

Кулоновские структуры из заряженных макрочастиц в статических магнитных ловушках при криогенных температурах

М. М. Васильев^{*1)}, О. Ф. Петров, К. Б. Стаценко

Объединенный институт высоких температур РАН, 125412 Москва, Россия

Поступила в редакцию 7 октября 2015 г.

Экспериментально наблюдалось удержание электрически заряженных (до $10^7 e$) сверхпроводящих макрочастиц микронных размеров в статической магнитной ловушке в жидком азоте и в его парах при температурах 77–91 К. Макрочастицы с размерами до 60 мкм левитировали в неоднородном постоянном магнитном поле $B \sim 2500$ Гс. Представлены результаты экспериментального наблюдения формирования сильно коррелированных структур из $\sim 10^3$ частиц. При этом среднее межчастичное расстояние составило 475 мкм. Проведены оценки параметра неидеальности и параметра Линдемана для таких структур. Их значения составили $\sim 10^7$ и ~ 0.03 соответственно, что характерно для сильнокоррелированных кристаллических или стеклоподобных структур.

DOI: 10.7868/S0370274X15230149

Введение. В настоящее время известно большое количество работ, в которых наблюдались упорядоченные пылевые структуры жидкостного и кристаллического типов в системе сильно взаимодействующих кулоновских частиц в газоразрядной плазме (см., например, [1–5]). В отличие от атомов реальных жидкостей и твердых тел пылевые частицы могут наблюдаться визуально по отдельности. Это позволяет проводить изучение физических процессов в таких неидеальных системах (фазовые переходы, волновые процессы, возникновение неустойчивостей различного типа) на кинетическом уровне [6]. Следует отметить, что в газоразрядной плазме заряд на пылевых частицах зависит от локальных параметров плазмы и может быть частично экранирован ионами плазмы. Заряд на частицах влияет как на межчастичное взаимодействие, так и на левитацию частиц в электрических ловушках, образующихся в стратах разряда постоянного тока или в приэлектродном слое высокочастотного (ВЧ) разряда.

Для удержания пылевых структур и экспериментального изучения сильно взаимодействующих кулоновских систем может быть использована левитация диамагнитных тел в неоднородном стационарном магнитном поле. Такая левитация возникает в области локального минимума магнитного поля. Вместе с тем в условиях гравитации можно использовать магнитные поля и без локального минимума. В этом случае сила $\mathbf{F} = (\chi m/2)\nabla(B^2)$ уравновешивается силой тяжести.

В экспериментах [7–10] в качестве материала частиц применялся графит, который имеет большое значение удельной магнитной восприимчивости. В условиях лабораторных экспериментов при магнитных полях 2 Тл/мм оказалось возможным сформировать пылевой кластер, состоящий лишь из нескольких макрочастиц графита. В экспериментах на борту Международной космической станции в условиях микрогравитации наблюдалось формирование уже протяженного кластера из нескольких тысяч заряженных макрочастиц графита [11, 12].

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных наблюдений пространственных структур сильно заряженных (до $10^7 e$) макрочастиц микронных размеров из сверхпроводящей высокотемпературной керамики $YBa_2Cu_3O_7$ в статической магнитной ловушке в жидком азоте и его парах при температурах 77–91 К. Удержание частиц основано на хорошо известном эффекте Мейснера: вытеснении магнитного поля из области сверхпроводящей фазы [13]. Следует отметить, что использование высокотемпературных сверхпроводников ограничено всего несколькими типами керамик (иттриевая, висмутовая, таллиевая, ртутная), обладающих слоистой структурой с плоскостями из атомов Cu и O [14], тогда как в области температур жидкого гелия количество доступных материалов значительно расширяется, в том числе на металлы и их сплавы (алюминий, олово, свинец, ванадий, ртуть, ниобий и т.д.) [15].

Экспериментальная установка и анализ результатов. На рис. 1 представлена схема используемой экспериментальной установки. Ее основной ча-

¹⁾e-mail: mixxy@mail.ru

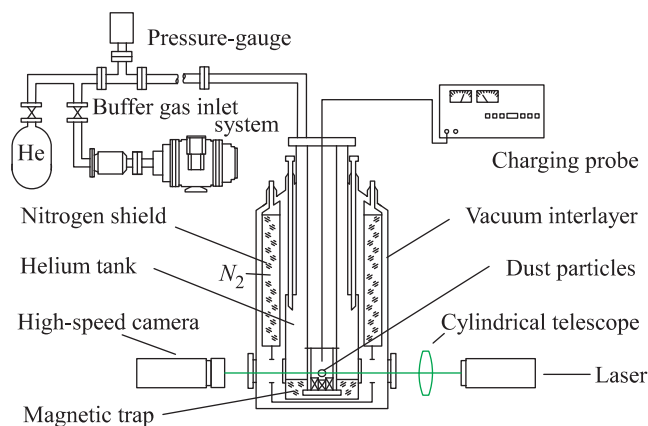


Рис. 1. (Цветной онлайн) Схема экспериментальной установки

стью является оптический гелиевый криостат с диапазоном рабочих температур 1.8–273 К. Теплоизоляция внутренних сосудов и рабочей камеры криостата от окружающей среды обеспечивается за счет высокого вакуума: перед проведением эксперимента пространство между внутренним сосудом, азотным экраном и внешним корпусом вакуумировалось до остаточного давления не более 10^{-5} Торр. Азотный экран состоит из резервуара с жидким азотом и металлического экрана с тепловым контактом. Резервуар жидкого азота подвешен на двух тонкостенных металлических трубках, прикрепленных к верхнему фланцу наружного корпуса криостата, которые используются для его заполнения жидким азотом, а также для отвода паров азота в атмосферу. Для ограничения внешних тепловых потоков наружные поверхности гелиевого и азотного резервуаров и поверхность азотного экрана покрыты несколькими слоями теплоотражающего материала, а сам азотный экран изготовлен из меди, обладающей высокой теплопроводностью.

В камеру термостатирования (шахту) криостата, внутри которой обеспечивается стабилизация температуры, помещается специальная вставка, расположенная аксиально вдоль вертикальной оси криостата. В нижней части вставки находится платформа для установки магнитов, формирующих магнитную ловушку. Положение платформы регулируется с помощью микрометрических винтов и фиксируется напротив оптических окон криостата. Заправка камеры термостатирования хладагентом осуществляется через штуцеры с витоновым уплотнением, расположенные в верхней части криостата.

В настоящей работе в качестве основного хладагента использовался жидкий азот, что позволяло

проводить работу в интервале температур до 77 К. Для предотвращения влияния потоков жидкого азота на положение и динамику исследуемых пылевых кластеров магнитная ловушка окружалась стеклянным цилиндрическим экраном. Перед проведением эксперимента с целью предотвращения конденсации водяных паров в хладагенте, что, в свою очередь, может приводить к затруднению оптической диагностики пылевой подсистемы, из камеры термостатирования откачивался воздух. Затем она заполнялась газообразным гелием до атмосферного давления. Откачка производилась вакуумным постом, представляющим собой конструкцию из трубопроводов для соединения вакуумной камеры с форвакуумным и турбомолекулярным насосами, через клапан для регулировки скорости откачки.

Основными элементами диагностического комплекса экспериментального стенда являлись высокоскоростная видеокамера, твердотельный лазер с длиной волны $\lambda = 523$ нм, а также персональный компьютер с пакетом специализированных программ для регистрации частиц, видеозаписи и обработки видеоданных. Визуализация пылевых частиц, левитирующих в магнитной ловушке, осуществлялась путем их освещения лазерным излучением. Оптическая схема диагностического комплекса состояла из положительной плоскоцилиндрической линзы, телескопа и диафрагмы, закрепленных на оптическом столе. При помощи плоскоцилиндрической линзы формировался плоский лазерный пучок (так называемый лазерный нож), толщина которого в перетяжке составляла от 150 до 250 мкм. Затем пучок расширялся телескопической системой и вводился через оптическое окно криостата в ячейку с пылевыми частицами. Освещенные лазерным излучением макрочастицы регистрировались с помощью скоростной видеокамеры через оптическое окно криостата, расположенное под углом 90 град к лазерному пучку. Полученные видеоизображения обрабатывались при помощи специально разработанных компьютерных программ. В результате были определены координаты частиц, их траектории и скорости движения, средние межчастичные расстояния, кинетическая температура пылевых частиц.

Для формирования магнитной ловушки использовались два постоянных неодимовых магнита с индукцией магнитного поля ~ 0.5 Тл. На рис. 2а и б представлены профиль распределения индукции магнитного поля и силовые линии магнитного поля над магнитной ловушкой.

Одной из отличительных особенностей удержания сверхпроводящих макрочастиц в магнитной ло-

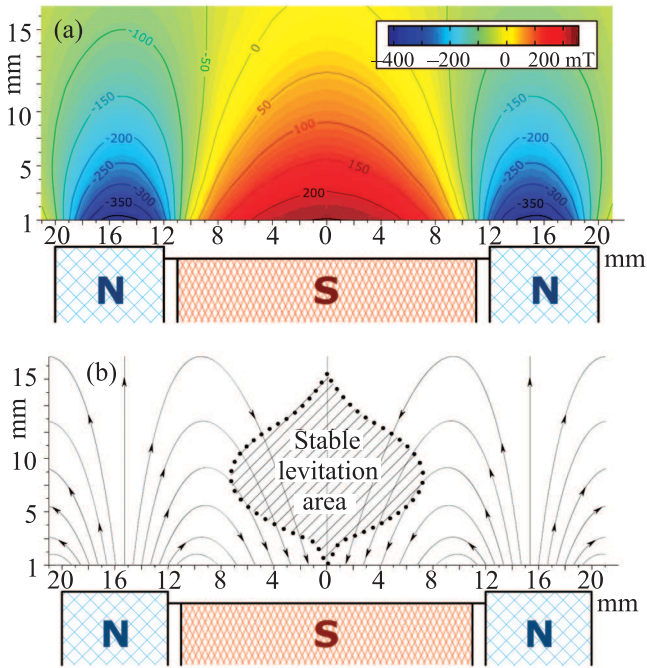


Рис. 2. (Цветной онлайн) (a) – Профиль распределения индукции магнитного поля в ловушке для удержания сверхпроводящих макрочастиц иттриевой керамики $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$. (b) – Силовые линии магнитного поля и зона устойчивой левитации кулоновских структур заряженных макрочастиц иттриевой керамики $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ в магнитной ловушке

вушке по сравнению с их удержанием в газовых разрядах является отсутствие сепарации частиц по размерам. Это позволяет экспериментально получать “стеклообразную” структуру. В настоящей работе использовались полидисперсные частицы сверхпроводящей иттриевой керамики $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ диаметром от 30 до 60 мкм (рис. 3).

Макрочастицы инжектировались в область магнитной ловушки с температурой буферного газа ~ 77 К. После охлаждения частиц до температуры ниже $T_{\text{crit}} \sim 91 \pm 3$ К наблюдалось формирование кластера из агломерировавшихся сверхпроводящих частиц, левитирующих в приосевой области магнитной ловушки (рис. 4а). Зарядка макрочастиц осуществлялась прямым контактным методом при соприкосновении острия электрического зонда с поверхностью макрочастиц. В зависимости от напряжения на электрическом зонде, знак заряда, приобретаемого частицами, мог быть как положительным, так и отрицательным [16]. В настоящих экспериментах потенциал на острие зонда составлял $\varphi \sim 2 \cdot 10^3$ В. В результате соприкосновения зонда с частицами ими приобретался заряд q , который может быть оце-

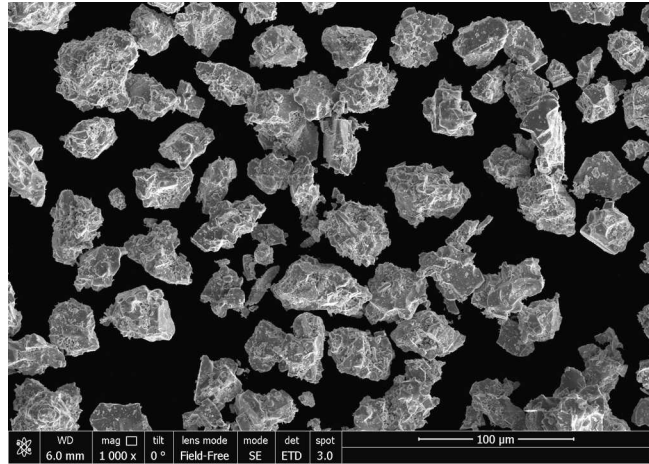


Рис. 3. Фотография полидисперсных частиц высокотемпературной керамики $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, полученная с помощью электронного микроскопа

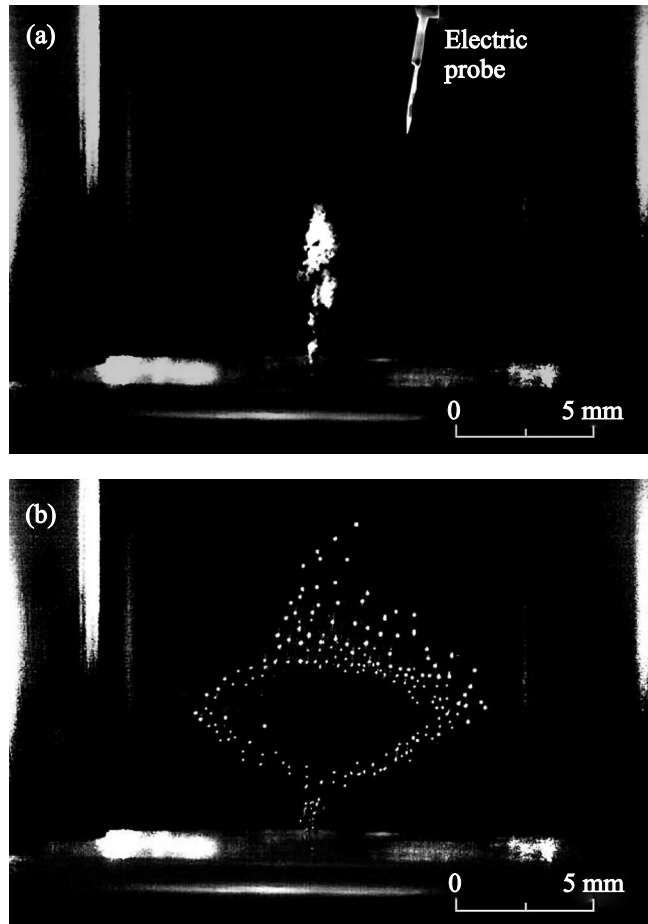


Рис. 4. (a) – Облако незаряженных сверхпроводящих макрочастиц керамики $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, левитирующих в магнитной ловушке. (b) – Структура заряженных сверхпроводящих макрочастиц керамики $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$

нен как $\varphi d/2$. Для частиц диаметром $d = 30$ мкм величина заряда составила $q \sim (10^6 - 10^7)e$.

Для заряженных макрочастиц наблюдалось формирование упорядоченных кулоновских структур (рис. 4b). Распределение межчастичных расстояний представлено на рис. 5 (расстояния в упорядочен-

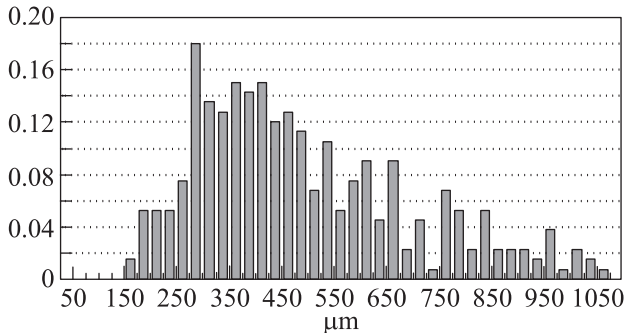


Рис. 5. Распределение межчастичных расстояний в структуре заряженных сверхпроводящих частиц керамики $YBa_2Cu_3O_7$

ных структурах находятся в диапазоне от 160 до 1060 мкм). Для данного распределения характерно наличие сильной межчастичной корреляции, что подтверждается как прямыми визуальными наблюдениями, так и отсутствием в распределении малых межчастичных расстояний [17, 18]. Среднее межчастичное расстояние составило $l_p \sim 475$ мкм.

Потенциальная энергия взаимодействия заряженных частиц может быть оценена как $q^2/l_p \sim 10^8$ эВ. Для нахождения кинетической энергии движения заряженных частиц построено распределение скоростей движения частиц в горизонтальном и вертикальном направлениях (рис. 6) и получена средняя скорость макрочастиц

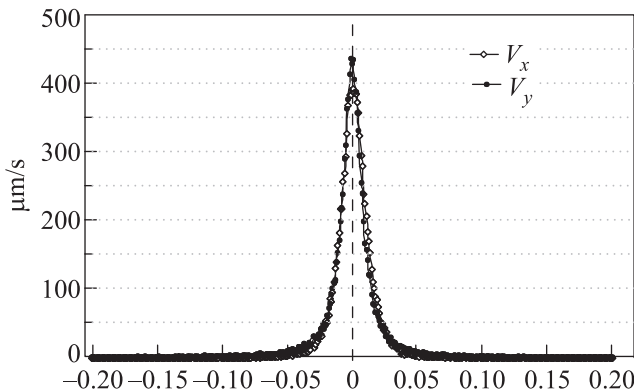


Рис. 6. Распределение заряженных макрочастиц керамики $YBa_2Cu_3O_7$ по скоростям в горизонтальном и вертикальном направлении (вдоль оси криостата)

$V_p \sim 180$ мкм/с. Для частицы с массой $m_p \sim 9 \cdot 10^{-8}$ г кинетическая энергия составляет ~ 10 эВ. Таким образом, параметр неидеальности Γ системы, определяемый как отношение потенциальной энергии взаимодействия частиц в системе к их кинетической энергии, имеет значение $\sim 10^7$.

Согласно критерию Линдемана при плавлении кристалла среднеквадратичная амплитуда теплового движения атомов достигает некоторого критического значения относительно характерного межатомного расстояния $L = \langle \Delta x^2 \rangle^{1/2} / l_p$ [19]. Полученное из результатов экспериментальных измерений среднеквадратичное смещение частиц относительно их положений равновесия составило $\langle \Delta x^2 \rangle^{1/2} \sim 13.2$ мкм. Таким образом, при среднем межчастичном расстоянии $l_p \sim 475$ мкм параметр Линдемана имеет величину ~ 0.03 , что характерно для сильно коррелированных кристаллических или стеклоподобных систем.

Закключение. В работе наблюдалось формирование упорядоченных кулоновских структур из заряженных макрочастиц высокотемпературной сверхпроводящей иттриевой керамики $YBa_2Cu_3O_7$ в статических магнитных ловушках. Представлены экспериментальные результаты по формированию сильно коррелированных структур, состоящих из $\sim 10^3$ макрочастиц диаметром 30–60 мкм с величиной заряда (положительного или отрицательного знака) до 10^7e . Среднее межчастичное расстояние составило 475 мкм. Описана экспериментальная установка для получения кулоновских структур из сверхпроводящих частиц с размерами до 60 мкм, левитирующих в неоднородном постоянном магнитном поле ~ 2500 Гс. Заряженные макрочастицы удерживались в статической магнитной ловушке в жидком азоте и его парах при температурах 77–91 К. Получены значения параметра неидеальности Γ ($\sim 10^7$) и параметра Линдемана (~ 0.03), характерные для сильно коррелированных кристаллических или стеклоподобных структур.

Авторы благодарны А.С. Иванову за ценные обсуждения результатов работы. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект # 14-50-00124)

1. О. С. Ваулина, О. Ф. Петров, В. Е. Форттов, А. Г. Храпак, С. А. Храпак, *Пылевая плазма. Эксперимент и теория*, Физматлит (2009).
2. V. E. Fortov and G. E. Morfill, *Complex and Dusty*, CRC Press (2010).
3. В. Е. Форттов, А. Г. Храпак, С. А. Храпак, В. И. Молотков, О. Ф. Петров, *УФН* **174**(5), 495 (2004).

4. М. М. Васильев, Л. Г. Дьячков, С. Н. Антипов, О. Ф. Петров, В. Е. Фортов, Письма в ЖЭТФ **86**(5 6), 414 (2007).
5. M. M. Vasiliev, L. G. D'yachkov, S. N. Antipov, R. Huijink, O. F. Petrov, and V. E. Fortov, EPL **93**, 15001 (2011).
6. О. Ф. Петров, М. М. Васильев, Й. Тун, К. Б. Стаценко, О. С. Ваулина, Е. В. Васильева, В. Е. Фортов, ЖЭТФ **147**(2), 372 (2015).
7. A. K. Geim, Phys. Today **51**(9), 36 (1998).
8. С. Ф. Савин, Л. Г. Дьячков, М. М. Васильев, О. Ф. Петров, В. Е. Фортов, Письма в ЖТФ **35**(24), 42 (2009).
9. S. F. Savin, L. G. D'yachkov, M. M. Vasiliev, O. F. Petrov, and V. E. Fortov, EPL **88**(6), 64002 (2009).
10. Л. Г. Дьячков, Письма ЖТФ **41**(12), 81 (2015).
11. С. Ф. Савин, Л. Г. Дьячков, М. И. Мясников, О. Ф. Петров, М. М. Васильев, В. Е. Фортов, А. Ю. Калери, А. И. Борисенко, Г. Е. Морфилл, Письма в ЖЭТФ **94**(7), 548 (2011).
12. O. F. Petrov, M. I. Myasnikov, L. G. D'yachkov, M. M. Vasiliev, V. E. Fortov, S. F. Savin, A. Yu. Kaleri, A. I. Borisenko, and G. E. Morfill, Phys. Rev. E **86**(3), 036404 (2012).
13. V. L. Ginzburg and E. A. Andryushin, *Superconductivity*, World Scientific (2004).
14. J. G. Bednorz and K. A. Muller, Z. Phys. B: Cond. Mat. **64**(2), 189 (1986).
15. A. A. Pelmenev, I. N. Krushinskaya, I. B. Bykhalo, and R. E. Boltnev, Low. Temp. Phys. (2016) (in press).
16. M. M. Vasiliev, O. F. Petrov, and K. B. Statsenko, J. Phys. Conf. Ser. **653**, 012133 (2015).
17. В. Е. Фортов, А. П. Нefeldов, О. Ф. Петров, А. А. Самарян, А. В. Чернышев, ЖЭТФ **111**(2), 467 (1997).
18. V. E. Fortov, A. P. Nefedov, O. F. Petrov, A. A. Samarian, and A. V. Chernyshev, Phys. Lett. A **219**(2), 89 (1996).
19. F. A. Lindemann, Z. Phys. **11**, 609 (1910).