ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОФИЗИКИ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

РЕФЕРАТ

по дисциплине «История и философия науки» на тему

«Исследования пылевой плазмы»

Выполнил:
аспирант очного отделения
Сергеев Андрей Александрович

Специальность:
01.04.13 «Электрофизика, электрофизические установки»

Научный руководитель:
вед.н.с., д.т.н. Борейшо Анатолий Сергеевич

Санкт-Петербург
2019 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 3

1 Пылевая плазма в природе 5

2 Исследования пылевой плазмы 7

2.1 Наземные эксперименты в лабораторных условиях 8

2.1.1 Плазменно-пылевой кристалл в высокочастотном разряде 10

2.1.2 Плазменно-пылевые кристаллы в разряде постоянного тока 11

2.2 Лабораторные эксперименты в условиях микрогравитации 12

2.2.1 Эксперименты с пылевой плазме, индуцированной ультрафиолетовым излучением 13

2.2.2 Эксперименты с пылевой плазмой в тлеющем рпазряде 14

2.2.3 Эксперименты с пылевой плазмой в высокочастотном разряде 15

2.2.4 Перспективные эксперименты в условиях открытого космоса 16

Заключение 18

Источники 20

ВВЕДЕНИЕ

Плазма, содержащая электроны, ионы, нейтральные частицы, а также заряженные макроскопические частицы называется пылевой или комплексной.

Изменение заряда пылевой частицы обусловлено токами на неё электронов и ионов, фото-, термо-, вторичной электронной эмиссии [1]. При воздействии интенсивным ультрафиолетовым излучением, заряд пылевой частицы оказывается положительным. В отсутствии фотоэффекта, из-за большей подвижности электронов чем ионов, пылевые частицы приобретают отрицательный заряд.

Пылевая плазма является отлично моделируемой системой для изучения сильных корреляционных эффектов и фазовых переходов на атомном уровне. Благодаря большим размерам пылевых частиц по сравнению с электронами, ионами и большинством молекул, их можно наблюдать с помощью стандартной камеры с ПЗС-матрицей. Стереоскопическая установка нескольких камер в комбинации с перестраивающим алгоритмом позволяют записывать 3D траектории так называемых шаров Юкавы. Более того, типичный временной масштаб динамики пыли составляет единицы секунд. Следовательно, съемки пылевого облака с кадровой частотой около 100 кадров в секунду достаточно для записи всего исследования.

Частицы микронного размера в плазме не только изменяют концентрации электронов и ионов в ней, но также создают новые эффекты, связанные с флуктуацией заряда частиц, обусловленной токами ионов и электронов, с рассеянием и рекомбинацией заряженных частиц на их поверхности.

Пылевая плазма встречается в различных областях жизни. Она обнаружена в облаках космической пыли [2], хвостах комет, планетарных кольцах, приповерхностных областях планет и спутников,

вблизи космических аппаратов [3, 4], пристеночной области установок термоядерного синтеза с магнитным удержанием плазмы [5, 6], камерах для плазменного напыления и травления элементов микроэлектроники [7–9].

Важным направлением исследований является изучение пылевой плазмы в атмосфере Земли и других небесных тел. Наличие пылевой плазмы в ионосфере Земли, в межзвёздной и межпланетной среде влияет на характеристики излучения и на прохождение сигналов от различных объектов. Пылевые частицы ослабляют и рассеивают излучение, изменяют его спектральные характеристики и поляризацию.

1 ПЫЛЕВАЯ ПЛАЗМА В ПРИРОДЕ

Пылевые частицы и их ансамбли играют важную роль в образовании звезд, планетных систем, планетарных колец, а также в процессах, протекающих в верхних слоях атмосферы (магнитосфере, ионосфере) [10-12].

Чрезвычайно важна роль пылевых образований в астрофизике, так как пыль составляет значительную долю (более 90%) всей твёрдой материи. В космическом пространстве пыль встречается в солнечных и планетарных туманностях, газопылевых и молекулярных облаках, астероидах. В частности, свечение туманностей и хвостов комет может быть обусловлено излучением, рассеянным плазменно-пылевыми образованиями.

Пыль является одной из основных составляющих в планетных кольцах планет. Анализ фотоснимков колец Сатурна, сделанных космическим аппаратом «Вояджер-2» в 1981 г. позволил определить наличие радиально направленных «спиц» во внешней части плотного кольца В.

Яркость свечения «спиц» отличалась при полёте по направлению к Сатурну и при удалении от него, исходя из чего определили, что «спицы» состоят из пылевых частиц, диаметром ~0.5 мкм. «Спицы» распадались и образовывались заново за времена в единицы минут под воздействием электромагнитных сил, а значит пылевые частицы в «спицах» имели заряд и представляли собой пылевую плазму.

В 1992 г. на расстоянии в одну астрономическую единицу от Юпитера были обнаружены пылевые частицы субмикронного размера, летящие от Юпитера параллельными периодическими пучками. Исследования показали, что источником этой пыли являются активные вулканы на спутнике Юпитера Ио, где пылевые частицы заряжаются положительно под воздействием солнечного ультрафиолетового излучения с последующим разгоном в электрическом поле Юпитера до скоростей, достаточных для покидания планеты.

Так называемый зодиакальный свет может наблюдаться вскоре после захода или перед восходом Солнца в безлунные ночи в приэкваториальных широтах Земли в периоды, близкие к точкам равноденствия. Зодиакальный свет представляет собой слабое свечение, которое возникает в результате рассеяния солнечного света на линзообразном скоплении пылевых частиц в плоскости эклиптики.

В 1960-70-х гг. астронавты «Аполлона» обнаружили свечение на лунном горизонте, названное впоследствии «лунными облаками». Свечение связано с рассеянием солнечного света на пылевых частицах у поверхности Луны, зарядившихся положительно в под воздействием солнечного ультрафиолета и левитирующих над поверхностью естественного спутника Земли. Лунная пыль оказывает влияние на оборудование и здоровье людей [13-15] и является серьезным препятствием для будущих Лунных миссий, связанных с высадкой человека на её поверхность.

Кроме того, пыль присутствует в выбросах продуктов сгорания рабочего тела ракетных двигателей, и в большом количестве оседает на поверхностях космических аппаратов и станций.

2 ИССЛЕДОВАНИЯ ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЫ

Как было отмечено во введении к настоящему реферату, ионизованный газ, который содержит электроны, ионы, нейтральные частицы, а также заряженные макроскопические частицы называют пылевой плазмой. Макрочастицы, содержащиеся в плазме, являются центрами рекомбинации и диссипации электронов и ионов, и постоянно взаимодействуют друг с другом, а в случае наличия дополнительных внешних полей являются источниками электронов и, реже, ионов. Поэтому, заряд пылевых частиц не является постоянным. Более того, используя различные механизмы взаимодействия излучения с веществом можно дистанционно управлять зарядом макрочастиц и концентрации электронов и ионов в такой плазме.

Большая величина заряда пылевых частиц приводит к тому, что сила электростатического взаимодействия между макрочастицами, пропорциональная произведению их зарядов и обратнопропорциональна квадрату расстояния между ними, достаточно велика. Вследствие этого становится возможным появление ближнего порядка, и даже образование кристаллов из ансамбля пылевых частиц.

Основными преимуществами пылевой плазмы как объекта исследования являются относительная простота получения, наблюдения и управления параметрами. Пылевые частицы можно увидеть невооруженным человеческим глазом, а значит и с помощью простейшей оптоэлектроники. Относительно малые времена отклика пылевой плазмы на внешние воздействия и релаксации в невозбужденное состояние дают возможность детально исследовать процессы фазовых переходов, нелинейных процессов и низкочастотные колебания в пылевой плазме путем анализа их движения.

Активные исследования плазменно-пылевых структур были развёрнуты относительно недавно в интересах приложений, связанных с электрофизикой рабочего тела в ракетных двигателях в магнитогидродинамических генераторах на твёрдом топливе; физикой

серебристых облаков в ионосфере Земли и полярных ионосферных радиоотражений; астрофизикой межпланетных и межзвёздных облаков, приповерхностных областей безатмосферных небесных тел (в частности, Луны); технологиями плазменного напыления и травления компонентов микроэлектроники.

В конце 1980-х годов фокус изучения свойств пылевой плазмы был нацелен на исследования механизмов зарядки пылевых частиц, распространения, затуханию и неустойчивости электромагнитных волн применительно к пылевой плазме в космосе и верхних слоях атмосферы [23-24].

Повышенный интерес к пылевой плазме в начале 1990-х годов связан с технологиями производства тонких пленок и наночастиц, а также с технологиями плазменного напыления и травления микроэлектронных элементов [25]. В вышеперечисленных процессах макрочастицы являются основными загрязнителями получаемых изделий, что приводит к повышению дефектности изделий и низкому сроку службы.

В середине 1990-х годов удалось наблюдать формирование кристаллических структур в различных типах пылевой плазмы [19, 20, 26].

На сегодняшний день пылевая плазма представляет активно развивающуюся область науки, объединяющую фундаментальные вопросы физики плазмы, гидродинамики, кинетики фазовых переходов, нелинейной физики, физики твердого тела, а также ряд прикладных проблем, связанных с нанотехнологиями, плазменными технологии, технологиями получения новых материалов.

2.1 Наземные эксперименты в лабораторных условиях

В лабораторных условиях плазму (в том числе пылевую) впервые получил американец Ирвинг Лэнгмюр в 20-х годах прошлого века. Он занимался изучением поверхностных и приповерхностных явлений,

возникающих при нагревании вольфрамовой нити. Эта работа началась с исследования диссоциации молекул водорода, введенных в колбу, на атомы и формирования из них на поверхности вольфрамовой нити пленки, толщиной в один атом. В процессе исследования зависимости степени диссоциации от температуры вольфрамовой нити Ленгмюр заметил блестящие стримеры, проходящие сквозь дугу и назвал их плазмой (возможно, по аналогии с кровяной плазмой).

Для более детального исследования пылевой плазмы был собран специальный стенд. Он состоял из стеклянной колбы, заполненной аргоном под давлением 2-4 Тор. Колба представляла собой спайку двух стеклянных трубок с разными диаметрами. Разряд происходил между нагреваемой вольфрамовой нитью (катод), расположенной в конце 10 см трубки, и дисковым анодом, расположенным в конце 3 см трубки. Прерывая схему нагрева примерно на пол секунды, Ленгмюр добивался понижения температуры катода на мгновение, что уменьшало электронную эмиссию и вызывало напряжение через дугу, возрастающее до достаточного значения для распыления вольфрама вследствие бомбардировки ионами.

Ленгмюр заметил, что эти крошечные сферические частицы, возможно, меньше 100 мкм в диаметре, имели основательное влияние на дугу. В определенном состоянии частицы двигались сквозь дугу со скоростями 10-30 см/с, и проявлялись как сверкающие стримеры, с тех пор он упоминал их как «стримерный разряд». Он был прав в своем понимании того, что эти частицы имеют отрицательный заряд и окружены положительным экранирующим полем. Им же был предложен метод диагностики плазмы с помощью зонда, на сегодняшний день называемым зондом Ленгмюра, помещаемого в плазму.

Ленгмюр показал, что потенциал, измеренный с помощью зонда, не совпадает с потенциалом плазмы, но будет отрицательным по отношению к окружающей плазме на величину, примерно в четыре раза превышающую потенциал, соответствующий средней энергии электронов для плазмы ртути.

Также он первым установил, что ионный ток будет ограничен орбитальным движением. Однако, Спитзер первым записал отношение,

$$1 - \varphi_f - (m_i/m_e)^{1/2}\exp(\varphi_f) = 0$$

для вычисления нормированного плавающего потенциала, $\varphi_f = eV_f / kT$ для случая зарядки пылевых частиц электронами и ионами.

2.1.1 Плазменно-пылевой кристалл в высокочастотном разряде

После обнаружения в 1994 г. плазменно-пылевого кристалла исследования фазовых переходов в пылевой системе изучаются в емкостном и индукционном разрядах, в разряде постоянного тока, в термической плазме продуктов сгорания различных топлив, ядерно- и фотовозбуждаемой плазме [1].

Плазменно-пылевой кристалл был обнаружен впервые в высокочастотном емкостном разряде низкого давления в инертном газе. Экспериментальная установка содержала нижний силовой электрод диаметром и верхний заземленный электрод. Электроды были размещены в вакуумной камере. Радиочастотный генератор с частотой f = 13,56 МГц подсоединялся к нижнему электроду. Пылевые частицы размером порядка одного микрона были вводились в плазму через металлическую сетку. Расстояние между электродами составляло 3-10 см. Визуализацию пылевых частиц осуществляли с использованием подсветки в горизонтальной или вертикальной плоскостях зондирующим лазерным лучом, который с помощью цилиндрической линзы формировался в плоский лазерный «нож» с диаметром в перетяжки около 100 мкм. Частицы, приобретшие в плазме большой отрицательный заряд, зависали в области слоя положительного пространственного заряда вблизи нижнего электрода Рассеянный частицами свет регистрировался с помощью одной или нескольких видеокамер.

Пылевые частицы микронного размера обычно левитируют в приэлектродном слое силового электрода вследствие равновесия между следующими основными силами:

1) электростатическую силу, которая направлена вверх для отрицательно заряженной частицы,

2) силу тяжести, которая направлена вниз,

3) силу увлечения направленным потоком ионов, которая направлена вниз — по направлению среднего по времени электрического поля.

При определенных условиях частицы образуют упорядоченную структуру, состоящую из нескольких протяженных горизонтальных слоев. Число частиц в такой структуре может составлять от 10^3 до 10^6 единиц, а число слоев в вертикальном направлении, как правило, лежит в пределах от единицы до нескольких десятков.

Для левитации пылевых частиц в наземных лабораторных условиях необходимы достаточно сильные электрические поля. Такие поля достижимы только вблизи приэлектродного. Внешние силы, действующие на частицы, сопоставимы по величине с силами межчастичного взаимодействия. Это приводит к тому, что системы пылевых частиц оказываются сильно сжатыми, неоднородными и анизотропными в вертикальном направлении [1].

2.1.2 Плазменно-пылевые кристаллы в разряде постоянного тока

Для формирования упорядоченных плазменно-пылевых структур также используется газовый разряд постоянного тока. Разряд постоянного тока, как правило, создается в цилиндрической трубке, установленной вертикально. Вводимые в разряд пылевые частицы могут левитировать в областях баланса внешних сил, где они освещаются лазерным излучением и регистрируются с помощью одной или нескольких видеокамер.

Обычные условия в разряде постоянного тока: давление газа находится приблизительно в диапазоне 0,1-5 Торр, а разрядный ток составляет ~ 0,1 –

10 мА. Структуры обычно наблюдаются в стоячих стратах положительного столба тлеющего разряда, но могут также находиться в двойном электрическом слое, формируемом в сужении при переходе от узкой катодной части положительного столба к широкой части анодного столба, в специально организованной многоэлектродной системе, имеющей три или более электродов с различными потенциалами, иначе говоря, в тех местах, где имеется достаточно сильное электрическое поле для левитации частиц.

2.2 Лабораторные эксперименты в условиях микрогравитации

Исследования влияния ультрафиолетового излучения на динамику дисперсных сред и процессов в условиях микрогравитации проводились в 1998 г. на борту космической станции «Мир». Аналогичные и принципиально новые исследования планируется выполнить в открытом космосе с использованием транспортного грузового корабля корабля «Прогресс» в ходе космического эксперимента «Пыль-УФ» в ближайшем будущем.

Интерес к этим экспериментам обусловлен тем, что на орбите космических аппаратов уровень квазистационарных микрогравитационных возмущений на несколько порядков (на МКС $g = 10^{-4}\ldots10^{-6}\ g_0$) ниже по сравнению с наземными условиями. В этих условиях возможно создание крупномасштабных протяженных пылевых облаков объемом в несколько кубометров и, на их основе, исследование характеристик космической пыли: структурных, динамических, пропускной способности для электромагнитных волн оптического и радиочастотного спектра.

При этом возможно моделирование различных условий формирования пылевых образований на поверхностях планет и их спутников, в верхних слоях атмосферы Земли, а также вблизи космических летательных аппаратов (интенсивное УФ излучение, низкие температуры). Эти исследования нацелены на понимание процессов, происходящих в пылевых скоплениях

в космосе и верхних слоях планетарных атмосфер, и на поверхности космических тел, лишенных атмосферы и др. Кроме того, исследования в условиях микрогравитации будут иметь практический интерес, связанный с проблемой лунной пыли [10-12].

Во многих случаях сила тяжести существенно ограничивает возможности лабораторных экспериментов в наземных условиях. В частности, она препятствует формированию протяженных трехмерных структур. Большинство плазменно-пылевых систем, исследованных в наземных условиях, существенно двумерны, сильно неоднородны и анизотропны в вертикальном направлении. Большей части этих ограничений можно избежать, проводя эксперименты в условиях невесомости. Такие эксперименты были проведены в нескольких типах плазмы.

2.2.1 Эксперименты с пылевой плазме, индуцированной ультрафиолетовым излучением

Исследования поведения ансамбля макрочастиц, заряд которых индуцировался солнечным излучением, проводились в условиях микрогравитации на орбитальном комплексе «Мир». Использовалась установка, состоящая из следующих основных частей: стеклянные ампулы, содержащие частицы из бронзы с монослоем цезия радиусом 25 - 50 мкм; источник излучения - полупроводниковый лазер (рабочая длина волны 0,67 мкм, мощность 30 мВт); система регистрации - видеокамера и видеомодуль [1].

В начальном состоянии частицы находились на стенках ампулы, поэтому эксперимент проводился по следующей схеме: динамическое воздействие (толчок) на систему; релаксация в течение 3-4 с для уменьшения случайных скоростей, сообщенных частицам при внешнем воздействии; освещение системы солнечным излучением в течение нескольких минут с релаксацией к невозбужденному состоянию - уходом частиц обратно на

стенки. Сильную корреляцию межчастичных расстояний экспериментально наблюдать не удалось. Полученные бинарные корреляционные функции позволпозволили сделать вывод о формировании в данных экспериментальных условиях неидеальных структур с близким порядком.

2.2.2 Эксперименты с пылевой плазмой в тлеющем рпазряде

На орбитальном комплексе «Мир» были проведены эксперименты по исследованию пылевой плазмы, создаваемой в газовом разряде постоянного тока [1]. Основным отличием используемой установки от схожей установки в наземных экспериментах являлось наличие двойного сеточного электрода между катодом и анодом. Во время экспериментов электрод находился под плавающим потенциалом и препятствовал проходу отрицательно заряженных частиц на анод.

В экспериментах использовался разряд в неоне при давлении p = 1 Торр. Разрядный ток мог варьироваться от 0,1 до 1 мА. В качестве макрочастиц использовались полидисперсные бронзовые сферы со средним радиусом 65 мкм.

Первоначально частицы находились на стенках газоразрядной камеры, поэтому после включения разряда с заданным разрядным током система подвергалась динамическому воздействию. Оказавшись в объеме плазмы, частицы заряжались, как в газоразрядной плазме, поглощая электроны и ионы, и двигались в направлении к аноду. В окрестности сеточного электрода часть захваченных частиц формировала стационарную облако. Это изображение записывалось с помощью видеокамеры. При выключении разряда частицы уходили обратно на стенки камеры. Эксперимент повторялся при новом значении разрядного тока.

Анализ видеоизображений стационарной пылевой структуры, образующейся вблизи сеточного электрода, позволил измерить парные корреляционные функции и коэффициент диффузии. Анализ дрейфового

движения частиц к сеточному электроду в начальной стадии эксперимента позволил оценить их заряд.

2.2.3 Эксперименты с пылевой плазмой в высокочастотном разряде

В условиях микрогравитации достаточно интенсивно исследуется пылевая плазма, создаваемая в высокочастотном разряде. Основной задачей лаборатории «Плазменный кристалл», созданной на борту Международной космической станции в рамках совместной российско-германской научной программы, является исследование плазменно-пылевых кристаллов, фазовых переходов, волновых явлений, свойств границ различных областей плазмы и т.д. в трехмерной изотропной пылевой плазме [1].

Первые из экспериментов по исследованию поведения пылевой компоненты в широком диапазоне параметров пылевой плазмы были проведены в начале марта 2001 г. В них исследовались монодисперсные системы частиц разного размера (a=1,7 и 3,4 мкм) и их смесь в разряде аргона при различных давлениях нейтрального газа и мощностях разряда [1].

В типичной структуре пылевых частиц в высокочастотном разряде в условиях микрогравитации пылевая компонента не заполняет весь объем плазмы: центральная часть разряда (так называемый войд) свободна от пылевых частиц, также свободны от частиц области вблизи электродов и стенок разрядной камеры.

Одной из основных проблем, связанных со структурой пылевого облака в высокочастнотном разряде в условиях микрогравитации, является именно образование войда [1].

Доказано, что войд формируется и при относительно малом числе пылевых частиц в разряде, т. е. не является существенно коллективным эффектом [1]. Это может отвечать внутреннему свойству разряда - наличию некоторой силы, направленной от центра к периферии и превосходящей по величине электростатическую силу. В ряде работ предполагается, что

силой, ответственной за образование войда, является сила ионного увлечения. На данный момент именно эта гипотеза принята в качестве рабочей.

2.2.4 Перспективные эксперименты в условиях открытого космоса

Для перехода к пониманию процессов, происходящих с космической пылью (в т. ч. лунной) необходимо обеспечить формирование крупномасштабных объемных пылевых облаков, моделируя внешние факторы космического пространства. Поэтому формирование пылевых облаков частиц непосредственно в открытом космосе имеет большие перспективы исследования. Достаточно, сказать, что указанным способом впервые удастся исследовать большие ансамбли пылевых заряженных частиц в вакууме, фактически образующих однокомпонентную плазму. Достичь этой цели в условиях лабораторных установок на Земле на данный момент не представляется возможным, поскольку требуется проводить эксперименты при пониженной гравитации.

Основным механизмом зарядки частиц, помещенных в разряд, являются потоки электронов и ионов. Вследствие более высокой температуры и меньшей, по сравнению с ионами и макрочастицами, массой электронов заряд частиц становится отрицательным.

Плазма с положительно заряженными частицами может образовываться за счет эффекта фотоэмиссии при облучении частиц потоком фотонов с энергией, выше работы выхода фотоэлектрона с их поверхности или в случае многофотонной эмиссии, при облучении частиц высокими интенсивностями излучения, а так же в случае термоэмиссии, когда энергия излучение переходит в энергию колебания кристаллической решетки.

В космическом пространстве среди механизмов, изменяющих заряд макрочастиц на положительный, можно выделить три основных: термо-, фото-, и вторичная эмиссия электронов. Основным же является вторичная

электронная эмиссия, вследствие больших концентраций электронов в межпланетных и межзвездных пространствах.

Наличие различных механизмов зарядки макрочастиц в космическом пространстве может провоцировать скопление и рост частиц за счет электрического притяжения пыли с разнозначными зарядами [31], или приводить к образованию плазменно-пылевых структур при наибольшем вкладе одного из механизмов зарядки макрочастиц. Исследование таких структур перспективно как с точки зрения фундаментальной науки, так и практических приложений.

Первые результаты, полученные на орбитальном комплексе «Мир», показали что в верхних слоях атмосферы при воздействии интенсивного солнечного излучения исследуемые частицы заряжались путем фотоэмиссии и приобретали положительные заряды. В результате расчетов фотоэмиссионной зарядки пылевых частиц по модели, описанной в работе [32], было получено, что наблюдаемые величины заряда будут иметь место при эффективном потоке электронов фотоэмиссии, равном $j_{eff} = 3.665\times10^{14}$ см$^{-2}$с$^{-1}$.

Следует отметить, что возможность изучения плазменно-пылевых кристаллов со свободными границами наиболее полно может реализоваться лишь в условиях невесомости или микрогравитации [34].

Это обусловлено так же и тем что ультрафиолетовое излучение Солнца и звёзд практически полностью поглощается озоновым слоем атмосферы Земли, поэтому полноценно исследовать взаимодействие микрочастиц с солнечным излучение можно только в верхних слоях атмосферы или в открытом космосе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время пылевая плазма представляет бурно развивающуюся область науки, объединяющую фундаментальные вопросы физики плазмы, гидродинамики, кинетики фазовых переходов, нелинейной физики, физики твердого тела, а также ряд прикладных проблем, связанных с нанотехнологиями, плазменными технологии, технологиями получения новых материалов.

Изучение физики пылевой плазмы связано с такими приложениями как электрофизика рабочего тела в ракетных двигателях в магнитогидродинамических генераторах на твёрдом топливе; физика серебристых облаков в ионосфере Земли и полярных ионосферных радиоотражений; астрофизика межпланетных и межзвёздных облаков, приповерхностных областей безатмосферных небесных тел (в частности, Луны); технологии плазменного напыления и травления компонентов микроэлектроники.

К актуальным современным направлениям исследований пылевой плазмы относят [35]:

1) изучение взаимодействия между частицами, зарядки пылевых частиц и других элементарных процессов в пылевой плазме;

2) изучение процессов образования, фазовых переходов, термодинамики и других свойств плазменно-пылевых жидкостей, кристаллов и кластеров;

3) изучение сдвиговых потоков, поверхностей разделов и других особенностей гидродинамики и поведения течений в пылевой плазме;

4) изучение волновых процессов в пылевой плазме;

5) изучение нелинейных процессов в пылевой плазме;

6) изучение пылевой плазмы в магнитной ловушке;

7) изучение природных плазменно-пылевых образований.

Кроме того, следует отметить отдельно активно развивающиеся в настоящее время исследования физики систем активных броуновских частиц [36]. Заряженные пылевые частицы нагреваются под воздействием высокоинтенсивного внешнего ультрафиолетового излучения (например, лазерного или солнечного), то есть становятся способными преобразовывать подводимую извне энергию в кинетическую энергию собственного хаотического движения.

Движение пылевой частицы при появлении источника внешней энергии качественно отличается от классического броуновского движения, причём характер «активного» движения зависит как от материала поверхности частицы, так и от её формы. Изучение динамики частиц такого класса позволит получить результаты, значимые для космической физики, медицины, биологии, химии и других областей науки и техники.

ИСТОЧНИКИ

1. Фортов В. Е., Храпак А. Г., Храпак С. А. и др. Пылевая плазма // УФН. 2004. Т. 174, № 5. С. 495–544.

2. Goertz C. K. Dusty plasmas in the solar system // Rev. Geophys. 1989. Vol. 27, no. 2. Pp. 271–292.

3. Robinson J., P. A., Coakley P. Spacecraft charging-progress in the study of dielectrics and plasmas // Electrical Insulation, IEEE Transactions on.1992. Vol. 27, no. 5. Pp. 944–960.

4. Verheest F. Dusty plasmas in application to astrophysics // Plasma Phys. Control. Fusion. 1999. Vol. 41, no. 3A. P. A445.

5. Winter J. Dust in fusion devices - experimental evidence, possible sources and

6. Цытович В. Н., Винтер Д. Пыль в установках управляемого термоядерного синтеза // УФН. 1998. Т. 168, № 8. С. 899–907.

7. Complex and Dusty Plasmas: From Laboratory to Space, Ed. by V. E. Fortov, G.

8. Ваулина О. С., Фортов В. Е., Петров О. Ф. и др. Пылевая плазма: эксперимент и теория. М.: Физматлит, 2009. С. 316. ISBN: 9785-94052-179-2. 104

9. Kroesen G. M. W., Stoffels E., Stoffels W. W. et al. Advanced technologies based on wave and beam generated plasmas // Ed. by H. Schl□uter, A. Shivarova. NATO Science Series. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 1999. P. 175. ISBN: 0-7923-5642-X.

10. Liu Y., Park J., Schnare D. W., Hill E. and Taylor L.A. Characterization of lunar dust for toxicological studies. II: Morphology and physical characteristics // Journal of Aerospace Engineering. 2008. Vol. 21, Pp. 272-279.
11. Каплан С.А. Межзвездная среда и происхождение звезд. М.: Знание,1977.
12. Горькавый Н.Н., Фридман А.М. // УФН. 1990. Том 160. Стр. 169.
13. Liu Y., Schnare D.W., Eimer B.C. and Taylor L.A. Dry separation of respirable lunar dust: lunar aerosol dust toxicity advisory group // Planetary and Space Science. 2008. Vol. 56. Pp. 1517-1523.
14. Park J., Liu Y., Kihm K.D. and Taylor L.A. Characterization of lunar dust for toxicological studies. I: Particle size distribution // Journal of Aerospace

Engineering. 2008. Vol. 21. Pp. 266-271.

15. Melanso F., Havnes O. // J.Geophys.Res. 1991. Vol. 95. P. 5837.
16. Wuerker R. F., Shelton H., Langmuir R. V. Electrodynamic Containment of charged particles // J.Appl. Phys. 1959. Vol. 30, issue 3. P. 342.
17. Paul W., Raether M. Z. Das elektrische Massenfilter // Zeitschrift für Physik. 1955. Vol. 140. P. 262.
18. Ikezi H. Coulomb solid of small particles in plasma // Phys. Fluids. 1955. Vol. 29. P.1764.
19. Chu J. H., I L. Direct observation of coulomb crystals and liquids in strongly coupled rf dusty plasma // Phys. Rev. Lett. 1994. Vol.72, №25. P. 4009.
20. Фортов В. Е., Нефедов А.П.. Петров О. Ф. и др. Experimental observation of Coulomb ordered structure in spray of thermal dusty plasmas // Письма в ЖЭТФ. 1996. Т. 63, вып.3. С. 176 .
21. Fortov V. E., Nefedov A. P., Vladimirov V.I., et al. Dust particles in a nuclear-induced plasma // Phys. Lett. A. 1999. Vol. 258, no.3. P.305.
22. Langmuir I., Found G., Dittmer A. F. A new type of electric discharge: the streamer discharge // Science. 1924. Vol.60. P. 392
23. Goertz C. K. Dusty plasmas in the solar system // Rev.Geophys. 1989. Vol.27. P. 271.
24. Havnes O. et al. Dust charges, cloud potential, and instabilities in a dust cloud embedded in a plasma // J. Geophys. Res. 1987. Vol. 92, issue A3. P. 2281.
25. Selwyn G. S., Haller K. L., Patterson E. F. Trapping and behavior of particulates

26. Фортов В. Е., Нефедов А. П., Торчинский В. М. и др. Кристаллизация пылевой плазмы в положительном столбе тлеющего разряда // Письма в ЖЭТФ. 1996. Т. 64. С. 86.
27. Нефедов А.П., Петров О.Ф., Фортов В.Е. // Усп. физ. наук. 1997. Т.167, №11. С. 1215-1226.
28. Fortov V.E., Nefedov A.P., Petrov O.F., Samarian A.A., and Chernyschev A.V. // Physical Review E: Rapid Communications. 1996. Vol.54. Pp. 2236-2239.

.

30. Фортов В.Е., Нефедов А.П., Петров О.Ф., Самарян А.А. и Чернышев А.В.

Сильнонеидеальная классическая термическая плазма: экспериментальное изучение упорядоченных структур макрочастиц // Журн. экспер. и теор. физ. 1997. Т.111, вып.2. С.467.

31. Cui C., Goree J. // IEEE Trans. on Plasma Science. 1994. Vol. 22, № 2. P. 151.
32. Filippov A. V., Pal A. F., Starostin A. N. Study of photoemission charging of dust particles // Proc. 2nd Int. Conf. on the Phys. of Dusty and Burning Plasmas. 2007, August 26 – 30, Odessa (Ukraine). Pp.44-47.
33. Соммер А.. Фотоэмиссионные материалы. М.: Энергия, 1973.
34. Цытович В.Н. // УФН. 1997. Том 167, № 1. Стр. 57.
35. Попель С.И. Лекции по физике пылевой плазмы: учебное пособие. – М.: МФТИ, 2012. – 160 с.
36. Bechinger C., Di Leonardo R., Löwen H. et al. // Rev. Mod. Phys. 2016. Vol. 88. P. 045006.