

Лекция 1. Определение пылевой плазмы. Общие сведения

Цель. Дать определение и общее представление о пылевой плазме

С 90-х годов в терминологию физики плазмы прочно вошло понятие «пылевая» плазма. Представьте себе обычную плазму, состоящую из атомов (молекул), ионов и электронов. В нее каким-то образом попадают частицы вещества макроскопических размеров (от нанометров до микронов). Макрочастицы (их еще называют пылинки, грейны) заряжаются падающими на них потоками электронов (в первую очередь – поскольку у электронов большая подвижность по сравнению с ионами) и ионов [1,2]. Зарядка может происходить также путем фото- и термоэмиссии электронов. На рис. 1 приведена фотография пылевой частицы, поверхность которой в результате сферического воздействия плазменных потоков приобрела вид, напоминающий «цветную капусту». Таким образом, в результате различных процессов первоначально нейтральные пылинки могут заряжаться, причем до очень больших значений (порядка 10^5 элементарных зарядов), что позволяет рассматривать пылинки как сильно коррелированную систему, т.е. систему с сильным взаимодействием между частицами. Сильная корреляция приводит к тому, что при температурах и концентрациях, соответствующих практически идеальному состоянию плазмы, содержащей макрочастицы, они (макрочастицы) могут образовывать различные упорядоченные структуры и даже выстраиваться в кристаллическую решетку. Таким образом, казавшаяся невозможной в осуществлении идея о получении в лабораторных условиях плазменного кристалла стала явью. Поскольку свойства описанной системы отличаются от свойств обычной плазмы, было введено понятие пылевой плазмы, обозначающей обычную (буферную) плазму с внедренными или образовавшимися в ней заряженными макроскопическими частицами. Иногда такую плазму называют аэрозольной, комплексной, гетерогенной или плазмой с конденсированной дисперсной фазой.

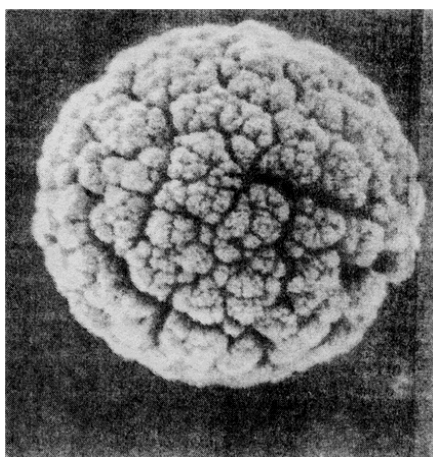


Рис. 1 Фотография пылевой частицы (полученная с помощью электронной микрографии низкого напряжения), выросшей в гелиевой плазме с графитовыми электродами при СВЧ разряде 15 МГц и давлении 1 тор [2].

Первые эксперименты по обнаружению упорядоченных структур в пылевой плазме были проведены группой ученых из Института внеземной физики им. М.Планка (г. Гархинг, Германия) под руководством профессора Г.Морфилла [3]. СВЧ поле

производило ионизацию газового аргона, а сверху в отверстие инжектировались макрочастицы размерами $a \approx 7 \pm 0,2$ мкм. Параметры полученной плазмы таковы: температура электронов $T_e \approx 1 \div 3$ эВ, концентрация ионов $n_i \approx 10^9 \text{ см}^{-3}$.

Аналогичные эксперименты на основе СВЧ разряда проведены в Национальном университете Шунгли (Тайвань) [4]. В отличие от экспериментов группы Г.Морфилла, здесь инжектировались частицы переменного размера, которые генерировались в результате химических реакций путем образования частицы SiO_2 . Хотя частицы сильно отличались по размерам, тем не менее наблюдалась четкая кристаллическая структура, сформированная частицами с линейными размерами ~ 10 мкм. Постоянные решетки, которые соответствовали центрированному кубу, соответственно равны 180 и 130 мкм.

Отличительной особенностью экспериментов группы Оксфордского университета (Англия) [5] явилось отсутствие контроля за размерами частицы, поскольку был использован обычный порошок для лазерного принтера. Можно предположить, что формы макрочастиц достаточно сложные, вплоть до фрактальных. Из этого можно ожидать, что ввиду сильного различия величины зарядов пылинок, интенсивность их взаимодействия тоже совершенно разная. Однако, несмотря на это, наблюдались кристаллические структуры. Главный вывод этой работы – плазменный кристалл может быть образован частицами разного размера.

Новизной результатов экспериментальных работ [6,7], проведенных учеными Института высоких температур РАН (г.Москва) является обнаружение макроскопических упорядоченных структур в плазме с сильно неоднородным распределением электронных температур в стратах тлеющего разряда в неоне. Расстояние между пылевыми частицами порядка 300 мкм. Заряд пылинок оказался большим, $Z_d \approx 7 \cdot 10^5$. Этот факт авторы объясняют большим размером пылевых частиц ~ 60 мкм. Типичная картина образования «плазменного кристалла» показана на рис.2 [1].

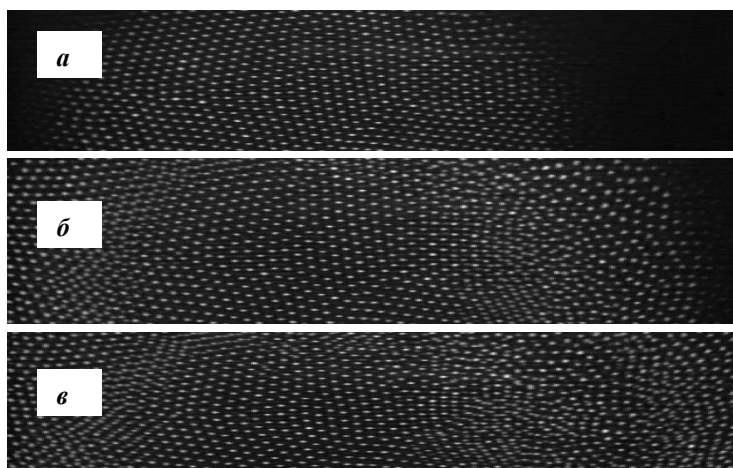


Рис.2 Горизонтальные сечения плазменного кристалла. Межчастичное расстояние – 250 мкм

Вследствие значительного заряда пылинок, даже их небольшая концентрация может сказаться на электростатическом балансе, а их вклад в локальную квазинейтральность может быть существенным. Кроме того, они вносят сильную диссипацию в плазму, так как заряженные частицы рекомбинируют на их поверхности.

Следует отметить, что пылевая плазма имеет большую ценность как объект фундаментальных исследований. Прежде всего, это связано с тем, что пылевая плазма дает возможность наблюдать на макроскопическом уровне фазовые переходы: плавление, испарение, кристаллизацию, а также принципиальную возможность теоретической проверки условий этих переходов.

И хотя пылевая структура пока не нашла серьезного практического применения, однако, все актуальнее становятся практические задачи устранения пылевой плазмы из технических установок, где она возникает по тем или иным причинам, либо эффективного ее использования, в зависимости от соотношения вреда и пользы, приносимого ею. Примером является задача изучения последствий образования пылевых частиц в пристеночной области термоядерных установок.

Литература

1. Нефедов А.П., Петров О.Ф., Фортов В.Е. Кристаллические структуры в плазме с сильным взаимодействием макрочастиц. УФН. 1997. Том 167. № 11. С. 1215-1226.
2. Цытович В.Н. Плазменно-пылевые кристаллы, капли и облака. УФН. 1997. Том 167. № 1. С. 57-99.
3. Thomas H., Morfill G. e.a. Phys. Rev. Letters. 1994. Vol.73. p. 652.
4. Chu J.H., Lin I. Physica. A. 1994. Vol. 205. P. 183.
5. Allen J. et al. Proc. Ann. Plasma Phys. Conf. (Scotland, Pearth, 1996).
6. Фортов В.Е. и др. Препринт НИЦ ТИВ РАН. М. 127412. 1996.
7. Fortov V.E., Nefedov A.P. Phys. Letters. A. 1996. Vol. 218. P. 89.