

## Кулоновский ансамбль заряженных диамагнитных макрочастиц в неоднородном магнитном поле в условиях микрогравитации

С. Ф. Савин\*, Л. Г. Дьячков<sup>+</sup>, М. И. Мясников<sup>+1)</sup>, О. Ф. Петров<sup>+</sup>, М. М. Васильев<sup>+</sup>, В. Е. Фортгов<sup>+</sup>, А. Ю. Калери\*, А. И. Борисенко\*, Г. Е. Морфилл<sup>×2)</sup>

<sup>+</sup>Объединенный институт высоких температур РАН, 125412 Москва, Россия

\*Ракетно-космическая корпорация “Энергия” им. С.П. Королева, 141070 Королев, Россия

<sup>×</sup>Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik, D-85740 Garshing, Germany

Поступила в редакцию 9 августа 2011 г.

Целью данной работы является экспериментальное изучение формирования сильно неидеальных кулоновских систем из большого числа ( $\sim 10^4$ ) заряженных диамагнитных макрочастиц в магнитной ловушке антипробкотронного типа в условиях микрогравитации. Эксперименты выполнялись на борту российского сегмента международной космической станции в рамках эксперимента “Кулоновский кристалл”. На основе данных видеорегистрации положения частиц в магнитной ловушке выполнены оценки магнитной восприимчивости материала частиц и их заряда, определены период осцилляций облака частиц и декремент затухания осцилляций.

В последнее время упорядоченные пылевые структуры жидкостного и кристаллического типа в газоразрядной плазме часто рассматриваются в качестве физической модели сильно взаимодействующих кулоновских систем [1–5]. Многие явления в таких системах (фазовые переходы, волновые процессы, возникновение неустойчивостей различного типа) могут экспериментально моделироваться с помощью этих структур и изучаться на кинетическом уровне. Однако в этих структурах заряд пылевых частиц не постоянен, зависит от локальных условий и частично экранирован в плазме разряда. При этом от заряда на пылевых частицах зависят как межчастичное взаимодействие, так и левитация частиц в электростатических ловушках, образующихся в стратах разряда постоянного тока или в приэлектродном слое ВЧ-разряда. Таким образом, изменяя межчастичное взаимодействие, т.е. условия формирования самой структуры, мы меняем и условия ее левитации, ее пространственное положение. Чтобы развязать эти свойства, следует организовать ловушку, удерживающую частицы неэлектростатическими силами.

В наших работах [6, 7] предложен альтернативный подход к формированию кулоновских систем из заряженных диамагнитных частиц, удерживаемых в неоднородном магнитном поле  $\mathbf{B}$ . В таком поле на макрочастицу действует эффективная сила [8]

$$\mathbf{F}_B = (\chi m/2)\nabla(\mathbf{B}^2), \quad (1)$$

где  $\chi$  – удельная магнитная восприимчивость вещества,  $m$  – масса частицы. Для парамагнетиков  $\chi > 0$ , а для диамагнетиков  $\chi < 0$ . Поэтому диамагнитные тела выталкиваются из области с большим магнитным полем в область с меньшим, а поле с локальным минимумом – “магнитной ямой” может быть легко создано, в отличие от поля с локальным максимумом – “магнитным холмом” [9]. Ранее подобная магнитная ловушка применялась лишь для левитации единичных незаряженных диамагнитных тел [10, 11]. В [6, 7] реализована ловушка с магнитным полем  $B \sim 1$  Тл для удержания малых кулоновских кластеров из нескольких диамагнитных частиц в наземных условиях. Однако основной интерес связан с формированием значительно более крупных кулоновских систем объемом в десятки кубических сантиметров, содержащих тысячи частиц. Для этого в наземных условиях необходимы поля  $B > 10$  Тл с градиентами порядка 10 Тл/см. В условиях же невесомости достаточно полей, на порядки величины меньших [12].

В настоящей работе сообщается об уникальном эксперименте по формированию и изучению свойств сильнонеидеальных систем из большого числа заряженных диамагнитных (графитовых) макрочастиц в неоднородном магнитном поле в условиях микрогравитации, проведенном на борту международной космической станции (МКС) в рамках экспедиции МКС-25/26 (ноябрь 2010–январь 2011).

<sup>1)</sup> e-mail: miasnikovmi@mail.ru

<sup>2)</sup> G. E. Morfill.

Для исследования сильно связанных кулоновских систем диамагнитных частиц в условиях микрогравитации на МКС была разработана экспериментальная установка, создающая “антипробкотронное” магнитное поле. Она состоит из электромагнита специальной конструкции, сменных контейнеров, содержащих частицы графита в стеклянных ампулах и оптическую систему для видеонаблюдений.

Схема электромагнита показана на рис. 1. “Антипробкотронное” магнитное поле генерируется двумя

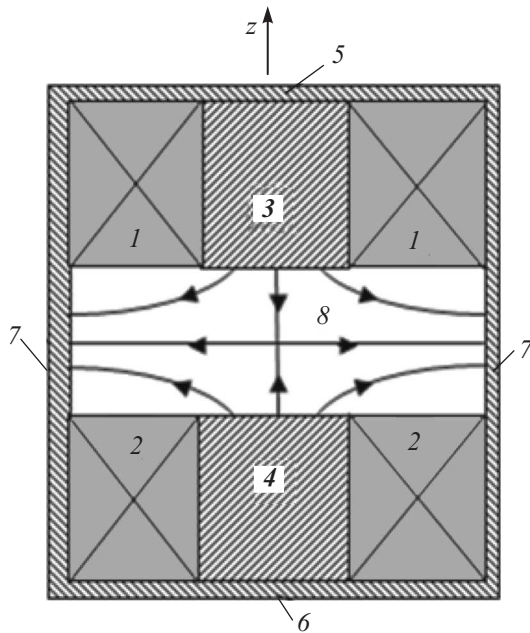


Рис. 1. Схема экспериментальной установки, создающей “антипробкотронное” магнитное поле; 1, 2 – катушки электромагнита; 3, 4 – сердечники катушек; 5, 6 – торцевые магнитопроводы; 7 – боковой магнитопровод; 8 – рабочая зона электромагнита

соосными катушками, токи в которых циркулируют в противоположных направлениях. Корпус электромагнита и всей установки является магнитопроводом, соединяющим сердечники катушек. Он имеет цилиндрическую форму диаметром 15 и высотой 18 см. Расстояние между сердечниками 6 см, их диаметр 5 см. На оси между катушками находится точка с нулевым магнитным полем (точка  $O_B$ ). При изменении тока в одной из катушек она смещается вдоль оси. Вокруг нее находится область радиусом не менее 2 см, в которой зависимость поля от координат является линейной (с точностью до нескольких процентов). При максимальном значении тока в обеих катушках  $i_m = 6.5$  А градиент поля вдоль оси электромагнита составляет 400 Гс/см. В плоскости симметрии поля, проходящей через точку  $O_B$ , ради-

альный градиент в два раза меньше (200 Гс/см), что характерно для антипробкотрона. В линейном приближении магнитное поле на оси симметрии  $z$  направлено вдоль этой оси и может быть представлено в виде

$$B_z = c(i_2 - i_1) - b(i_1 + i_2)z, \quad (2)$$

где  $i_1(i_2)$  – ток в верхней (нижней) катушке, координата  $z$  отсчитывается от точки  $O_B$  при  $i_1 = i_2$ . При  $i_1 \neq i_2$  координата нулевой точки  $z_0 = c(i_2 - i_1)/b(i_1 + i_2)$ . По данным предварительных (наземных) измерений коэффициент  $b = 400/13$  Гс/(А·см). Коэффициент  $c$  неизвестен, так как эти измерения проводились только при  $i_1 = i_2$ , но может быть определен из наблюдений за поведением ансамбля частиц.

Энергопотребление установки  $\sim 200$  Вт. Ток в обмотках электромагнита изменяется дискретно и может принимать (помимо нулевого) четыре значения: 30, 50, 70 и 100% от максимальной величины  $i_m = 6.5$  А. Для установки сменных контейнеров, содержащих ампулы с частицами графита, в рабочую область между катушками корпус электромагнита раскрывается.

Ампулы представляют собой стеклянные цилиндры диаметром 52 и высотой 40 мм, заполненные буферным газом аргоном при атмосферном давлении. Использовались четыре ампулы с графитовыми частицами определенного размера (100, 200, 300 и 400 мкм). Каждая ампула содержала около 2000 частиц. Зарядка частиц осуществлялась с помощью центрального проволочного электрода диаметром 200 мкм, проходящего по оси контейнера. Заземленный внешний электрод для формирования конфигурации электрического поля располагался полукругом с диаметром 51 мм около стеклянной цилиндрической стенки (рис. 2). Другая половина стеклянной стенки оставалась свободной для проведения наблюдений. Электрический потенциал на центральном электроде изменялся от 0 до 24 В. Непосредственно перед проведением эксперимента нужный сменный контейнер устанавливался в корпус электромагнита.

Для диагностики ансамбля частиц ампула снизу освещалась светодиодной пластиной. Для получения изображения по двум направлениям использовались две ПЗС-камеры, сигнал с которых записывался на магнитную ленту. Оптическая схема внутри сменного контейнера предстала на рис. 2.

Эксперимент заключался в изучении формирования кулоновского ансамбля из заряженных частиц графита, помещенных в сменный контейнер, при динамических воздействиях на них магнитного и электрического полей или механического встряхивания.

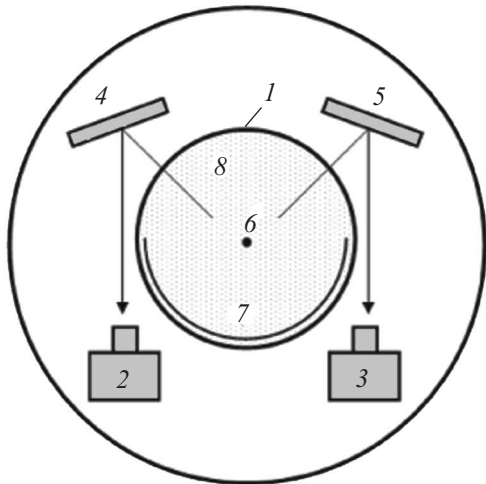


Рис. 2. Оптическая схема внутри сменного контейнера. 1 – стеклянная ампула; 2, 3 – ПЗС-камеры; 4, 5 – зеркала; 6 – центральный электрод; 7 – внешний электрод; 8 – светодиодная пластина

В исходном состоянии частицы находились на стенках стеклянной ампулы, а после встряхивания заполняли ее объем. При подаче потенциала на центральный электрод частицы заряжались при столкновении с ним. Включение электромагнитов приводило к вытеснению частиц графита в область вблизи точки с нулевым магнитным полем и формированию заряженными частицами облака в форме эллипсоида вращения (рис. 3). Соотношение полуосей эллипсоида соответствовало расчетному для антипробкотрона: по оси симметрии в два раза меньше, чем по радиусу. Незаряженные частицы стремились в область нулевого магнитного поля, где они, соприкасаясь с центральным электродом, получали заряд. Таким образом, практически все частицы оказывались заряженными. Размер эллипсоида и его положение определялись токами в катушках электромагнита и потенциалом на центральном электроде.

Уменьшение потенциала центрального электрода приводило к движению частиц графита по направлению к этому электроду, а его увеличение – к их обратному движению. Это подтверждает, что знак заряда, приобретаемого частицами графита, совпадает со знаком электрического потенциала, подаваемого на центральный электрод.

При увеличении силы тока в одной из катушек электромагнита нулевая точка (дно потенциальной ямы магнитной ловушки) смещалась по оси симметрии от этой катушки, а при уменьшении – в противоположном направлении. При этом все частицы, согласно (1), получали динамический импульс. Через некоторое время увеличивался (уменьшался) на

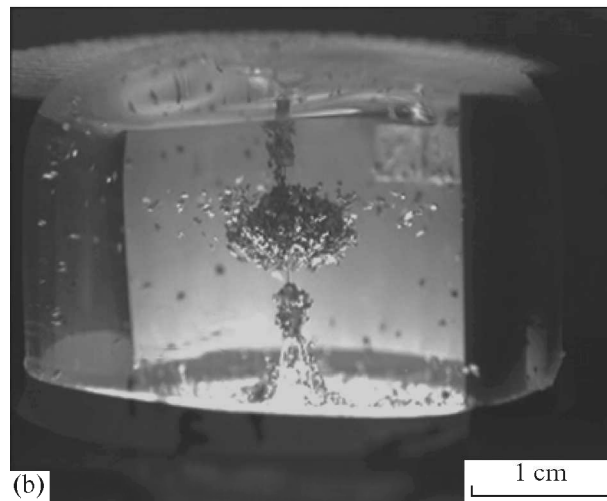
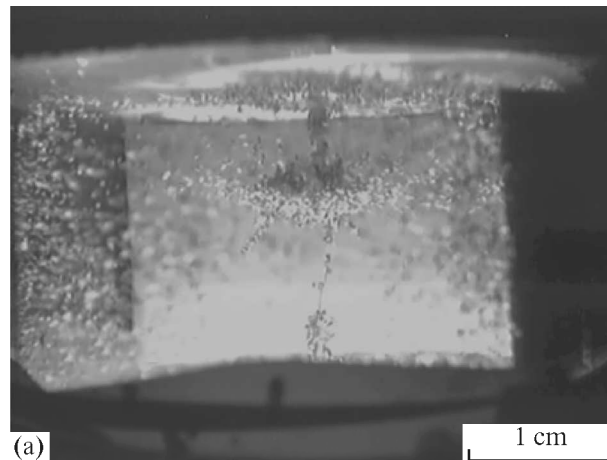


Рис. 3. Формирование облака из частиц графита; на центральном электроде “+”, диаметр частиц 300 мкм (а), и на центральном электроде “–”, диаметр частиц 400 мкм (б)

такую же величину ток в другой катушке и нулевая точка возвращалась в прежнее положение. Полученный импульс возбуждал осцилляции ансамбля частиц как целого вдоль оси  $z$ . При переключении тока со второго (50%) на третий (70%) уровень сначала в одной катушке, а через промежуток времени  $t_0 = 2$  с в другой возникали колебания облака частиц с начальной амплитудой 4.9 мм и периодом около 10 с. Вследствие трения о буферный газ в течение нескольких периодов колебания затухали. На рис. 4 показана зависимость от времени максимальных отклонений центра эллипсоида от нулевой точки для частиц с размером 400 мкм, демонстрирующая процесс затухания колебаний. Кривая соответствует декременту затухания  $0.07 \text{ с}^{-1}$ .

По результатам наблюдений за колебаниями облака пылевых частиц можно определить магнитную

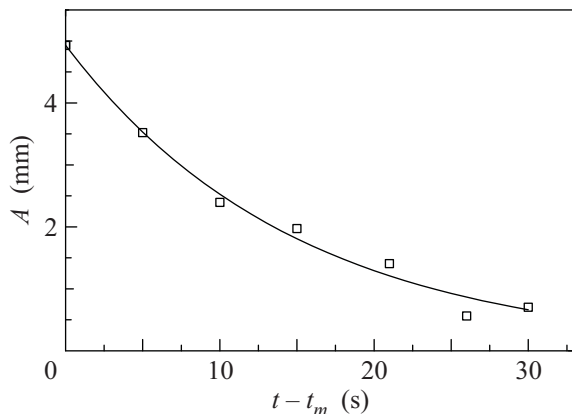


Рис. 4. Амплитуда затухающих колебаний центра тяжести облака частиц графита: точки – экспериментальные данные; кривая – аппроксимация, соответствующая декременту затухания  $0.07 \text{ c}^{-1}$

восприимчивость материала частиц  $\chi$  и коэффициент  $c$  в (2). Графит имеет слоистую структуру, и значение  $\chi$  сильно зависит от направления. Для поликристаллического графита в среднем  $\chi = -(2.3-3) \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$ . Однако эта величина может заметно отличаться от среднего значения при наличии некоторой анизотропии материала частиц.

Движение центра тяжести облака описывается уравнением

$$\ddot{z} + 2\delta\dot{z} = F_B/M, \quad (3)$$

где  $M$  – масса облака,  $\delta$  – декремент затухания, точка над  $z$  обозначает дифференцирование по времени. При  $t < t_0$  имеем  $i_1 + i_2 = 1.2i_m$ ,  $i_2 - i_1 = -0.2i_m$  и, согласно (1) и (2),

$$F_B/M = \chi b[(i_1 + i_2)^2 z - c(i_2^2 - i_1^2)] = 0.24\chi b i_m^2 (c + 6bz). \quad (4)$$

При нулевых начальных условиях,  $z(0) = \dot{z}(0) = 0$ , решение (3) имеет вид

$$z(t) = \frac{c}{6b} \left\{ e^{-\delta t} \left[ \cos(\omega_1 t) + \frac{\delta}{\omega_1} \sin(\omega_1 t) \right] - 1 \right\}, \quad (5)$$

где

$$\omega_1 = \sqrt{1.44|\chi|b^2 i_m^2 - \delta^2}. \quad (6)$$

При  $t > t_0$  имеем  $i_1 = i_2 = 0.7i_m$  и  $F_B/M = 1.96\chi b^2 i_m^2 z$ . Решение (3) в этом случае имеет вид

$$z(t) = e^{-\delta t} (C_1 \cos(\omega_2 t) + C_2 \sin(\omega_2 t)), \quad (7)$$

где

$$\omega_2 = \sqrt{1.96|\chi|b^2 i_m^2 - \delta^2}. \quad (8)$$

Из условия непрерывности  $z(t)$  и  $\dot{z}(t)$  при  $t = t_0$  находим

$$C_1 = \frac{c}{6b} \left\{ \left[ \cos(\omega_1 t_0) + \frac{\delta}{\omega_1} \sin(\omega_1 t_0) - e^{\delta t_0} \right] \times \right. \\ \left. \times \left[ \cos(\omega_2 t_0) - \frac{\delta}{\omega_2} \sin(\omega_2 t_0) \right] + \right. \\ \left. + \frac{\omega_1^2 + \delta^2}{\omega_1 \omega_2} \sin(\omega_1 t_0) \sin(\omega_2 t_0) \right\}. \quad (9)$$

Выражение для  $C_2$  получается из (9) заменой  $\cos(\omega_2 t_0) \rightarrow \sin(\omega_2 t_0)$  и  $\sin(\omega_2 t_0) \rightarrow -\cos(\omega_2 t_0)$ .

По данным наблюдений за затухающими колебаниями ансамбля частиц с размером  $400 \text{ мкм}$  (рис. 4) определены декремент затухания  $\delta = 0.07 \text{ c}^{-1}$  и период колебаний  $T = 10 \text{ с}$  (или  $\omega_2 = 0.63 \text{ c}^{-1}$ ). Из (8) находим  $\chi = -5.1 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$ , а из (6)  $\omega_1 = 0.54 \text{ c}^{-1}$ . Теперь коэффициенты в (7) можно выразить через параметр  $c$  в (2):  $C_1 = 3.3 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ ,  $C_2 = -4.2 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ . Первый экстремум функция  $z(t)$  имеет при  $t = t_m = 3.5 \text{ с}$ . Такое значение хорошо согласуется с данными видеозаписи. Оно соответствует начальной точке на рис. 4, где  $z = -0.49 \text{ см}$ . Приравняем (7) при  $t = t_m$  этому значению,  $z(t_m) = -4.2 \cdot 10^{-3} c = 0.49 \text{ см}$ , и найдем коэффициент  $c = 117 \text{ Гс}/\text{А}$ . При  $t < t_0$  положение нулевой точки  $z_0 = -0.63 \text{ см}$ . Она, очевидно, не достигается центром тяжести ансамбля частиц,  $z(t_0) = -0.31 \text{ см}$ .

Оценка заряда на частицах производилась на основе баланса действующих на них магнитной (1) и электростатической сил. Последняя определяется взаимодействием с другими заряженными частицами и полем между электродами. Пренебрежем сплюснутостью эллипсоидального объема, занимаемого ансамблем частиц, и будем для простоты полагать его сферическим с постоянной плотностью частиц и радиусом  $R$ . Поле между электродами приближенно будем полагать цилиндрически-симметричным, что вблизи центрального электрода вполне допустимо. Заметим сразу, что погрешность такой оценки, связанная с несферической формой ансамбля частиц, как показывают соответствующие расчеты, не превышает погрешности, обусловленной другими причинами.

Для простоты рассмотрим частицу, находящуюся в плоскости симметрии, перпендикулярной оси  $z$ . Здесь силу (1) в линейном приближении можно записать в виде

$$F_B = m_p \chi \left( \frac{\partial |\mathbf{B}|}{\partial r} \right)^2 r, \quad (10)$$

где  $m_p$  – масса частицы. Электростатическая сила

$$F_e = \frac{Nq_p^2}{R^3}r + \frac{q_p U}{r \ln(r_2/r_1)}, \quad (11)$$

где  $N$  – количество частиц в ансамбле,  $q_p$  – заряд частицы,  $r_1$  и  $r_2$  – радиусы центрального и внешнего электродов соответственно,  $U$  – напряжение между электродами. Наиболее четкое видеоизображение ансамбля с  $R \approx 0.5$  см получено для частиц с размером 400 мкм при  $U = 24$  В и  $i_1 = i_2 = 0.7i_m$  (таким образом,  $\partial|\mathbf{B}|/\partial r = 140$  Гс/см). Из баланса  $F_B + F_e = 0$  для  $r \sim R$  находим  $q_p \approx 4 \cdot 10^4$  элементарных зарядов. При этом поле электродов практически не влияет на результат.

В результате проведения эксперимента “Кулоновский кристалл” на МКС впервые продемонстрирована возможность формирования в магнитной ловушке в условиях микрогравитации устойчивых пространственно-упорядоченных структур из нескольких тысяч заряженных диамагнитных частиц. В результате наблюдений за поведением таких структур определены период осцилляций облака частиц и декремент затухания осцилляций. Выполнена оценка магнитной восприимчивости материала частиц и заряда на них. В отличие от плазменно-пылевых структур в электрических разрядах предлагаемый метод позволяет формировать устойчивые пространственные структуры заряженных частиц как в неионизованном газе, так и в вакууме.

Работа частично поддержана Программой фундаментальных исследований Президиума РАН “Теплофизика и механика экстремальных энергетических воздействий и физика сильно сжатого вещества”, а также проектами РФФИ # 10-02-01428, 10-02-90056 и 11-02-01051.

1. S. V. Vladimirov and K. Ostrikov, Phys. Rep. **393**, 175 (2004).
2. O. S. Vaulina, O. F. Petrov, V. E. Fortov et al., Phys. Rev. Lett. **93**, 035004 (2004).
3. G. E. Morfill, A. V. Ivlev, S. A. Khrapak et al., Contrib. Plasma Phys. **44**, 450 (2004).
4. V. E. Fortov, O. F. Petrov, and O. S. Vaulina, Phys. Rev. Lett. **101**, 195003 (2008).
5. P. K. Shukla and B. Eliasson, Rev. Mod. Phys. **81**, 25 (2009).
6. С. Ф. Савин, Л. Г. Дьячков, М. М. Васильев и др., Письма в ЖТФ. **35**, 42 (2009).
7. S. F. Savin, L. G. D'yachkov, M. M. Vasiliev et al., Europhys. Lett. **88**, 64002 (2009).
8. И. Е. Тамм, *Основы теории электричества*, М.: Наука, 1966.
9. Б. Б. Кадомцев, *Коллективные явления в плазме*, М.: Наука, 1976.
10. M. V. Berry and A. K. Geim, Eur. J. Physics **18**, 307 (1997).
11. A. Geim, Phys. Today **51**(9), 36 (1998).
12. С. Ф. Савин, А. В. Марков, О. Ф. Петров, В. Е. Фортов, Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, **6**, 55 (2004).