

Плазменный кристалл в $(3 + 1)$ измерениях

Р. А. Сыроватка¹⁾, А. М. Липаев¹⁾, В. Н. Наумкин¹⁾, Б. А. Клумов¹⁾

Объединенный институт высоких температур РАН, 125412 Москва, Россия

Поступила в редакцию 19 октября 2022 г.

После переработки 3 ноября 2022 г.

Принята к публикации 3 ноября 2022 г.

Докладывается первое экспериментальное наблюдение квазидвумерного плазменного кристалла в $(3 + 1)$ измерениях, т.е. определены трехмерные координаты каждой микрочастицы кристалла в течение длительного времени. Это позволило обнаружить тонкие детали структурной эволюции такой системы при ее плавлении и кристаллизации.

DOI: 10.31857/S123456782224003X, EDN: ndxkte

Начиная с момента открытия [1–4], плазменный кристалл находится в фокусе интересов различных исследовательских групп. С одной стороны, это связано с интересом к процессам, происходящим в плазме, содержащей микрочастицы (такую плазму принято называть комплексной (КП) или пылевой плазмой), который обусловлен ее широкой распространенностью в Природе. Межзвездные облака, газопылевые скопления, планетные кольца, атмосферы комет, пылевые структуры в верхних слоях атмосфер и ионосфер планет (например, в случае Земли – это серебристые облака) – все эти объекты в той, или иной степени, являются комплексной плазмой (КП) [5, 6]. С другой стороны, системы микрочастиц (и плазменные кристаллы, в частности), изучаемые в лабораторных условиях, являются, как правило, сильно неидеальными системами, что вызывает к ним большой интерес в контексте физики конденсированного состояния, поскольку в эксперименте с такой КП микрочастицы легко различаются оптическими методами, что позволяет проследить за поведением каждой индивидуальной микрочастицы и изучить, таким образом, на самом детальном (“атомарном”) уровне процессы плавления, кристаллизации, развитие различных неустойчивостей, возбуждение коллективных мод в системе и т.д. [7, 8].

В лабораторных условиях КП традиционно получают при добавлении частиц микронного размера в газоразрядную плазму инертных газов пониженного давления. Рекомбинация электронов и ионов плазмы на поверхности микрочастиц приводит к их быстрой зарядке, при этом характерный заряд Z_d , приобретаемый частицей, может быть очень большим:

$Z_d/e \sim 10^3 \div 10^4$, где e – заряд электрона. Большой заряд микрочастиц часто приводит к тому, что ансамбль из микрочастиц кристаллизуется, формируя плазменный кристалл. Особенно интересен случай, когда плазменный кристалл является двумерной или квазидвумерной системой (q2D) (особенно это важно в контексте физики двумерного плавления (например, [9, 10]) и свойств двумерной жидкости [11]). Такая почти планарная система формируется при вбросе микрочастиц в газоразрядную плазму в приэлектродном слое, где сила гравитации, действующая на частицы, уравновешиваются электрическим полем (например, [8]). При этом с помощью современных видеокамер высокого разрешения можно определить траектории каждой отдельной частицы. До сих пор при экспериментальном исследовании таких q2D систем изучались траектории частиц только в горизонтальной плоскости ($x - y$) (плоскости монослоя из микрочастиц), а их движение в поперечном направлении (вдоль вертикальной координаты z) либо не учитывалось совсем, либо анализировались только интегральные оптические характеристики вертикальных смещений ансамбля микрочастиц. Отметим, что знание вертикальных смещений микрочастиц в таких системах является критически важным для понимания их эволюции (и, в частности, при их плавлении и кристаллизации). В настоящей работе впервые представлено экспериментальное описание квазидвумерного плазменного кристалла в $(3 + 1)$ измерениях, т.е. получены координаты каждой отдельной микрочастицы системы в трехмерном пространстве (x, y, z) в течение длительного времени t . Очень важной особенностью данного эксперимента является то, что параметры разряда в процессе наблюдения за микрочастицами оставались неизменными. Ниже приводится краткое опи-

¹⁾e-mail: syrovatkara@ihed.ras.ru; naumkin@ihed.ras.ru; amlipaev@gmail.com; klumov@ihed.ras.ru

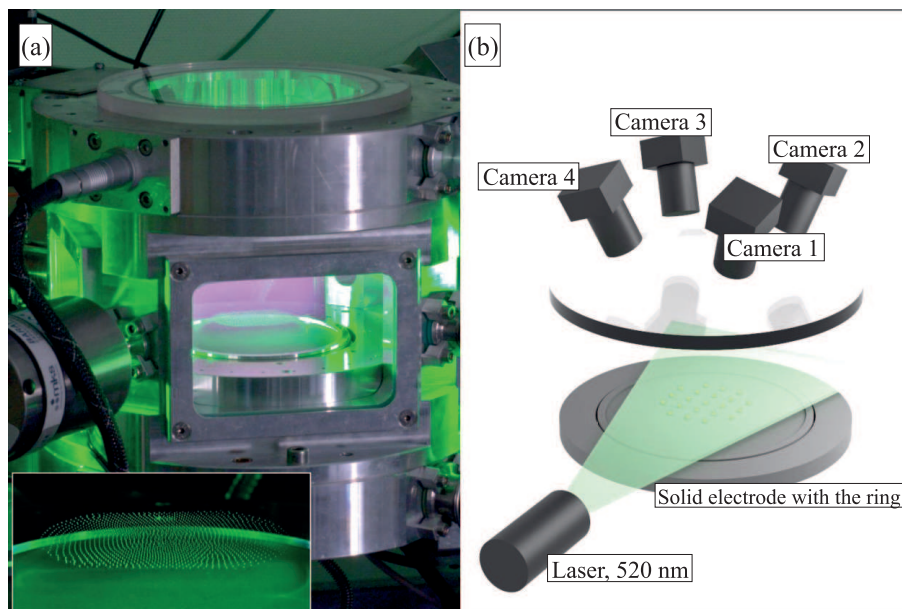


Рис. 1. (Цветной онлайн) Плазменная газоразрядная камера нового поколения “Zyflex” (a). Показан внешний вид работающей установки и образовавшаяся после инъекции монодисперсных полимерных микрочастиц, почти планарная (в плоскости $x - y$) структура – двумерный плазменный кристалл (подробнее он показан на вставке к панели (a)). Дискосподобная форма плазменного кристалла определяется аксиальной симметрией потенциала конфинмента, который близок к параболическому ($U(r) \propto r^2$) [13, 14]. На панели (b) показана оптическая система, позволяющая реализовать распознавание трехмерных координат микрочастиц в каждый момент времени. В рамках этой системы, четыре синхронизированные видеокамеры высокого разрешения с разных ракурсов производят съемку микрочастиц, которые подсвечиваются лазерным излучением

сание экспериментальной установки и обсуждаются первые результаты наблюдений.

Описание эксперимента. Основной частью экспериментальной установки является модифицированная плазменная камера нового поколения “Zyflex” [12], в которой создается емкостной высокочастотный разряд в аргоне на частоте 13.56 МГц. Данная камера была создана с целью исследования динамических и структурных свойств двумерных и трехмерных пылевых структур в плазме газового разряда. Для исследования q2D систем использовался сплошной электрод, который позволяет получить более однородные пылевые структуры, а верхний электрод был убран и верхняя часть камеры сделана прозрачной для видеонаблюдения за пылевой структурой. На рисунке 1 показаны внешний вид установки, расположение видеокамер высокого разрешения и, в качестве примера, показан образец типичного двумерного плазменно-пылевого кристалла, который наблюдался на данной установке.

Характерное значение высокочастотного (ВЧ) напряжения, подаваемого на электрод V_{pp} , составляет $60 \div 200$ В, при этом давление газа может ва-

рироваться в пределах $0.1 \div 250$ Па. Микрочастицы (как правило используются монодисперсные полимерные частицы размером в несколько микрон) вбрасываются в горячий разряд с помощью электромагнитного диспенсера; число микрочастиц, инжектированных в разряд, регулируется временем подачи напряжения на электромагнит и количеством инъекций. Электрод диаметром 114 мм позволяет создавать плазменно-пылевые структуры, содержащие до нескольких тысяч частиц (с характерным расстоянием между ними порядка 100 микрон). На границе электрода расположено металлическое кольцо высотой 2 мм, которое создает дополнительный горизонтальный электростатический потенциал, ограничивающий движение микрочастиц в центральной области разряда. Можно показать [13, 14], что в центре разрядной камеры в плоскости монослоя из микрочастиц, удерживающий потенциал $U(r)$ близок к параболическому ($U(r) \propto r^2$), а его аксиальная симметрия в этой плоскости, в частности, объясняет дискосподобную форму двумерного плазменного кристалла, показанного на рис. 1.

Видеодиагностика и оптическая томография микрочастиц осуществлялась с помощью четырех

калиброванных синхронизированных скоростных (180 фреймов/с) видеокамер высокого разрешения (2048 × 2048 пикселей), которые с разных ракурсов наблюдали за эволюцией микрочастиц через прозрачные стенки камеры “Zuflex”. Схема, реализующая такую томографию представлена на панели (b) к рис. 1. Подсветка микрочастиц осуществлялась с помощью лазера мощностью до 3 Вт, луч лазера был развернут в горизонтальный лист с регулируемой толщиной в пределах 1.5 ÷ 3.5 мм в области зрения видеокамер. Поскольку исследуемая система микрочастиц является оптически тонкой, такая система позволяет аккуратно определить положения частиц в пространстве в каждый момент времени.

Для определения положения изображения частиц на кадре с субпиксельной точностью применяется известный метод распознавания частиц в экспериментах с комплексной плазмой [15, 16], в основе которого лежит выделение группы (кластера) пикселей, которые соответствуют каждой отдельной микрочастице, при этом координаты микрочастицы вычисляются как средневзвешенные координаты, содержащихся в них пикселей. В качестве веса используется их уровень яркости.

Вычислить трехмерные координаты микрочастицы можно зная двухмерные координаты ее изображений на двух калиброванных видеокамерах (стереопаре). Для калибровки камер производилась съемка специального шаблона с нанесенной шахматной сеткой. Обработка полученных таким образом данных позволяет определить дисторсию объективов, внутренние параметры камер и их относительное положение [17, 18]. Вычисление трехмерных координат проводилось методом триангуляции [19] по двум камерам (1 и 3, см. рис. 1b), которые расположены под наибольшим углом друг относительно друга.

Для проведения триангуляции координат микрочастицы необходимо найти ее изображения на камерах 1 и 3. Рассмотрим пару калиброванных видеокамер. Из теории компьютерного стереозрения известно, что изображения некоторой точки в пространстве лежат на так называемых экиполярных линиях I^1 и I^2 для первой и второй камеры соответственно [19, 20]. Эти экиполярные линии можно найти, используя фундаментальную матрицу F размерностью 3×3 : $I^1 = F^T \mathbf{x}_2$ и $I^2 = F \mathbf{x}_1$, где \mathbf{x}_1 и \mathbf{x}_2 – координаты изображения точки на первой и второй камерах в однородном представлении ($\mathbf{x} = (x, y, 1)^T$). Рисунок 2 иллюстрирует поиск соответствий между изображениями микрочастиц на камерах 1 и 3. На камере 1 кружком обозначена микрочастица, изображение ко-

торой нужно найти на камере 3. Для этой цели построена экиполярная линия I_{c1}^3 и найдены изображения микрочастиц, которые находятся от этой линии в пределах допустимого отклонения. Если таких изображений больше одного, то необходимо воспользоваться информацией, предоставляемой оставшимися камерами. На камерах 2 и 4 ищутся изображения, которые находятся вблизи экиполярных линий I_{c1}^2 и I_{c1}^4 , и строятся экиполярные линии I_{c2}^3 и I_{c4}^3 , соответствующие этим изображениям. Искомое изображение на камере 3 лежит на пересечении трех экиполярных линий. Такая оптическая томография плазменного кристалла позволяет определить с высокой точностью координаты микрочастиц в каждый момент времени, т.е. описать систему в $(3 + 1)$ измерениях.

Результаты эксперимента. Некоторые результаты наблюдения за эволюцией двумерного плазменного кристалла представлены ниже. Важно отметить, что эксперимент проводился в аргоне при неизменных параметрах ВЧ разряда (давлении $p \simeq 0.7$ Па и $V_{pp} \simeq 65$ В). В горящий разряд вбрасывались микрочастицы размером 7.01 ± 0.08 мкм; в образовавшемся плазменном кристалле находилось примерно 3×10^3 частиц. Для q2D систем известно, что такие микрочастицы практически не оказывают никакого влияния на плазму разряда. За время наблюдения, которое составляло около 1 мин, были зафиксированы стадия кристалла, его нагрева и последующего плавления, а также стадия рекристаллизации расплава. Это первое наблюдение фазовых превращений в экспериментах с квазидвумерными системами при постоянных параметрах разряда. Плавление при таких условиях, означает, что система микрочастиц неустойчива по отношению к их вертикальным колебаниям. Более подробно механизм такой неустойчивости будет рассмотрен в отдельной публикации. Пока отметим лишь, что возможным механизмом плавления такой системы может являться неустойчивость связанных мод, в результате развития которой, энергия вертикальных колебаний микрочастиц эффективно передается в горизонтальные моды [24].

На рисунке 3 показаны комбинированные траектории ряда микрочастиц плазменного кристалла вплоть до стадии его плавления и последующей рекристаллизации, что соответствует эволюции системы в течение примерно одной минуты наблюдения (или около $N = 10^4$ видеокадров). Для того, чтобы различить движение микрочастиц в вертикальном конфайнменте (вдоль оси z) к z координате каждой частицы на каждом последующем кадре добавлялась фиксированная величина смещения ($\delta_z =$

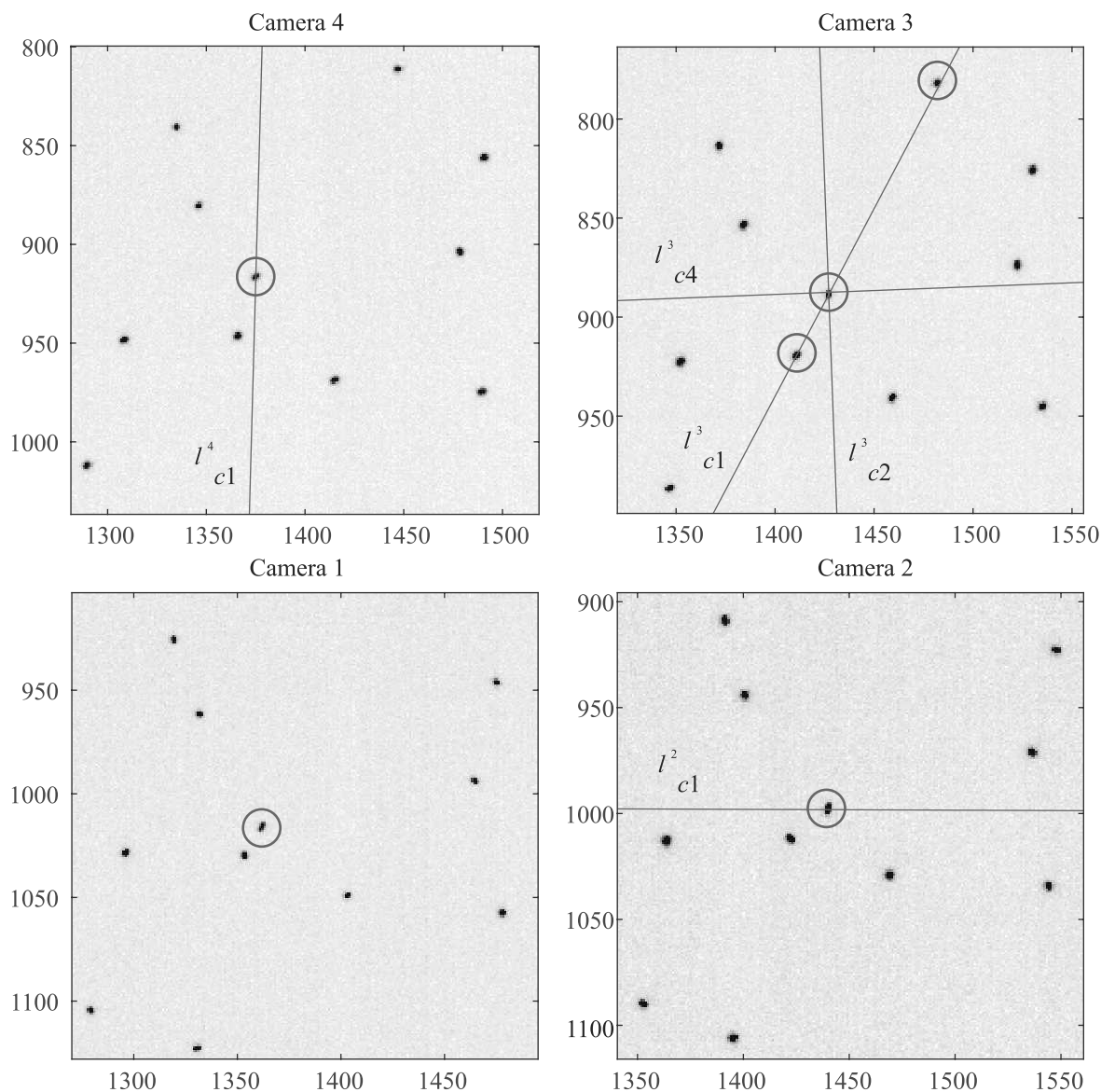


Рис. 2. Изображения части структуры пылевых частиц, полученные в определенный момент времени со всех четырех камер. На камере 1 кружком обозначено изображение анализируемой частицы. На остальных камерах кружками обозначены изображения, находящиеся достаточно близко от экиполярных линий l_{c1}^2, l_{c1}^3 и l_{c1}^4 . Линии l_{c2}^3 и l_{c4}^3 однозначно указывают на искомое изображение на камере 3

$= 0.5 \text{ мм}$ ($z(t_k) = z(t_k) + \delta_z(k-1)$, где k – номер кадра). Цвет результирующих комбинированных траекторий определяется величиной скорости частицы в горизонтальной плоскости ($x - y$) и меняется от синего к красному при ее увеличении. В определенный момент времени система плавится. Это наблюдается, когда поперечные колебания частиц приводят к разогреву системы в плоскости кристалла. В дальнейшем, как видно из этих траекторий и общего вида системы, микрочастицы снова кристаллизуются в плазменный кристалл. На стадии расплава боль-

шая часть микрочастиц покидает зону лазерного листа и их координаты не удастся определить. Этой стадии соответствует зазор в траекториях, который наблюдается при $z \approx 600 \text{ см}$. Этой стадии предшествует сильное увеличение поперечной скорости v_z , что видно по сильным осцилляциям на траекториях микрочастиц при $z \approx 500 \div 600 \text{ см}$. Дополнительно, на стадии перед плавлением системы происходит расслоение плазменного кристалла, которое наблюдается в его центре, при этом образуются два слоя с квадратной решеткой. Структура плазменно-

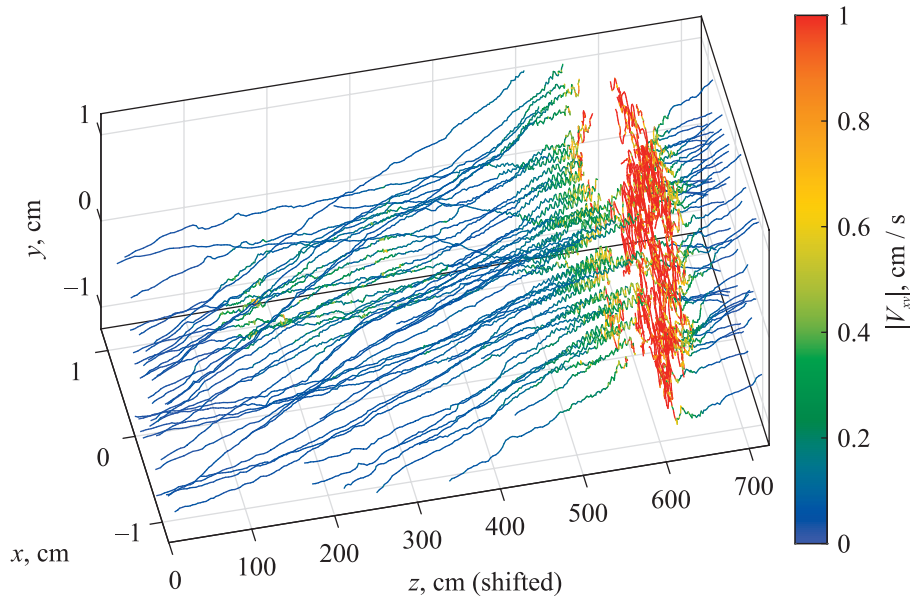


Рис. 3. (Цветной онлайн) Траектории ряда микрочастиц плазменного кристалла вплоть до стадии его плавления и последующей рекристаллизации, что соответствует эволюции системы в течение примерно одной минуты наблюдения (или примерно $N = 10^4$ видеокadres). Для того, чтобы различить движение микрочастиц в вертикальном конфинменте (вдоль оси z) к z координате частицы на каждом последующем кадре добавлялась фиксированная величина смещения ($\delta_z = 0.5$ мм ($z(t_k) = z(t_k) + \delta_z(k - 1)$, где k – номер кадра). Цвет результирующих комбинированных траекторий определяется величиной скорости частицы в горизонтальной плоскости ($x - y$) и меняется от синего к красному при ее увеличении. Это позволяет определить момент плавления плазменного кристалла, когда вертикальные (вдоль оси z) колебания частиц приводят к разогреву системы в плоскости монослоя. В дальнейшем, как видно из этих траекторий, система рекристаллизуется. На стадии расплава большая часть микрочастиц покидает зону лазерного листа и их координаты не удастся определить. Этой стадии соответствует зазор в траекториях, который наблюдается при $z \simeq 600$ см. Этой стадии предшествует сильное увеличение вертикальной скорости v_z , что видно по сильным осцилляциям на траекториях микрочастиц при $z \simeq 500 \div 600$ см

го кристалла в этот момент времени показана на рис. 4а. Указанное расслоение вызвано радиальной неоднородностью кристалла (плотность частиц максимальна в центре и монотонно спадает к периферии [14, 21, 22, 25]), при этом в центре системы реализуется условие перехода монослоя в двухслойную систему (поскольку там плотность частиц выше) в результате развития структурной неустойчивости (так называемый переход $1\Delta \rightarrow 2\Box$) [23, 26]. При этом монослой из заряженных микрочастиц с треугольной решеткой расщепляется на два слоя со сдвинутой друг относительно друга квадратной решеткой. В нашем случае периферия системы сохраняет треугольную симметрию и остается монослоем. Это специфика системы заряженных частиц, находящихся в горизонтальном параболическом конфинменте. На панели (b) у рисунка 4 показаны результаты моделирования трехмерной системы Юкавы, находящейся в горизонтальном удерживающем конфинменте с параметрами, близкими к экспериментальным. Так же, как и в эксперименте, наблюдается расслоение в центре системы на два слоя со сдвинутой квадрат-

ной решеткой, при этом периферия системы также остается монослоем с треугольной решеткой. Дополнительно, на вставках к панелям на рис. 4 показано, как выглядят рассмотренные системы с торца; на них хорошо виден эффект расслоения в центре плазменного кристалла.

Отметим, что совсем недавно в Phys. Rev. Lett. [27] была опубликована статья, в которой также наблюдалась квадратная решетка в q2D системе микрочастиц (при ослаблении вертикального конфинмента наблюдался переход $1\Delta \rightarrow 2\Box$ в центре первоначально планарного кристалла с треугольной решеткой). При этом ее авторы не учли свойства горизонтального конфинмента и привлекли для объяснения этого эффекта дополнительное взаимодействие между частицами, вызванное ионной фокусировкой на микрочастицах [8]. Выше мы показали, что в этом нет никакой необходимости: обычная кулоновская система (или система Юкавы), находящаяся в параболическом конфинменте, проявляет указанные свойства, а сдвинутая квадратная решетка, наблюдаемая в эксперименте, говорит в пользу слабого

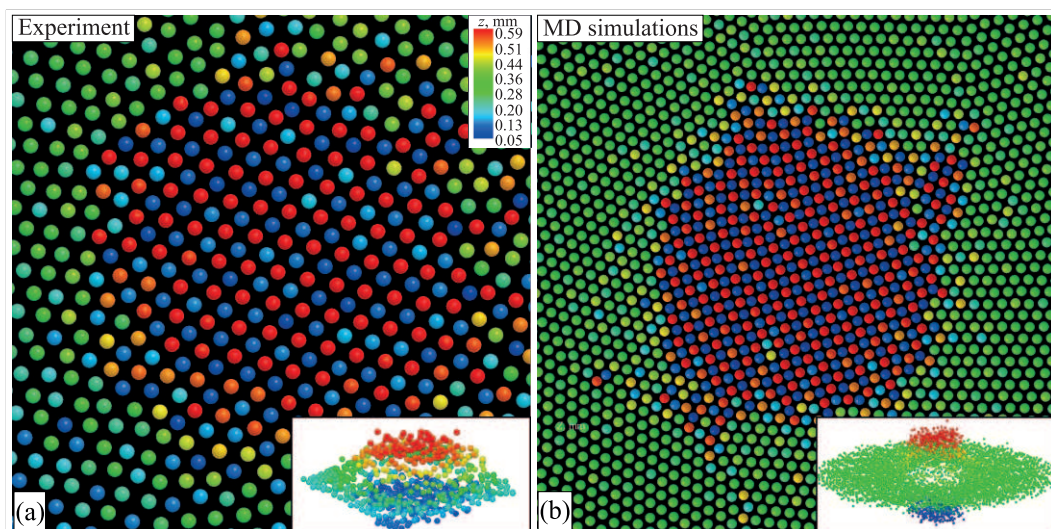


Рис. 4. (Цветной онлайн) Фрагмент плазменного кристалла, полученного в эксперименте, на стадии перед плавлением, когда наблюдается расслоение системы микрочастиц в центре кристалла (a). Такое расслоение вызвано радиальной неоднородностью кристалла (плотность частиц максимальна в центре и монотонно падает к периферии [14, 21, 22]), при этом в центре системы реализуется условие перехода монослоя в двухслойную систему в результате развития неустойчивости (так называемое buckling instability (BI) или переход $1\Delta \rightarrow 2\Box$, т.е. когда монослой из заряженных микрочастиц с треугольной решеткой расщепляется на два слоя с квадратной решеткой [23]). На панели (b) показаны результаты моделирования трехмерной системы Юкавы, находящейся в горизонтальном удерживающем конфайнменте, близком к параболическому ($U(r) \propto (r - r_c)^2$, где r_c – центр системы) с параметрами, близкими к экспериментальным. Так же, как и в эксперименте, наблюдается расслоение в центре системы на два слоя со сдвинутой квадратной решеткой, при этом периферия системы остается монослоем с треугольной решеткой. Цвет частиц определяется значением вертикальной координаты z и меняется от синего к красному при ее увеличении. Дополнительно, на вставках к панелям (a) и (b) показано, как выглядят рассмотренные системы с торца; на них эффект расслоения прекрасно виден

влияния ионной фокусировки на структуру кристалла (в противном случае при его расслоении на два слоя они бы находились друг над другом из-за вертикального спаривания частиц).

В настоящей работе впервые с помощью созданной нами системы оптической томографии экспериментально определена эволюция квазидвумерного плазменного кристалла в (3+1) измерениях (три пространственных координаты + время) вплоть до его плавления и рекристаллизации при неизменных параметрах ВЧ разряда. Это открывает новый этап исследований лабораторной комплексной плазме. Показано, что плавлению кристалла предшествует его расслоение в центре системы на два слоя со сдвинутой квадратной кристаллической решеткой, т.е. наблюдается структурная неустойчивость кристалла и переход $1\Delta \rightarrow 2\Box$. Данное расслоение вызвано наличием горизонтального параболического конфайнмента, который приводит к неоднородности кристалла в радиальном (от его центра) направлении, при этом, поскольку плотность микрочастиц максимальна в центре кристалла, то там и реализуется условие для развития данной неустойчивости, а часть кри-

сталла на периферии сохраняет планарную структуру с треугольной решеткой.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Государственное задание # 075-01056-22-00).

1. H. Thomas, G.E. Morfill, V. Demmel, J. Goree, B. Feuerbacher, and D. Mohlmann, *Phys. Rev. Lett.* **73**, 652 (1994).
2. J.H. Chu and L. I, *Phys. Rev. Lett.* **72**, 4009 (1994).
3. Y. Hayashi and K. Tachibana, *Jpn. J. Appl. Phys.: Part 2 -Letters* **33**, L904 (1994).
4. A. Melzer, T. Trottenberg, and A. Piel, *Phys. Lett. A* **191**, 301 (1994).
5. M. Horanyi, T. W. Hartquist, O. Havnes, D. A. Mendis, and G. E. Morfill, *Rev. Geophys.* **42**, RG4002 (2004).
6. R. P. Turco, O. B. Toon, R. C. Whitten, R. G. Keesee, and D. Hollenbach, *Planet. Space Sci.* **30**(11), 1147 (1982).
7. P. K. Shukla and B. Eliasson, *Rev. Mod. Phys.* **81**, 25 (2009).
8. V. Fortov and G. Morfill, *Complex and Dusty Plasmas: From Laboratory to Space*, CRC Press, Boca Raton, FL (2009).

9. В. Н. Рыжов, Е. Е. Тареева, Ю. Д. Фомин, Е. Н. Циок, УФН **187**, 921 (2017).
10. Б. А. Клумов, Письма ЖЭТФ **116**(10), 681 (2022).
11. В. А. Klumov, JETP Lett. **115**, 108 (2022).
12. С. А. Кнарек, У. Конопка, D.P. Mohr, P. Huber, А. М. Липаев, and Н. М. Thomas, Rev. Sci. Instrum. **92**(10), 103505 (2021).
13. В. Liu, K. Avinash, and J. Goree, Phys. Rev. E **69**, 036410 (2004).
14. В. А. Klumov, JETP Lett. **110**, 715 (2019).
15. Y. Ivanov and A. Melzer, Rev. Sci. Instrum. **78**, 033506 (2007).
16. Y. Feng, J. Goree, and B. Liu, Rev. Sci. Instrum. **78**, 053704 (2007).
17. K. M. Dawson-Howe and D. Vernon, Int. J. Imaging Syst. Techn. **5**, 1 (1994).
18. J. Salvi, X. Armangue, and J. Batlle, Pattern recognition **35**, 1617 (2002).
19. R. Hartley and A. Zisserman, *Multiple view geometry in computer vision*, Cambridge University Press, Cambridge (2003).
20. A. Melzer, M. Himpel, C. Killer, and M. Mulsow, J. Plasma Phys. **82**, 615820102 (2016).
21. D. H. E. Dubin, Phys. Rev. E. **55**(4), 4017 (1997).
22. H. Totsuji, C. Totsuji, and K. Tsuruta, Phys. Rev. E **64**, 066402 (2001).
23. D. H. E. Dubin, Phys. Rev. Lett. **71**(17), 2753 (1993).
24. Л. Кеделъ, В. М. Носенко, С. Жданов, А. В. Ивлев, И. Лаут, Е. В. Яковлев, Н. П. Крючков, П. В. Овчаров, А. М. Липаев, С. О. Юрченко, УФН **189**(10), 1070 (2019).
25. C. Durniak, D. Samsonov, N. P. Oxtoby, J. F. Ralph, and S. Zhdanov, IEEE Trans. Plasma Sci. **38**(9), 2412 (2010).
26. D. Podolsky, E. Shimshoni, G. Morigi, and S. Fishman, Phys. Rev. X **6**, 3 (2016).
27. S. Singh, P. Bandyopadhyay, K. Kumar, and A. Sen, Phys. Rev. Lett. **129**, 11 (2022).