значительном перекрытии кулоновских шаров их оболочки взаимно подстраиваются [5].

Между объемами, занятыми частицами разных сортов, происходит формирование «запрещенной зоны» свободной от частиц обоих сортов.

Структура бикомпонентных кластеров симметрична относительно центральной плоскости «запрещенной зоны». Следует отметить, что границы запрещенной зоны формируются горизонтальными плоскостями, причем плоскости расположены на высоте, равновесной для задаваемых сортов пылевых частиц.

Как и для однокомпонентной системы, увеличение степени анизотропии удерживающего поля приводит к тому, что сферичность кластера в кристаллическом состоянии нарушается и уменьшается число оболочек. Структуры, формируемые каждым

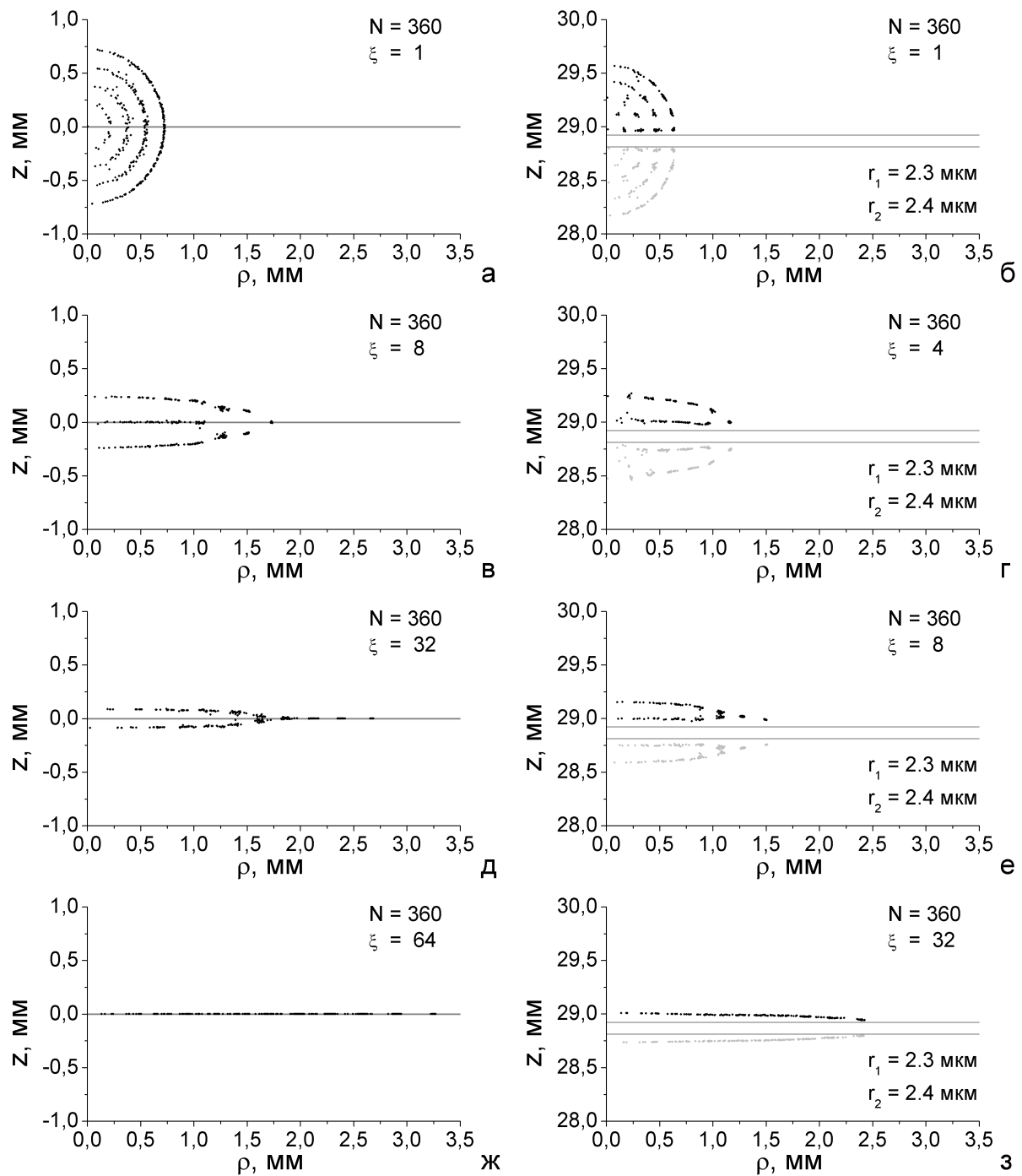


Рис. 2. Структура одно- и двухкомпонентных плазменно-пылевых систем в анизотропном поле. Диаметр однокомпонентных пылевых частиц 7.1 мкм. Концентрация пылевых частиц каждого из сортов для двухкомпонентных систем составляет 50%. На рисунке указано общее число частиц в системе.

из сортов пылевых частиц, проходят через те же структурные состояния, что и однокомпонентный плазменно-пылевой кластер. Более того, указанные структуры совпадают (иногда с небольшими отклонениями) со структурой соответствующей половине однокомпонентного кластера (Рис. 2).

На основании результатов моделирования можно заключить, что в сферически симметричном удерживающем поле система заряженных пылевых частиц двух сортов, различающихся между собой величиной заряда, имеет тенденцию к образованию оболочечной структуры (как и в однокомпонентном случае). При этом частицы, обладающие меньшим зарядом, образуют внешние оболочки по отношению к частицам с большим зарядом. Следует отметить, что структура плазменно-пылевой системы существенно зависит от степени анизотропии удерживающего поля и числа пылевых частиц. Существует некоторое пороговое значение параметра анизотропии удерживающего поля, при достижении которого плоский кластер скачкообразно перестраивается в кластер объемной формы. В тоже время при заданном значении параметра анизотропии удерживающего поля плоский плазменно-пылевой кластер можно перестроить в объемный, увеличивая число пылевых частиц.

Работа выполнена при финансовой поддержке по проекту №2.3 Программы фундаментальных исследований Президиума РАН.

Список литературы

- [1] Фортов В.Е., Храпак А.Г., Храпак С.А., Молотков В.И., Петров О.Ф. Пылевая плазма // Успехи физических наук. – 2004. – Т. 174. – № 5. – С. 495–544
- [2] Goertz С.К. Dusty plasmas in the solar system // Reviews of geophysics. – 1989 – V. 27. – №. 2. – P. 271–292.
- [3] Introduction to Complex Plasmas / под. ред. M. Bonitz, N. Horing, P. Ludwig. – Springer, 2010
- [4] Henning С., Baumgartner Н., Piel А., Ludwig P., Golubnichiy V., Bonitz M., Block D. Ground state of a confined Yukawa plasma // Physical Review E. – 2006. – V. 74 – P.056403 (6 pages).
- [5] Psakhie S.G., Zolnikov K.P., Skorentsev L.F., Kryzhevich D.S., Abdrashitov A.V. Structural features of bicomponent dust Coulomb balls formed by the superposition of fields of different origin in plasma // Physics of plasmas. – 2008. – V.15. – P. 053701 (5 pages).