

Эксперимент “Плазменный кристалл” на Международной космической станции

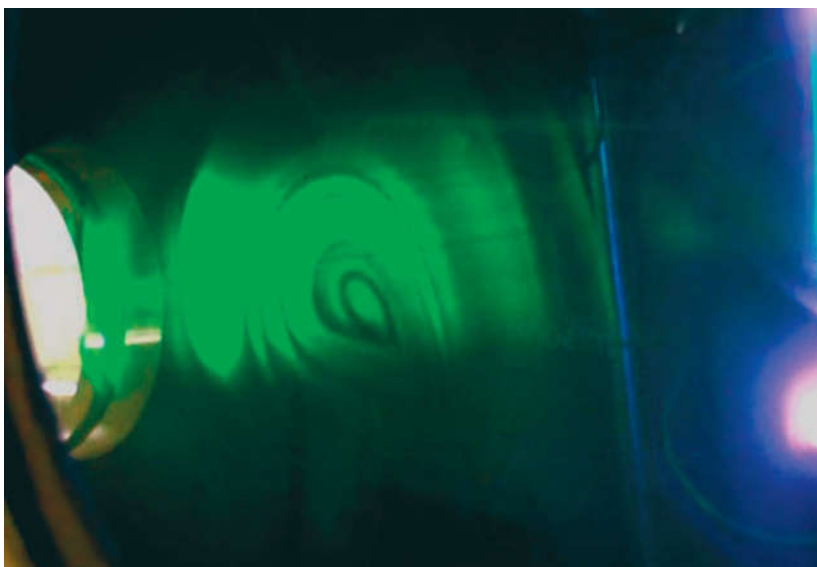
В.Е. ФОРТОВ,
академик,
Президент РАН,
директор Объединенного института высоких температур РАН

С середины 1990-х гг. произошел бурный рост исследований низко-температурной плазмы с макроскопическими частицами пылевой плазмы. Экспериментально она была получена в 1928 г. американским химиком, лауреатом Нобелевской премии 1932 г. И. Ленгмюром. В 1996 г. группой ученых Института высоких температур РАН впервые получен плазменно-пылевой кристалл в тлеющем разряде постоянного тока. Внимание специалистов к этой области физики плазмы вызвано открытием кристаллизации сильно заряженных пылевых частиц в плазме высокочастотного разряда и тлеющего разряда постоянного



тока. Повышенный интерес к изучению пылевой плазмы связан также с широким использованием технологий плазменного напыления и травления в микроэлектронике при производстве тонких пленок и наночастиц. В настоящее время бурно развивается одно из

направлений физики – исследование пылевой плазмы, включающей в себя вопросы физики плазмы, гидродинамики, кинетики фазовых переходов. Необходимо узнать больше о “поведении” плазмы, ведь большая часть вещества (99,9%) во Вселенной состоит из плазмы. Одновременно решаются и прикладные проблемы плазменных технологий, создания новых материалов. Большой объем полученной к настоящему времени новой научной информации о явлениях в пылевой плазме содержится в недавних обзорах и монографиях.



Плазменно-пылевое образование в наземной лаборатории.

ОСОБЕННОСТИ ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЫ

Свойства пылевой плазмы значительно многообразнее, чем обычной многокомпонентной плазмы, состоящей из заряженных частиц – электронов и ионов. Пылевые частицы микронного размера образуют центры рекомбинации плазменных электронов и ионов, а иногда они становятся источником электронов за счет фотоэмиссии, вторичной электронной эмиссии или термоэмиссии. В силу этого пылевая компонента может существенно влиять на ионизационное равновесие. Вследствие большого заряда, который приобретают пылевые частицы в плазме, их потенциальная энергия взаимодействия велика, поэтому неидеальность структуры пылевых частиц (отношение потенциальной энергии кулоновского взаимодействия между соседними частицами

к их кинетической температуре) создается намного легче, чем электрон-ионной подсистемы. Заряженные частицы, взаимодействуя друг с другом и с электрическими полями в плазме, при определенных условиях могут выстраиваться в пространстве, образуя трехмерные пылевые структуры (плазменные кристаллы), аналогичные решетчатой структуре кристаллических материалов.

Пылевая плазма – эффективный инструмент для исследования фундаментальных свойств сильно неидеальной плазмы, когда потенциальная энергия взаимодействия между частицами сопоставима с их кинетической энергией или ее превышает. Это обусловлено такими особенностями, как относительная простота получения, наблюдение и управление параметрами, малые времена релаксации к равновесию и отклик

на внешние возмущения. Измеряется структура плазмы прямым определением функции распределения пылевых частиц по координатам и импульсам, позволяя исследовать многие процессы на кинетическом уровне, что помогает понять явление в других системах, где проведение кинетических измерений невозможно.

Гравитация является критическим фактором в формировании плазменно-пылевых образований в наземных лабораторных исследованиях. В большинстве случаев в экспериментах реально достижимы достаточно тонкие двух с половиной мерные ($2^{1/2}D$) или двумерные ($2D$) пылевые структуры. Это вызвано тем, что действующая на пылевую частицу сила тяжести может быть скомпенсирована только в узких областях приэлектродного слоя пространственного заряда в высокочастотном разряде или страты в разряде постоянного тока за счет большой напряженности имеющегося там электрического поля. В условиях микрогравитации для достижения левитации пылевых частиц нет необходимости в создании сильного электри-

ческого поля. На Земле невозможно изучить поведение массивных пылевых частиц большого размера и структур, образующихся в результате ультрафиолетового облучения. Поэтому сразу же после экспериментального обнаружения "плазменного кристалла" ставился вопрос о необходимости проведения исследований в условиях микрогравитации.

В 1998–2000 гг. в Объединенном институте высоких температур РАН совместно с РКК "Энергия" им. С.П. Королёва был выполнен ряд пио-

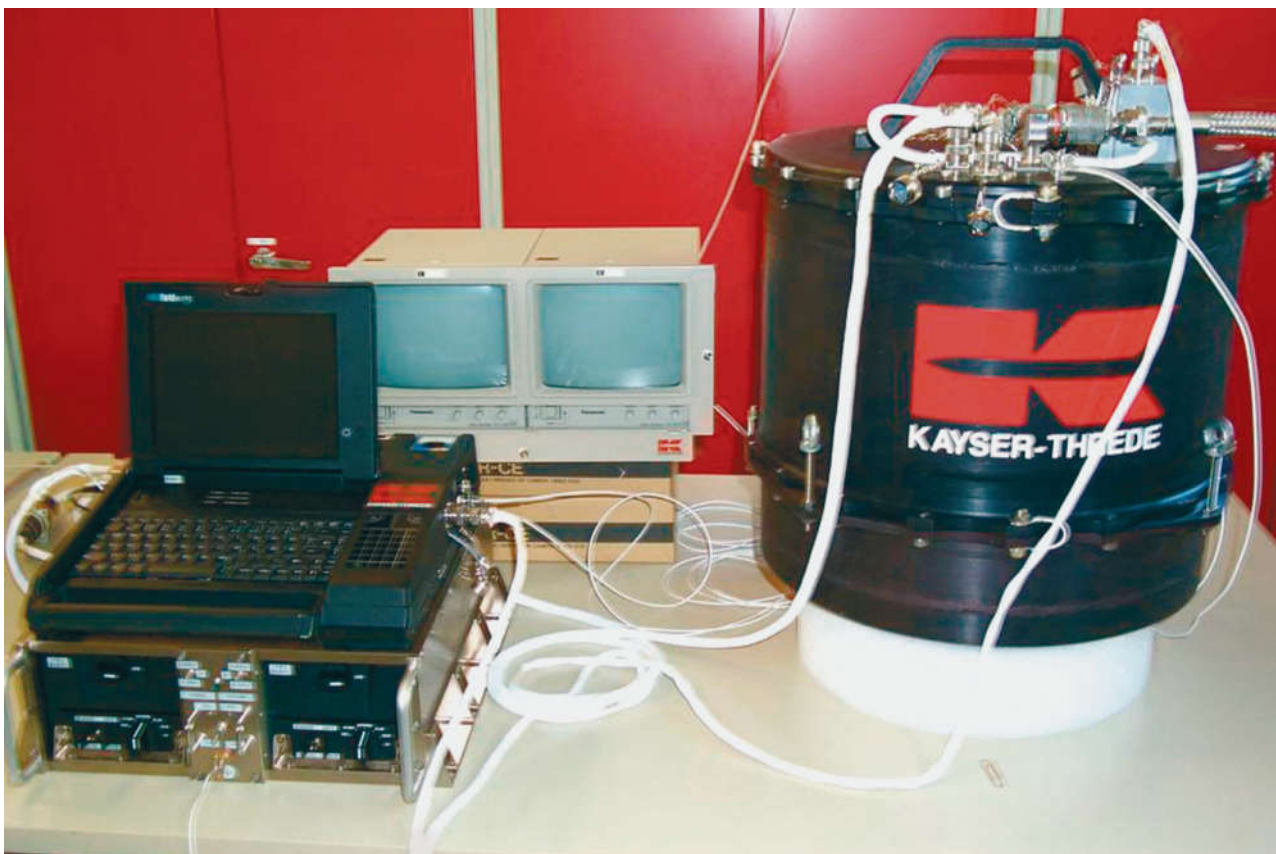
Аппаратура "ПК-3" эксперимента "Плазменный кристалл".

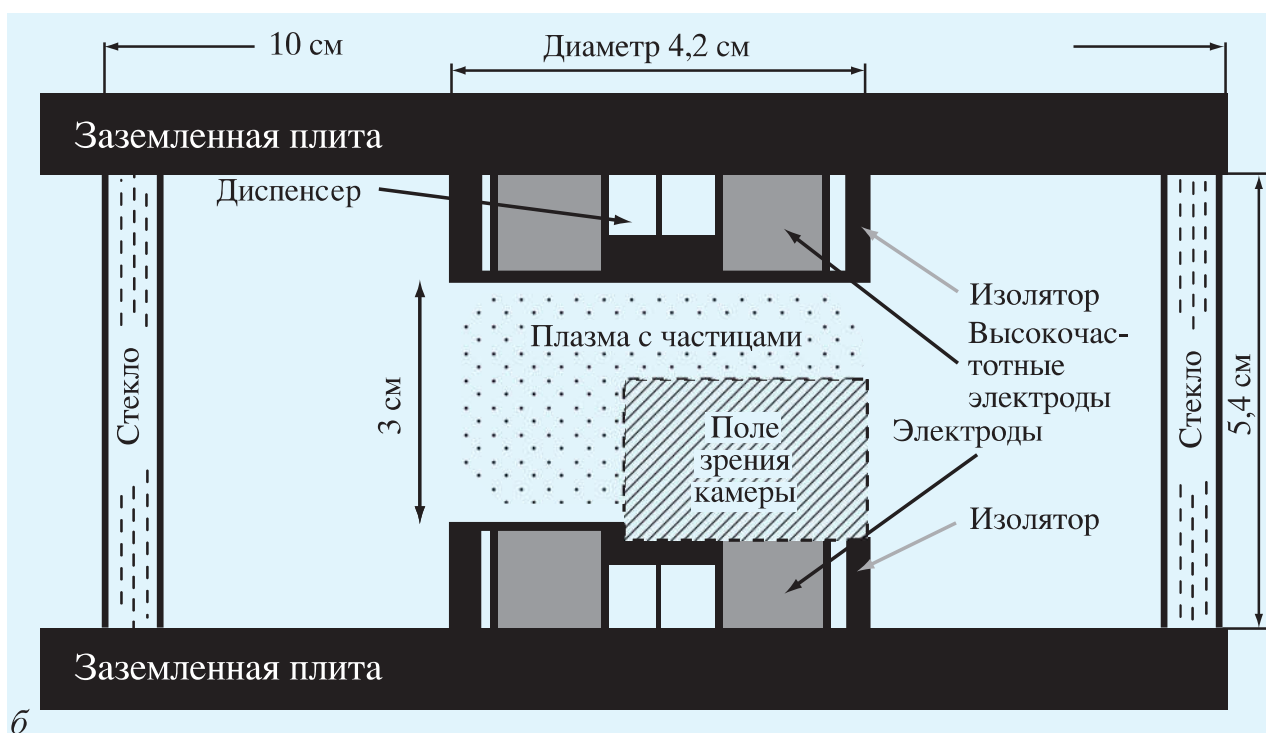
нерских экспериментов по изучению пылевой плазмы в условиях микрогравитации на борту российского орбитального комплекса "Мир": получены данные о пылевой плазме тлеющего разряда постоянного тока и индуцированной ультрафиолетовым излучением Солнца. В 1997–1998 гг. в Институте внеземной физики Общества М. Планка (Германия) исследована пылевая плазма высокочастотного емкостного разряда в условиях микрогравитации (ускорение 10^{-2} g) в параболических полетах на самолете и в двух ракетных экспериментах (10^{-6} g в течение 6 мин). В начале 1998 г. в соответствии с программой научных исследований

Росавиакосмоса принято решение о проведении совместного российско-немецкого эксперимента "Плазменный кристалл" на борту российского сегмента Международной космической станции. Постановка и подготовка эксперимента осуществлялась Институтом теплофизики экстремальных состояний Объединенного института высоких температур РАН и Институтом внеземной физики Общества М. Планка при активном участии РКК "Энергия" им. С.П. Королёва.

АППАРАТУРА
"ПЛАЗМЕННЫЙ КРИСТАЛЛ-3"

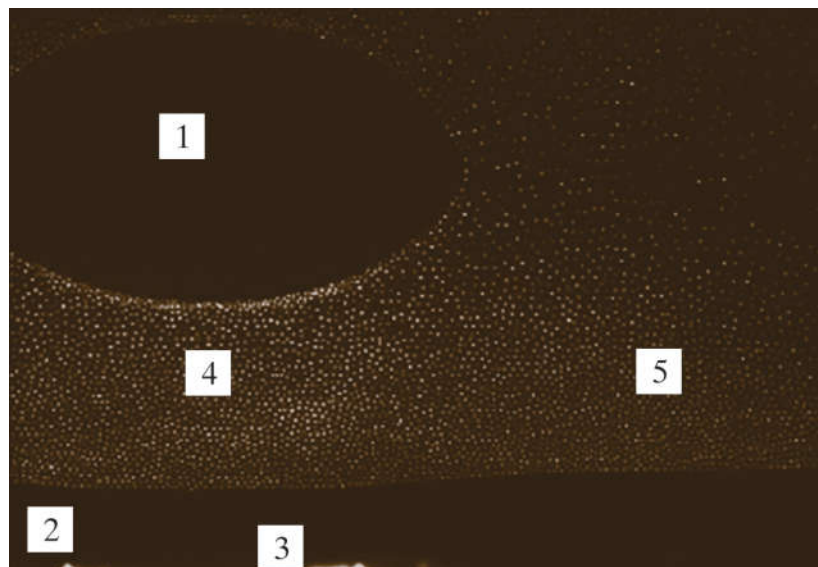
Аппаратура "Плазменный кристалл-3" ("ПК-3") состоит из эксперимен-





Вакуумная плазменная камера: а) общий вид, б) схема внутреннего устройства.

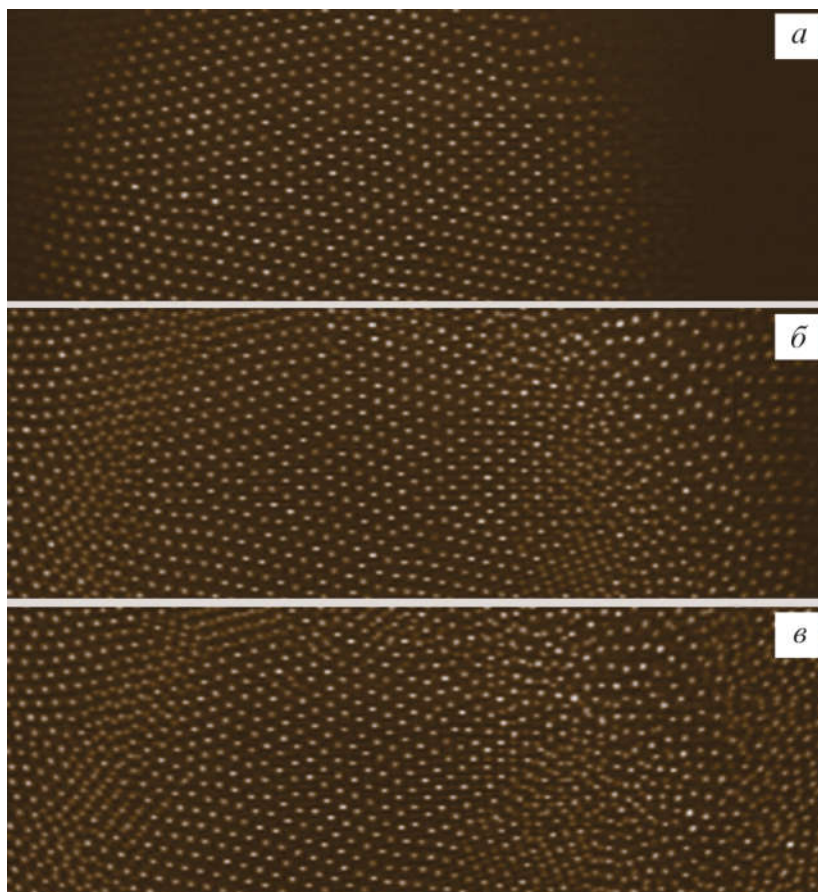
Видеоизображение вертикального сечения плазменно-пылевой структуры с макрочастицами диаметром 6,8 мкм: 1 – void (зона, свободная от отрицательно заряженных пылевых частиц); 2 – зона без пылевых частиц (приэлектродный двойной электрический слой); 3 – электрод; 4 – область вокруг вертикальной оси плазменной камеры; 5 – зона вихревого движения заряженных макрочастиц диаметром 6,8 мкм.



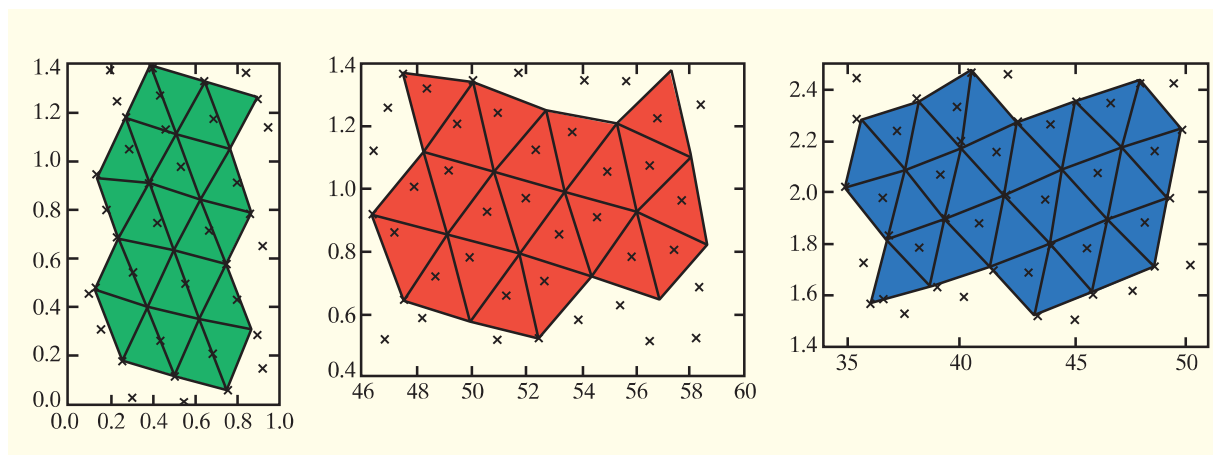
тального блока, размещенного внутри герметичного закрытого контейнера, компьютера "Телесайенс" с видеоманитофоном. Основным элементом "ПК-3" – вакуумная плазменная камера, состоящая из двух стальных квадратных плит и стеклянной вставки квадратного сечения. На одной из плит предусмотрен порт для подключения системы вакуумирования камеры, наполнения ее газом и поддержания заданного давления. На плитах укреплены дисковые электроды, создающие радиочастотный разряд, в каждом есть устрой-

ство инъекции пылевых частиц в плазму. На электроды подается переменное напряжение высокой частоты – 13,56 МГц. Величиной напряжения можно управлять в широких пределах и тем самым

мощностью, вкладываемой в разряд. В ходе экспериментов напряжения, прикладываемые к высокочастотным электродам, составляли от 10 до 50 В. Для того, чтобы создать внутри плазменной



Горизонтальные сечения структуры трех нижних слоев плазменно-пылевого образования с частицами диаметром 6,8 мкм при давлении аргона 50 Па, восстановленные по данным сканирования: а) самый нижний слой; б, в) второй и третий слой в центральной части образования.



Положение пылевых частиц в трех горизонтальных слоях: слева – объемно-центрированная решетка (bcc), в центре – гранецентрированная решетка (fcc), справа – структура с гексагональной плотной упаковкой (hcp).

камеры предварительно вакуум, используется открытый космос, турбомолекулярный насос обеспечивает в ней высокий вакуум. Эксперименты выполнялись при рабочем давлении аргона от 10 до 100 Па. Запас аргона хранится в баллоне емкостью 1 л.

Для наблюдения плазменно-пылевых структур в вакуумной камере установлено две ПЗС-камеры с объективами и два полупроводниковых лазера. Поле зрения одной камеры составляет $2,8 \times 2,1$ см, второй – одну треть от поля зрения первой и расположено в левой верхней части ее поля зрения. Лазерный луч сформирован в плоский пучок толщиной 150 мкм и высотой около 25 мм. С помощью полупроводникового лазера освещается срез пылевой структуры. Второй лазер установ-

лен симметрично первому на случай, если основной выйдет из строя. Вся эта оптическая система смонтирована на подвижной плите, которую можно перемещать вдоль оси ПЗС-камер с помощью шагового двигателя, таким образом сканируя плазменно-пылевую структуру. Если скорость сканирования достаточно низкая, а плазменно-пылевая структура стабильна, то можно восстановить трехмерную картину пылевого облака.

Управление параметрами эксперимента и регистрация видео и цифровой информации, полученной в ходе эксперимента, обеспечивалось компьютером “Телесайенс”.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

3 марта 2001 г. космонавты С.К. Крикалёв и

Ю.И. Гидзенко выполнили первые эксперименты на аппаратуре “ПК-3” в условиях микрогравитации. До 2005 г. проведено 13 экспериментов в соответствии с программой полета основных экспедиций на МКС, они контролировались их постановщиками, находившимися в Центре управления полетами во время сеансов радиосвязи. Некоторые велись с Земли в режиме реального времени, когда был возможен сброс видеoinформации в ЦУП.

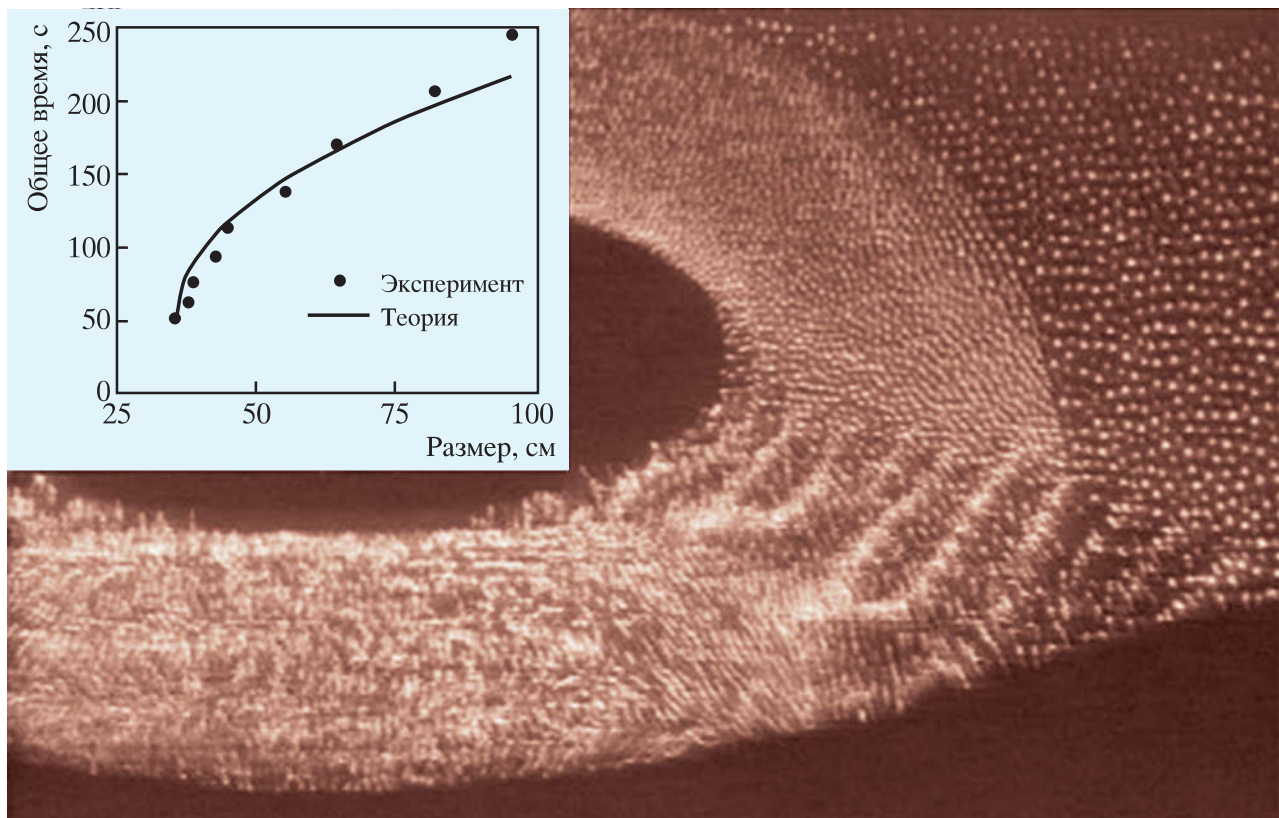
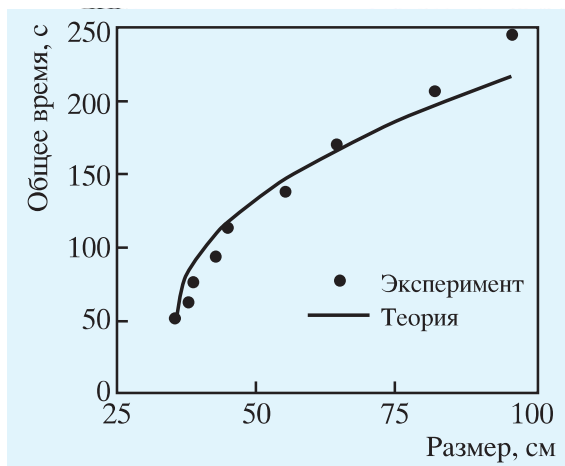
Коснемся некоторых результатов экспериментов. Характерная особенность, присущая многим наблюдавшимся в центральной части сечения плазменно-пылевой структуры, это образование войда – зоны, свободной от отрицательно заряженных пылевых частиц. Размеры войда зависят от вводимой в

разряд мощности, давления нейтрального газа и размера макрочастиц. В области войда действуют электростатическая и термофоретическая силы, сила ионного увлечения (ионный дрег). С увеличением вводимой мощности размеры войда увеличиваются, с ростом давления также наблюдается тенденция возрастания размера войда. Свободная от пылевых частиц другая зона – приэлектродный двойной электрический слой. Напряженность электрического поля в приэлектродном слое максимальна у электро-

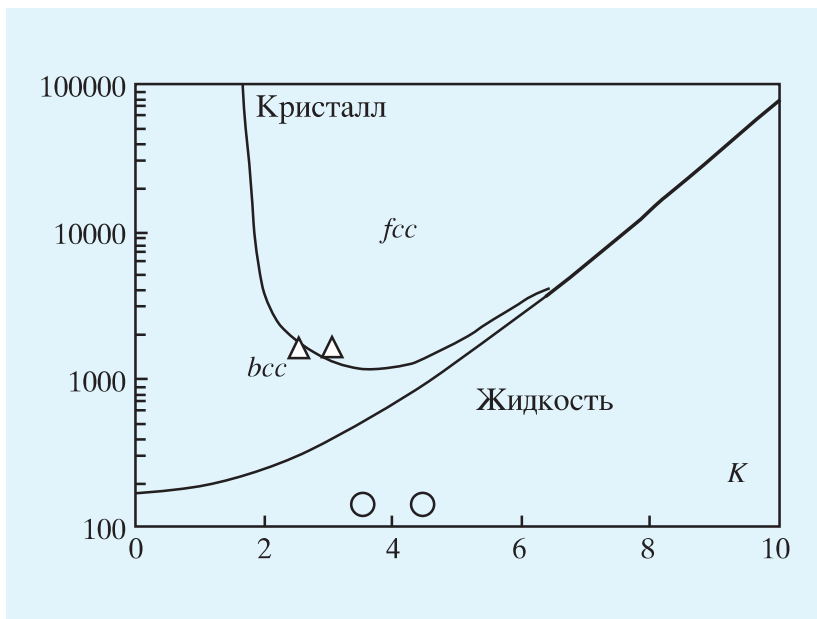
да. Начиная с некоторого значения напряженности поля, создаются условия для формирования плазменно-пылевой структуры. В условиях микрогравитации пылевые частицы заполняют весь межэлектродный плазменный промежуток, за исключением области войда и приэлектродного двойного электрического слоя. В наземной лаборатории пылевая компонента заполняет всего лишь несколько слоев вблизи нижнего электрода. В области вокруг вертикальной оси плазменной камеры наблюдается формирова-

ние хорошо упорядоченной плазменно-пылевой структуры – трехмерного плазменного кристалла. В периферийной зоне происходят вихревые движения заряженных частиц, отличающиеся от вихрей в наземной лаборатории.

В случае стабильной плазменно-пылевой структуры при определенной скорости ее сканирования возможно восстановление горизонтальных сечений пылевого облака. Анализ полученных сечений выявил возникновение объемно-центрированной (всс) и гранецент-



Видеоизображение плазменно-пылевого образования размером 28×21 мм для смеси частиц диаметром 3,4 и 6,8 мкм в эксперименте с возбуждением пылеакустических колебаний частотой 22 Гц при давлении аргона 12 Па. Во врезке даны экспериментальные (точки) и теоретические значения.



Фазовая диаграмма дебаевской системы, полученная с помощью численного моделирования. K – структурный параметр (параметр решетки) – отношение расстояния между частицами к длине экранирования.

рированной (fcc) решеток, а также структуры с гексагональной плотной упаковкой (hcp). В условиях микрогравитации впервые экспериментально подтверждены теоретические расчеты и обнаружено формирование структур с гранцентрированной (fcc) и с объемно-центрированной (bcc) решетками. Ранее в лабораторных экспериментах на Земле в пылевой плазме высокочастотного разряда были обнаружены только fcc и hcp-структуры, что не соответствовало расчетам методом молекулярной динамики, согласно которым в случае, когда параметр неидеальности превышает единицу, то существуют плазменно-пылевые структуры (fcc) и (bcc). В условиях микрогравитации впервые экспериментально подтверждены теорети-

ческие расчеты и обнаружено формирование структур с гранцентрированной (fcc) и с объемно-центрированной (bcc) решетками.

В эксперименте с возбуждением пылеакустических колебаний, подаваемых на электроды плазменной камеры, высокочастотное напряжение модулировалось напряжением низкой частоты, которая изменялась в диапазоне от 0,5 до 100 Гц. Варьирование частоты позволяет получить зависимость длины волны от частоты, то есть дисперсионную зависимость, и провести сопоставление результатов экспериментов с теорией пылезвуковых волн. Такие эксперименты имеют диагностическую направленность, так как согласование с теорией позволяет сделать заключение о параметрах

плазменно-пылевой среды – радиус экранирования, заряд пылевой частицы.

K одной из основных сил, воздействующих на пылевые частицы в плазме, относится сила ионного увлечения, обусловленная передачей импульса от движущихся ионов заряженным пылевым частицам. Эксперименты в условиях микрогравитации показали, что она ответственна за формирование свободной от пылевых частиц зоны в центре плазменной камеры. Эта область возникает при действии на пылевые частицы силы ионного увлечения, превышающие силу электрического поля вблизи центра разряда, в результате чего частицы выталкиваются из центральной зоны. Эксперименты позволили пересмотреть теорети-

ческую модель расчета силы ионного увлечения и добиться количественного согласия с экспериментальными данными. Установлено, что при уменьшении концентрации ионов и электронов и снижении амплитуды высокочастотного напряжения пылевые частицы заполняют весь объем межэлектродного пространства плазменной камеры. В этом случае появляется возможность исследовать большие квазиизотропные плазменно-пылевые образования, что невозможно в условиях гравитации.

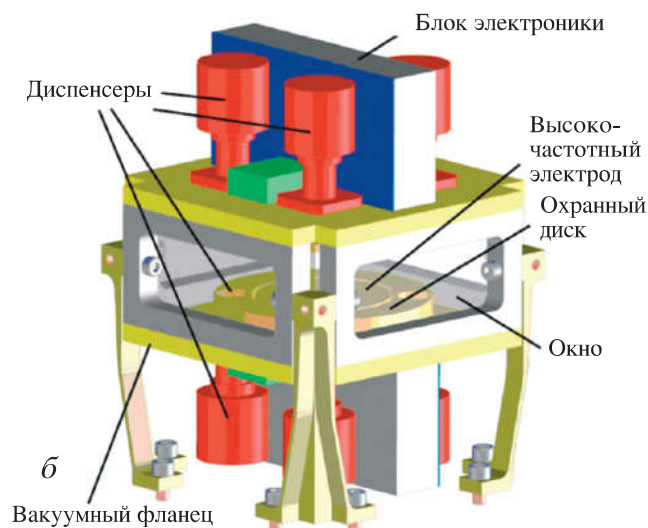
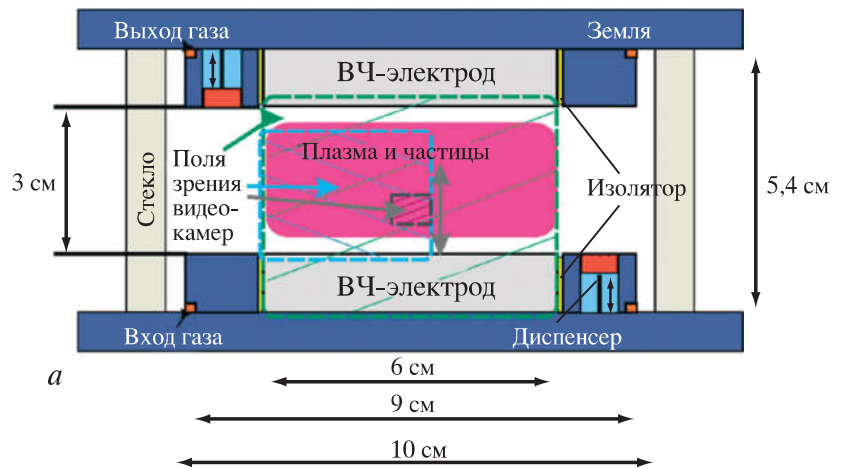
Приведем краткие итоги работы на аппаратуре "ПК-3":

- впервые получены сведения о формировании трехмерных упорядоченных структур сильно заряженных пылевых частиц с различной степенью анизотропии;

- обнаружены структуры с гранецентрированной решеткой (fcc), объемно-центрированной (bcc) и гексагональной плотной упаковкой (hcp), предсказываемая теорией, в частности, bcc-фаза впервые наблюдалась экспериментально;

- продемонстрирована возможность изучения низкочастотных волн сжатия пылевой компоненты и использования возбуждаемых волн для диагностики плазмы;

- открыта низкочастотная неустойчивость



Вакуумная плазменная камера "ПК-3 Плюс": а) схема плазменной камеры; б) трехмерное изображение с диспенсерами.

границы плазма – пылевая плазма;

- впервые наблюдалось формирование нелинейной волны плотности пылевой компоненты;

- детально изучена плазменная зона, формирующаяся в ряде экспериментов, в результате получена важная информация о силах, действующих в пылевой плазме, что привело к пересмот-

ру теории силы ионного увлечения;

- получены новые данные о транспортных свойствах пылевой плазмы, коагуляции пылевых частиц, формировании пограничных зон и росте новых частиц;

- выявлена аномальная кристаллизация трехмерной пылевой подсистемы при ступенчатом уменьшении давления.



Салижан Шарипов и Лерой Чиао (США) выполняют 12-ю сессию эксперимента "Плазменный кристалл" на аппаратуре "ПК-3 Плюс" на борту МКС. Февраль 2005 г.

АППАРАТУРА "ПЛАЗМЕННЫЙ КРИСТАЛЛ-3 ПЛЮС"

Опыт работы на установке "ПК-3" стал основой для создания значительно усовершенствованной аппаратуры "ПК-3 Плюс". В ней используется хорошо сбалансированная электродная система, обеспечивающая равномерное распределение плазмы с идентичными слоями объемного заряда на обоих электродах. Это необходимо для получения равномерного распределения микро-

стиц в условиях микрогравитации. Плазменная камера состоит из стеклянной кюветы кубической формы с квадратным сечением. Верхний и нижний фланцы представляют собой металлические плиты, в их состав входят высокочастотные электроды (цилиндрические пластины из алюминия диаметром 6 см), находящиеся на расстоянии 3 см, электрические и вакуумные соединения. Электроды окружены заземленными экранами шириной 1,5 см, включая три дис-

пенсера микрочастиц на каждой стороне. Оптическая система регистрации пылевых частиц состоит из лазерного диода с цилиндрической оптикой для формирования лазерного "ножа", перпендикулярного поверхности электрода, и видеокамер, фиксирующих с различным разрешением отраженный под 90° свет. Камеры и лазеры смонтированы на горизонтальной подвижной плите, обеспечивающей заданную глубину сканирования пылевой плазмы.



Видеоизображения, полученные камерой большого увеличения в эксперименте по структурному фазовому переходу (давление аргона – 10 Па, частицы диаметром 6,8 мкм, частота внешнего поля – 100 Гц, концентрация пылевой компоненты – $3 \times 10^4 \text{ см}^{-3}$, температура ионов – 0,03 эВ). В плазменно-пылевой системе увеличивается упорядоченность, формируется цепочечная структура.

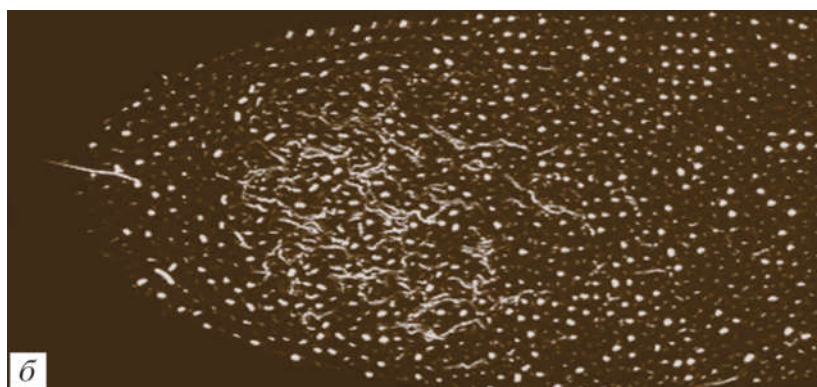
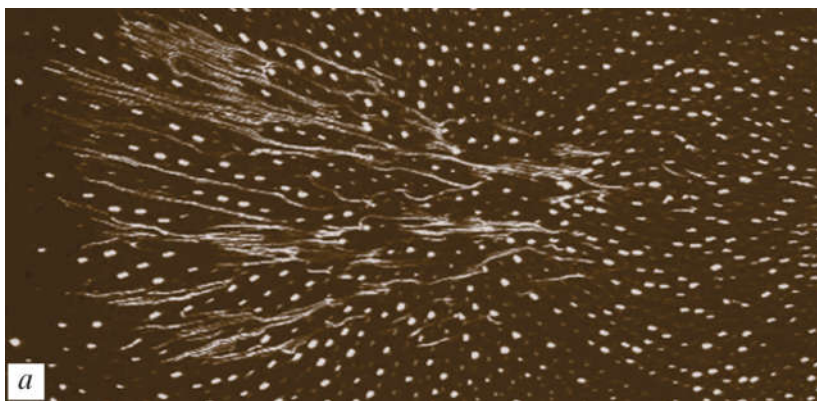
ИССЛЕДОВАНИЯ НА УСТАНОВКЕ “ПК-3 ПЛЮС”

Использование установки “ПК-3 Плюс” позволяет получить новые сведения о свойствах пылевой плазмы. Как уже отмечалось, область, свободная от микрочастиц, образующаяся в центре разряда, препятствует получению однородной и изотропной плазменно-пылевой системы. В “ПК-3 Плюс” за-

крытие центральной зоны можно выполнить тремя способами: уменьшением мощности высокочастотного разряда до минимально возможных значений; использованием симметричного газового потока; воздействием внешним низкочастотным электрическим полем. Последний способ был использован для осуществления фазового перехода от изотропной жидкостной плазменно-

пылевой системы к электрореологической плазме.

Взаимодействие между заряженными макрочастицами в пылевой плазме, индуцированное внешним переменным электрическим полем, идентично межмолекулярному взаимодействию в электрореологических (дипольных) жидкостях. Реологические свойства таких жидкостей могут изменять-



Проникновение частиц диаметром 3,4 мкм в структуру из частиц диаметром 9 мкм в плазме аргона: а) давление – 30 Па, видно формирование проходов и цепочек; б) давление – 10 Па, плазменно-пылевая система под действием низкочастотного поля; проходы и цепочки не формируются.

ся под воздействием внешнего электрического поля: в слабых полях они представляют собой “нормальные” жидкости, в полях выше критического предела ведут себя как твердые тела или как очень вязкие жидкости. Используя низкочастотные поля, аналогичный физический процесс может быть изучен на кинетическом уровне. В исследованиях к электродам, находящимся под воздействием высокочастотного напряжения, было приложено синусоидальное напряжение частотой 100 Гц с

амплитудой 13,3–32,8 В с шагом 2,2 В. При малых полях заряженные пылевые частицы образуют неидеальную плазменно-пылевую систему в жидкостной фазе с ближним порядком. Когда оно возрастает, достигая порогового значения, происходит переориентация частиц, увеличивается их упорядоченность и формируются цепочечные структуры. В этом случае ионы мгновенно реагируют на изменение поля, а пылевые частицы не реагируют. Как показывает анализ, заряженные частицы взаимодействуют

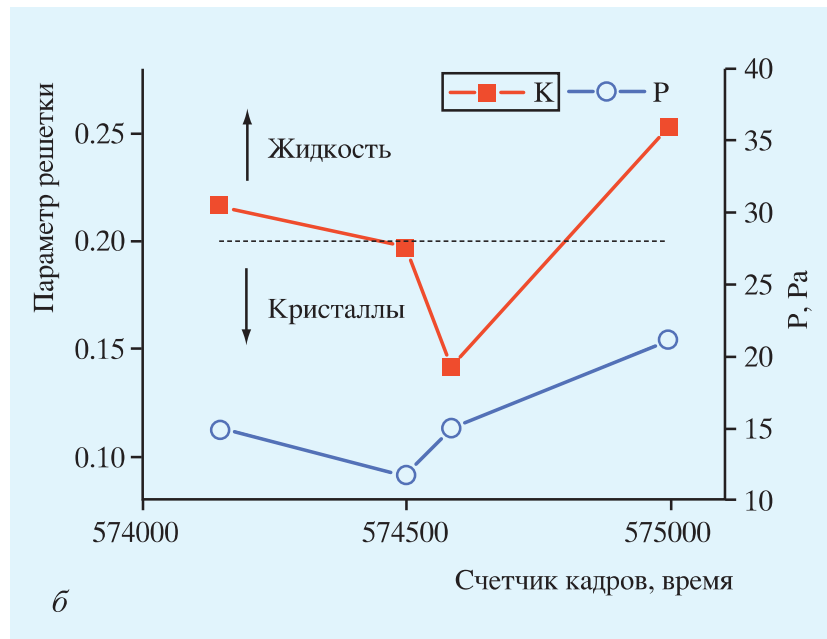
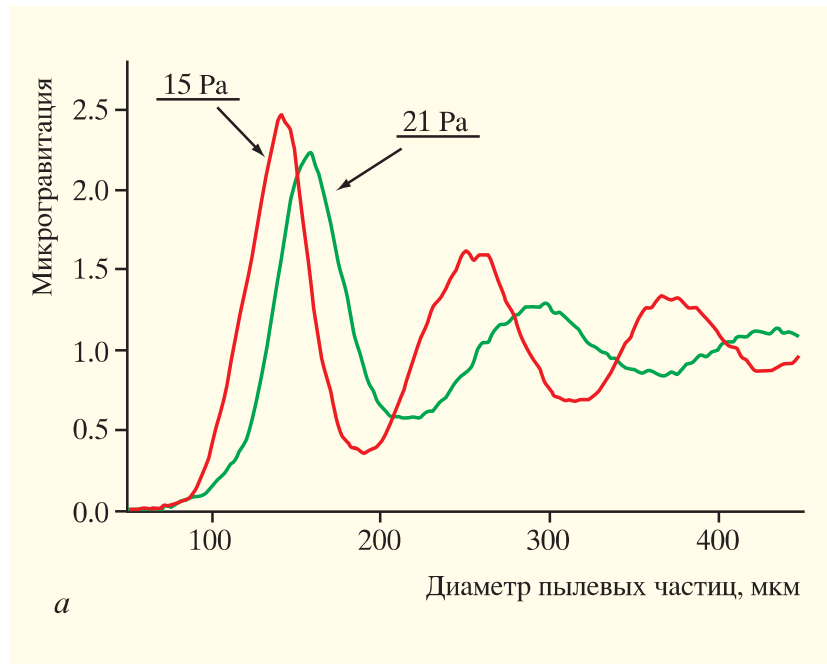
между собой идентично взаимодействию диполей в обычных электрореологических жидкостях с дипольным моментом. Таким способом можно изменять взаимодействие между частицами и величину скорости дрейфа ионов при варьировании амплитуды внешнего низкочастотного напряжения.

Другое интересное явление – взаимопроникновение двух облаков частиц различного размера. В этих экспериментах первоначально формируется структура, состоящая из частиц диаметром 14,9; 9,19 или 6,8 мкм. Затем в сформированную структуру с левой стороны камеры инжектируются частицы размером 3,4 мкм. Здесь используется удачное расположение диспенсера – его ось находится в плоскости, освещаемой лазерным “ножом”. Частицы размером 3,4 мкм проникают в стабильную структуру больших частиц и движутся к центру плазменной камеры. Во внешней зоне, когда скорость проникающих частиц достаточно велика, наблюдается формирование проходов и цепочек. Малые частицы идентифицируются в виде длинных треков, большие частицы отображаются как точки. Большие частицы также структурируются в цепочки и образуют проходы. Такое наблюдает-

Графики структурного фазового перехода в эксперименте без воздействия внешнего поля: а) парные корреляционные функции, б) изменение степени упорядоченности плазменно-пылевой структуры на границе кристаллического и жидкостного состояний.

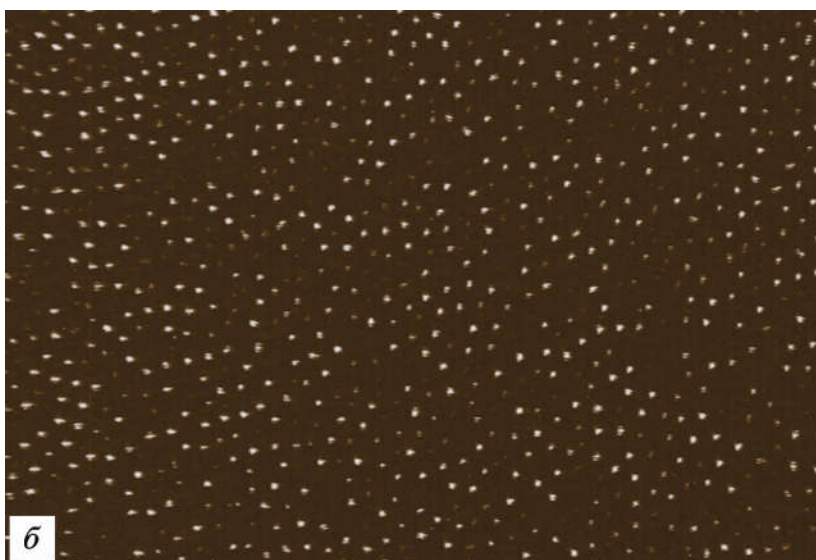
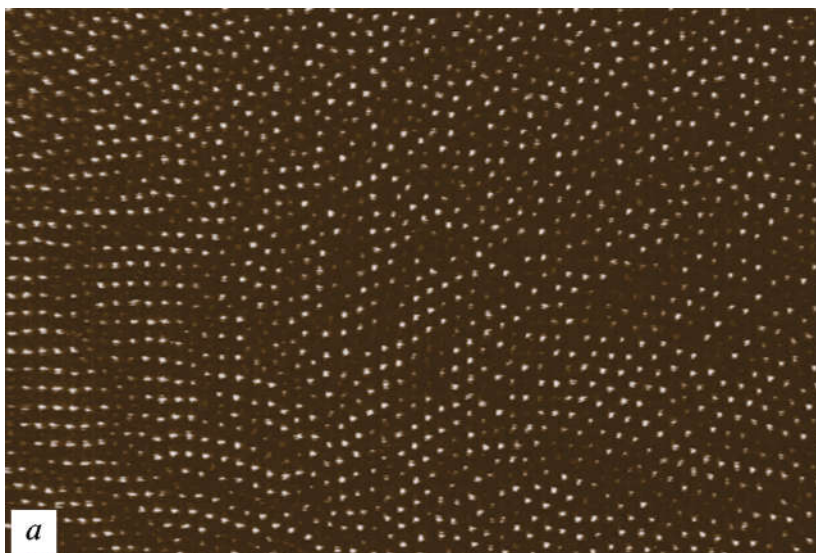
ся в природе, когда два потока частиц движутся навстречу друг другу под действием некоторой силы. Этот процесс представляет собой неравновесный переход, зависящий от особенностей и динамики взаимодействия частиц, он представляет интерес для различных областей физики. Эксперименты с пылевой плазмой в условиях микрогравитации позволяют проследить движение отдельной частицы и исследовать динамику перехода. Выполнялись также эксперименты, когда плазменно-пылевая система из больших частиц находилась в состоянии электрореологической плазмы под воздействием низкочастотного электрического поля частотой 255 Гц.

На установке “ПК-3 Плюс” исследовался переход жидкость – кристалл в большой (более миллиона сильнозаряженных пылевых частиц) трехмерной плазменно-пылевой системе. Первоначально формирова-



лась структура из частиц диаметром 1,55 мкм при давлении аргона 30 Па, затем оно снижалось до 10 Па и далее увеличивалось до 22 Па. Время цикла составляло 5 мин. В повторном аналогичном цикле изменения давления проводилось сканирование пылевой структуры на глубину 4,8 мм при скорости пе-

ремещения платформы с камерами 0,6 мм/с. Помимо этого, два других цикла изменения давления были выполнены при наложении внешнего низкочастотного поля частотой 255 Гц и амплитудой 19,8 В. Степень упорядоченности плазменно-пылевой системы свидетельствует о переходе от плаз-



Видеоизображения, иллюстрирующие плавление плазменного кристалла с ростом давления при наложенном внешнем низкочастотном поле. Частицы диаметром 1,55 мкм; а) давление аргона – 11,3 Па, б) давление аргона – 21 Па.

менного кристалла к плазменной жидкости. Из полученных данных следует, что при снижении давления до 10 Па плазменно-пылевая система кристаллизуется. Поведение большой трехмерной плазменно-пылевой системы противоположно двумерной. Аналогичное изменение степени упорядоченно-

сти наблюдается и в случае воздействия внешнего низкочастотного поля. Значения межчастичного расстояния и плотности пылевой компоненты соответствуют эксперименту без воздействия внешнего поля.

В заключение отметим, что мы кратко отобрали лишь некоторые результаты исследования

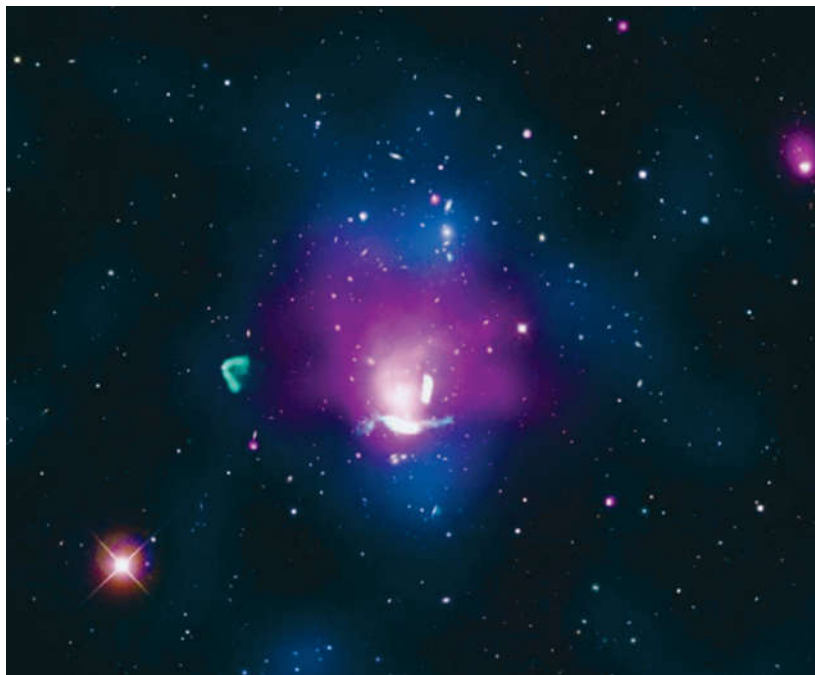
физики пылевой плазмы в условиях микрогравитации, полученные до 2013 г. на уникальной установке “ПК-3 Плюс”. Эксперименты выполнялись по следующим направлениям:

- упорядоченные структуры в трехмерной пылевой плазме в слабом электрическом поле;
- поиск фазовых переходов кристалл – жидкость – газ в трехмерной изотропной плазменно-пылевой системе;
- структурные фазовые переходы в трехмерной пылевой плазме при внешних воздействиях; линейные и нелинейные волны в трехмерной пылевой плазме, в том числе ударные волны;
- плазменно-пылевые неустойчивости.

В настоящее время эксперимент “Плазменный кристалл” продолжается на МКС с использованием новой научной аппаратуры “ПК-4”, который был начат в 2015 г.

Радиоисточник снова заработал

В течение нескольких миллионов лет межзвездное облако, находящееся в системе двух сталкивающихся групп галактик Abell 1033 (расстояние 1,6 млрд св. лет от нас в созвездии Малого Льва), испускало электроны высоких энергий на радиочастотах, снижало свою активность из-за постоянной потери энергии. Как предполагают ученые, в прошлом близко к центру Abell 1033 существовала активная черная дыра. Потоки электронов высоких энергий заполнили область вокруг протяженностью сотни тысяч световых лет, поэтому эта область очень сильно излучает в радиодиапазоне. Это явление, названное “радио Феникс”, возникло, когда два скопления галактик “врезались” друг в друга, в результате чего сквозь облако проходили мощные сверхзвуковые ударные волны. Они сжимали облако и повторно возбуждали электроны, заставляя его вновь засиять в радиодиапазоне. Пик рентгеновской эмиссии расположен внизу скопления, и, скорее всего, это связано с тем, что плотное газовое ядро здесь подвержено воздействию окружающего раскаленного газа. Верхняя часть Abell 1033 излучает не столь сильно, это может быть связано с ранее разрушенным взаимодей-



Взаимодействующие скопления галактик Abell 1033, в центре которых расположено облако “радио Феникс”. Слева – яркая галактика, излучающая в радиодиапазоне. Розовым цветом показано расположение раскаленного газа в скоплениях (рентгеновский спектр, космическая обсерватория “Чандра”), зеленым – радиогалактика (радиоволны, NRAO/VLA), синим – плотность галактик (видимый диапазон, SDSS). Изображение составлено из снимков, полученных в разных диапазонах. Фото NASA, NRAO, SDSS.

ствующим скоплением или еще не начавшим сливаться. Скорее всего, “радио Феникс” появился недавно, так как подобные источники исчезают очень быстро – когда они располагаются близко к центру скопления, как это происходит в Abell 1033. Процесс взаимодействия скоплений галактик продлится еще в течение нескольких десятков миллионов лет.

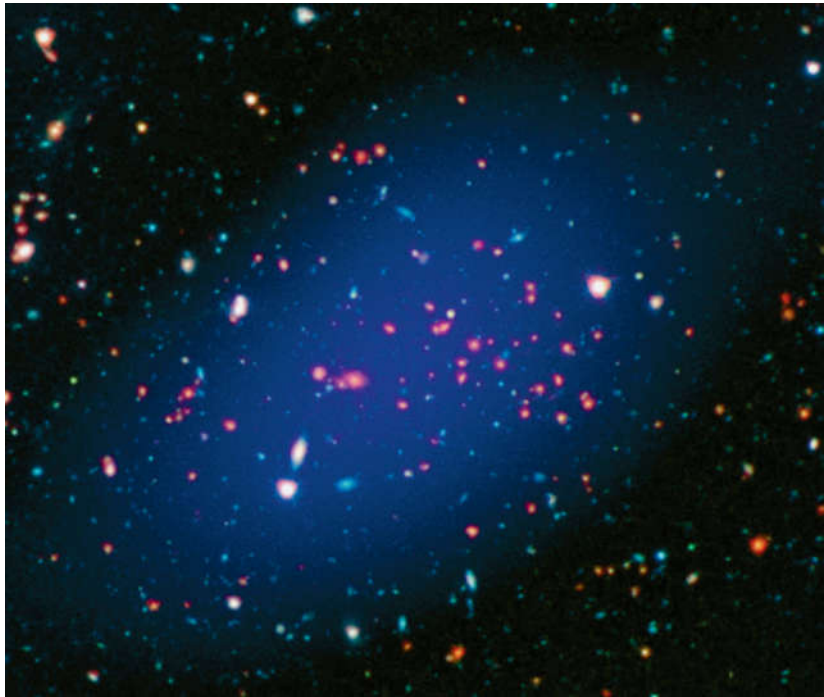
Редкое явление астрофизики наблюдали с помощью космической рентгеновской обсерватории “Чандра”, радиотелескопы VLA в США и Westerbork Synthesis в Нидерландах, а также ис-

пользовались данные в оптическом диапазоне Слоановского цифрового обзора неба SDSS. Известно, что скопления галактик – самые большие структуры во Вселенной, объекты которых все еще связаны друг с другом гравитационными силами. Они состоят из сотен или даже тысяч галактик, темной материи и огромных полоостей, заполненных горячим газом, которые светят в рентгеновском диапазоне. Если удастся понять, как эти группы растут, то будет раскрыта тайна эволюции Вселенной.

Пресс-релиз NASA,
31 августа 2015 г.

Самое древнее галактическое скопление

Недавно космические обсерватории “Спитцер” и “WISE” обнаружили сверхскопление гравитационно связанных тысяч галактик MOO J1142+1527 в созвездии Эридана. С помощью 23 радиотелескопов CARMA в обсерватории в Калифорнии удалось измерить массу сверхскопления – $10^{15} M_{\odot}$, 10-м телескоп Обсерватории им. В. Кека и 8-м телескоп Обсерватории Джемини на Гавайях определили расстояние до него – 8,5 млрд св. лет. Это самая массивная структура на таком удалении, относящаяся к Массивным объектам повышенной плотности (Massive Overdense Object). С течением времени они укрупняются, поскольку постоянно приобретают новых членов. Но как эти группы эволюционируют? На что они были похожи миллиарды лет назад? Для того, чтобы ответить на эти и многие другие вопросы, необходимо заглянуть как можно дальше в прошлое



Сверхскопление галактик MOO J1142+1527, находящееся в Эридане на расстоянии 8,5 млрд лет от нас. Полученные в инфракрасном спектре данные окрашены в красный цвет (космическая обсерватория “Спитцер”), в видимом диапазоне – зеленый и синий (Обсерватория Джемини), в радио диапазоне – фиолетовый (радиотелескопы CARMA). Изображение составлено из снимков, полученных в разных длинах волн. Фото NASA/JPL, Gemini, CARMA.

Вселенной. Основываясь на полученных данных, астрономы сделали заключение, что такие гигантские галактические группы растут и эволюционируют с момента рождения Вселенной; сверхскопление MOO J1142+1527 входит в пятерку самых массивных, существовавших в начальный период развития

Вселенной. В 2016 г. группа ученых из Лаборатории реактивного движения NASA планирует проанализировать более чем 1700 дополнительных кандидатов, чтобы найти еще более древнее галактическое скопление.

Пресс-релиз JPL/NASA,
6 ноября 2015 г.