

# **Взаимодействие макрочастиц в комплексной плазме и самоорганизация плазменных кристаллов и кластеров**

В.Н.Цытович, Н.Г.Гусейн-заде

*Теоретический отдел ИОФ РАН*

В настоящее время сформировалась отдельная область физики, посвященная изучению свойств комплексной плазмы и структур в ней. Кроме того, активно изучаются различные типы плазменных кристаллов и кластеров. Интерес к подобным системам обусловлен как фундаментальными, так и прикладными аспектами. В представляемой серии работ основное внимание уделено системному теоретическому исследованию структур в комплексной плазме [a1-a5].

Важная часть исследований посвящена выяснению характера взаимодействия пылевых макрочастиц между собой, а также на изучение сил, действующих на макрочастицу со стороны окружающей плазмы. В работах впервые решена задача о нелинейном экранировании пылевых частиц с подробным численным анализом. Кроме того, предложен новый механизм коллективного взаимодействия пылевых частиц и коллективного притяжения [b1-b14]. На основе теоретической модели, использующей численные расчеты по нелинейному экранированию и коллективному притяжению, было предложено объяснение основных параметров наблюдавшихся пылевых плазменных кристаллов (константы связи, межчастичные расстояния и температуры плавления).

Оба эффекта (коллективное притяжение и нелинейное экранирование) были использованы и при построениях теоретических и численных моделей пылевых и самоорганизованных структур.

Проведено как исследование структур с упорядоченным распределением пылевых частиц (пылевых плазменных кристаллов, кластеров и винтовых структур), так и структур с неупорядоченным движением пылевых частиц (плоских, сферических и цилиндрических структур).

Впервые численно проанализированы условия выполнения равновесия и существования самоорганизующихся пылевых структур с нерегулярным распределением пылевых частиц (пылевые слои, сферические и цилиндрические структуры).

Получено хорошее согласие теоретических моделей для плазменно-пылевых структур с данными наземных лабораторных экспериментов, а также экспериментов на Международной Космической Станции. [c1-c4]

Впервые создана теория колебаний и устойчивости симметричных плоских двумерных плазменно-пылевых кластеров для случая произвольного потенциала взаимодействия между частицами (кластеры в виде правильных многоугольников и кластеры в форме правильного многоугольника с

частицей в центре). Кроме прочего, в рассматриваемых работах получены частоты и поляризации колебаний, что дает возможность экспериментально оценить потенциал взаимодействия между макрочастицами. [d1,d3] Для малых двумерных кластеров рассмотрены конфигурационные изменения, возникающие в системе плоских кластеров при отсутствии внешнего потенциала удержания и при наличии малого притяжения между макрочастицами [d2].

Для случая произвольного потенциала взаимодействия между частицами исследовалась устойчивость правильных двумерных решеток. Основное внимание было уделено поперечным колебаниям со смещениями, перпендикулярными плоскости решетки. Исследовались как простые, так и сложные решетки с произвольным потенциалом взаимодействия между макрочастицами. В работах построена теория колебаний двумерных плазменных кристаллов. Авторами получен критерий «разрушения» кристалла при увеличении концентрации частиц.[d4,d5]

Впервые построена теория структур с винтовой симметрией. Был проведен большой комплекс численных исследований геликоидальных (винтовых) структур в пылевой плазме. Суть исследования состоит в изучении проблемы влияния различных типов взаимодействия между макрочастицами на типы равновесных конфигураций и бифуркаций системы. Получен абсолютно новый результат, суть которого заключается в том, что в пылевой плазме возможны цилиндрические пылевые облака, состоящие из небольших по размеру пылинок, которые могут самоудерживаться. Также впервые исследованы бифуркации пылевых винтовых структур с учетом лессажевского и коллективного притяжения и нелинейного экранирования.

В работах исследовались условия формирования, устойчивость и малые колебания геликоидальных кристаллов, которые формируются из одноименно заряженных частиц в аксиально-симметричном удерживающем потенциале. Впервые построена теория линейных колебаний геликоидальных (винтовых) структур. Исследовались малые колебания и устойчивость  $N$ -заходной винтовой структуры [b14, e1-e7].

В серии работ [f1-f4] исследовалось явление структурной неустойчивости газового состояния пыли. В условиях микрогравитации, когда плазма создается каким-то внешним ионизатором, пыль равномерно распределена по сферической камере. При достаточно большой плотности пыли плотность плазмы определяется балансом между ионизацией и объемной рекомбинацией на пылинках. В этих условиях если случайно появляется область с пониженной концентрацией пыли, то в ней плотность плазмы увеличивается, и могут появиться потоки ионов, выталкивающие пыль. Это приводит к образованию "void", своеобразного плазменного пузыря с резкой границей между областью, занятой пылью, и чистой плазмой.

**Список серии работ,  
представляемых на конкурс 2008 г. ИОФ РАН им. А.М. Прохорова  
В.Н.Цытович, Н.Г.Гусейн-заде  
теор.отдел. ИОФ РАН им.А.М.Прохорова  
(38+1)**

***а) Обзоры и сравнение развитой теории пылевой плазмы с экспериментальными данными. (4+1)***

Книга V.N.Tsytovich, G.E Morfill, S.V. Vladimirov, Y.Thomas; «Elementary Physics of Complex Plasmas» // Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (2008) 370 pages, 124 Figures. (2008)

1. В.Н. Цытович «Развитие представлений о взаимодействии плазменных потоков и электростатических полей в пылевой плазме»// УФН, **177**, стр.427-272 (2007)
2. Морфилл Г.Е., Цытович В.Н., Томас В.Х. "Комплексная плазма: II, Элементарные процессы в комплексной плазме" // Физика Плазмы, 2003, Т.29, N.1, стр.3-36 (2003)
3. Томас В.Х., Морфилл Г.Е., Цытович В.Н. "Комплексная плазма: III, Эксперименты по сильной связи и дальним корреляциям" // Физика Плазмы, 2003, Т.29, N.11, стр.963-1030 (2003)
4. Цытович В.Н., Морфилл Г.Е., Томас В.Х. "Комплексная плазма: IV, Теория комплексной плазмы. Приложения."// Физика Плазмы, 2004, Т.30, N.10, стр.877-929 (2004)

***б) Новые виды взаимодействия в комплексной плазме (14)***

1. В.Н.Цытович «Физика коллективного притяжения отрицательно заряженных пылевых частиц», Письма в ЖЭТФ, Т.78, стр.1283-1288 (2003)
2. V.N. Tsytovich and G E Morfill Non-linear collective phenomena in dusty plasmas Plasma Phys. Control. Fusion, **46**, No.12B, B527-B539 (December 2004)
3. V.N.Tsytovich «Collective Dust-Dust attraction in a strong magnetic Field», Contr.Pl.Phys., **44**, p.317-326 (2004)
4. V. Tsytovich «Collective Grain Interaction I. New Paradigm for Plasma Crystal Formation», Contrib. Plasma Phys. **45**, No. 8, 533 – 543 (2005)
5. V.N.Tsytovich and R.Kompaneets «Collective Grain Interactions II. Non-linear Collective Drag Force», Contrib. Plasma Phys. 45, No. 8, 544 – 552 (2005)
6. V.Tsytovich, U.de Angelis, A. Ivlev, G.Morfill, and S.Khrapak «Nonlinear drag force in Dusty Plasmas», Phys. of Plasmas, **12**, 112311, (2005)
7. C.Castaldo U.de Angelis V.Tsytovich; «Screening and attraction of dust particles in plasmas»; // Phys.Rev. Lett, **98**, 095003 (2005)
8. В.Н. Цытович «Новые физические принципы формирования пылевых кристаллов», Письма в ЖЭТФ, Т.81, стр.563-567 (2005)
9. V.N.Tsytovich, U. de Angelis, A.V. Ivlev, G.E. Morfill, and S.A. Khrapak «Role of effective potential barriers in the nonlinear screening regime: Grain charging and ion drag force» // Physics of plasmas, 12, 092106 (2005)
10. V.N. Tsytovich; «Note on possibility of laboratory measurements of grain attraction in plasmas from correct dispersion relation of dust acoustic waves»; Physics Scripts, **75**, 1, (2006)
11. V. Tsytovich , R.Kompaneetz, U.de Angelis, C Castaldo; «Collective grain interactions for constant ionization source»; Contr.Pl.Phys., **46**, 280 (2006)
12. В.Н.Цытович «Эффекты взаимодействия плазменных потоков и электростатических полей в пылевой плазме», ЖЭТФ, Т. 104, стр. 279-295 (2007).
13. R. Kompaneets, U. Konopka and A. V. Ivlev, V. Tsytovich, G. Morfill «Potential around a charged dust particle in a collisional sheath» // Physics of plasmas, 14, 052108 (2007)

14. V.N.Tsytovich, N.Gusein-Zade and G.Morfill «Dust-Dust Interaction and Formation of Dust Helical Structures» в специальном выпуске журнала IEEE, **52** (N2), p.637-652 (2004)

**c) Самоорганизованные пылевые структуры (4)**

1. V.Tsytovich, A.P.Nefedov, V.E.Fortov, O.F. Petrov, G.E.Morfill «Effect of ultraviolet radiation on dusty plasma structures at micro-gravity» // Physics of Plasmas; **10**, 003307 (2003)

2. В.Н.Цытович В.Н. «Самосогласованные квазинейтральные пылевые структуры», Физика Плазмы, Т. 31 , стр. 157-171 (2005)

3. V.N.Tsytovich «New Paradigm for Plasma Crystal Formation», Journal of Physics A Mathematical and General, **39**, 4501 (2006)

4. V. N. Tsytovich, S. V. Vladimirov, O. S. Vaulina, O. F. Petrov, and V. E. Fortov «Theory of dust self-organized convection in cylindrical discharges. I. The model and stationary nonlinear dust structures» // Physics of plasmas, 13, 032305 (2006)

**d) Плоские кластеры и кристаллы (5)**

1. Н.Г.Гусейн-заде, В.Н.Цытович, Ш.Г.Амиранашвили «Нормальные колебания двумерных пылевых кластеров, в виде правильного многоугольника с частицей в центре», Краткие Сообщения по Физике, N7, стр.11-17 (2006)

2. V. N. Tsytovich, N. G. Gousein-zade, and G. E. Morfill "Theory of boundary-free two-dimensional dust clusters", Physics of Plasmas, 13, 033503 (2006)

3. R.Kompaneets, S.V.Vladimirov, A.V.Ivlev, V.Tsytovich and G.Morfill «Dust clusters with non-Hamiltonian particle Dynamics», Physics of Plasmas, **13**, 072104 (2006).

4. Н.Г.Гусейн-заде, Д.Н.Клочков, «Поперечная неустойчивость плоской гексагональной пылевой решетки», Краткие Сообщения по Физике, N3, стр.35-40 (2006)

5. Д.Н.Клочков, Н.Г.Гусейн-заде, « К вопросу о неустойчивости плоского плазменного двухмерного кристалла», Физика плазмы, **33**, N8, стр.711-719 (2007)

**e) Винтовые структуры (7)**

1. Н.Г.Гусейн-заде, А.М.Игнатов. "Колебания геликоидального плазменного квазикристалла", Физика плазмы, Т.29, № 6, с.521 (2003)

2. Н.Г.Гусейн-заде, В.Н.Цытович «Винтовые структуры в комплексной плазме. I Неколлективное взаимодействие», Физика плазмы, **31**, N5, стр.432-452 (2005)

3. В.Н.Цытович, Н.Г.Гусейн-заде « Винтовые структуры в комплексной плазме. II Коллективное взаимодействие», Физика плазмы, **31**, N10, стр. 889-908 (2005)

4. Н.Г.Гусейн-заде, В.Н.Цытович «Спектральные свойства винтовой структуры, состоящей из одноименных одномерных пылинок», Краткие Сообщения по Физике, N6, стр.3-13 (2005)

5. Н.Г.Гусейн-заде, В.Н.Цытович «Спектральные свойства многозаходной винтовой структуры, состоящей из одноименных одномерных пылинок», Физика плазмы, **32**, N8, стр. 727-741 (2006)

6. V. N. Tsytovich, G.E. Morfill, V.E. Fortov, N. G. Gusein-Zade, et all. «From plasma crystals and helical structures towards inorganic living matter», New Journal of Physics, N9, 263 (11 p.) (2007)

7. Э. Аллахярров, Н. Гусейн-заде, «Конденсация и последующее растворение ДНК растворов», Краткие сообщения по физике, N6, стр. 49 (2004).

**f) Войды (4)**

1. V.N.Tsytovich, V.N. Morfill, G. Konopka, U. Thomas, H. «Collision-dominated dust sheaths and voids-observations in micro-gravity experiments and numerical investigation of the force balance relations», New J. Phys., vol.5 ,15 (2003)

2. S. V. Vladimirov, V. N. Tsytovich, G.E. Morfill «Stability of dust voids» // *Physics of plasmas*, 12, 052117 (2005)
3. С.Владимиров, В. Цытович, Г.Морфилл « Зависимость размеров войдов от мощности ионизации; сравнение с экспериментами» // *ЖЭТФ*, **102**, 334 (2006)
4. V.Tsytovich, S.Vladimirov, G.Morfill; «Theory of dust and dust-void structures» *Phys.Rev. E*, **70**, 0664081 (2006)

**Цытович Вадим Николаевич** (Tsytovich Vadim Nikolaevich)

**Гусейн-заде Намик Гусейнага оглы** (Gusein-zade Namik Guseinaga ogly)