

Лекция 2

Общепринятые параметры в физике пылевой плазмы

Цель. Ознакомить с параметрами системы и наиболее часто используемыми безразмерными параметрами

Итак, пылевые частицы могут сохраняться в плазме. В эксперименте чаще всего пылевые частицы за короткое время приобретают большие отрицательные заряды, рост которых обусловлен тепловым потоком электронов на пылинку. Таким образом, величина заряда в основном определяется электронной температурой и размерами пылинок. Однако, при определенных условиях, заряд грейнов может быть и положительным.

Перечислим основные физические параметры плазмы, содержащей пылевые частицы.

1. Заряд, температура, концентрация, масса пылинок обозначаются :

$$Z_d, T_d, n_d, m_d$$

2. Экранирование поля вблизи частицы происходит на расстояниях порядка дебаевского радиуса r_D

$$\frac{1}{r_D^2} = \frac{1}{r_{Di}^2} + \frac{1}{r_{De}^2}, \quad (2.1)$$

где r_{Di} означает дебаевский радиус ионов, r_{De} - дебаевский радиус электронов.

$$r_{de} = \sqrt{\frac{k_B T_e}{4\pi Z_d^2 e^2 n_e}}$$

3. Плазменно-пылевая частота:

$$\omega_d = \sqrt{\frac{4\pi Z_d^2 e^2 n_d}{m_d}} \quad (2.2)$$

4. Среднее расстояние между частицами $r_0 = a = (3/4\pi n_d)^{1/3}$ (2.3)

5. Параметр связи пылевых частиц $\Gamma = \frac{Z_d^2 e^2}{r_0 k_B T_d}$ (2.4)

6. Параметр экранировки $\kappa = r_0 / r_D$. (2.5)

Определение параметров пылевой плазмы

Для определения параметров связи и экранировки пылевой системы необходимо уметь либо экспериментальным, либо теоретическим путем находить заряд пылевых частиц, их концентрацию, радиус Дебая r_D . Для нахождения последнего используются известные методы диагностики обычной плазмы, например зондовые методы. Концентрация, среднее расстояние между пылевыми частицами, их температура определяются из анализа видеоизображений пылевых структур. Величину среднего заряда пылинок можно оценить как численным методом, так и экспериментальным.

Задача описания ионизационного равновесия и термодинамики пылевой плазмы осложняется многопараметричностью системы, так как заряд пылинок не является фиксированной величиной, а зависит от параметров окружающей плазмы. Если заряд частицы отрицательный, то величину его можно оценить из простого соображения: последнему электрону, попадающему на поверхность макрочастицы, должно хватить кинетической энергии, чтобы достичь уже заряженную макрочастицу. Иными словами, т.к. $k_B T_e \sim Z_d e^2 / b$ (b - радиус макрочастицы), то

$$Z_d \sim \frac{k_B T_e b}{e^2}$$

Рассмотрим случай зарядки макрочастиц в термической щелочной плазме. Заряд устанавливается в результате баланса процессов термоэмиссии электронов с поверхности пылинок и налипания на них потока заряженных частиц, при этом необходимо так же учитывать процессы ионизации-рекомбинации в окружающей плазме. Значения потенциалов ионизации буферной плазмы и работы выхода электронов с поверхности пылинок определяют знак заряда макрочастиц. Ниже приведена система уравнений для определения заряда пылинок :

$$\begin{cases} \frac{n_e n_i^+}{n_a} = 2 \frac{U_i}{U_a} \left(\frac{2\pi m_e k_B T}{h^2} \right)^{3/2} \exp(-I / k_B T) \\ n_e = 2 \left(\frac{2\pi m_e k_B T}{h^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\left[w + \frac{Z_d e^2}{a}\right] / k_B T\right) , \\ n_i + Z_d n_d - n_e = 0 \\ n_a + n_i = n_A \end{cases} \quad (2.6)$$

На рисунке 2.1 приведен график зависимости заряда цериевых макрочастиц радиуса $1 \mu\text{м}$ в натриевой плазме при температуре 1800 K и концентрации пыли $7 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$. Как видно из рисунка, заряд может менять знак, при малых концентрациях буферной плазмы, зарядка пылинок происходит главным образом за счет термоэмиссии электронов, затем при увеличении плотности плазмы поток электронов на поверхность грейнов увеличивается и знак заряда становится отрицательным.

Заряд можно также определить экспериментально. Один из методов основан на определении параметров акустических волн, распространяющихся в пылевой структуре. Когда длина волны много больше радиуса Дебая, фазовая скорость волны v

$$v = \frac{Z_d}{n_i^{1/2}} \sqrt{\frac{n_d k_B T_i}{m_d}} \quad (2.7)$$

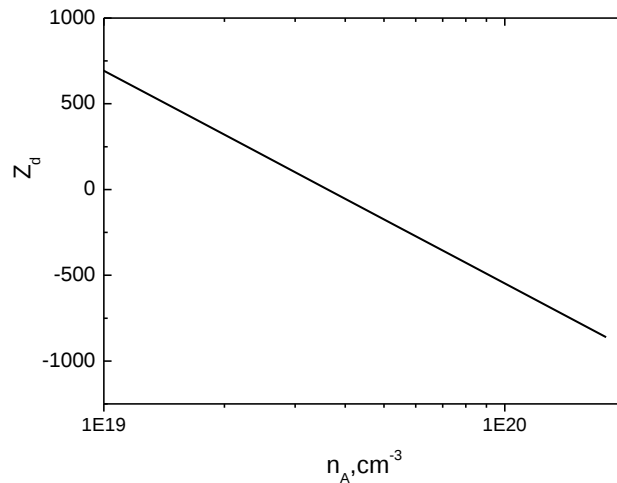


Рис. 2.1 Заряд цериевых пылинок в термической плазме натрия.

Когда длина волны сравнима с расстоянием между частицами, фазовая скорость стремится к 0 (но в этом случае волны трудно зарегистрировать), частота к фиксированной величине – плазменно-пылевой частоте.

Эту частоту можно экспериментально определить, наблюдая поведение частицы, смещенной от положения равновесия на незначительное расстояние сфокусированным лазерным импульсом.

Недавно был предложен еще один изящный метод определения заряда макрочастиц по штарковскому уширению спектральных линий атома водорода. Метод основан на интегрировании картины штарковского расщепления по распределению поля вокруг частиц и сопоставлению полученного профиля с экспериментальным.

После того как определены заряд, концентрации пыли и плазмы, а также температуры всех компонент, дальнейшее вычисление значений параметров связи и экранировки, описывающих состояние пылевой плазмы, не составит труда. В качестве примера на рисунке 2.2 приведены рассчитанные зависимости параметра связи пылинок для разных температур от концентрации пылевой компоненты. Взята плазма натрия (суммарная концентрация атомов и ионов натрия $n_A = 4.66 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$), содержащая макрочастицы CeO_2 размером в 1 мкм. Как видно из рисунка кривые имеют максимумы, в результате того, что заряд макрочастиц, уменьшается с ростом концентрации пыли, поскольку поток электронов распределяется на большую суммарную поверхность

макрочастиц. Эти кривые, конечно, не являются универсальными, для разных частиц и буферной плазмы, концентраций и температур они могут быть разными.

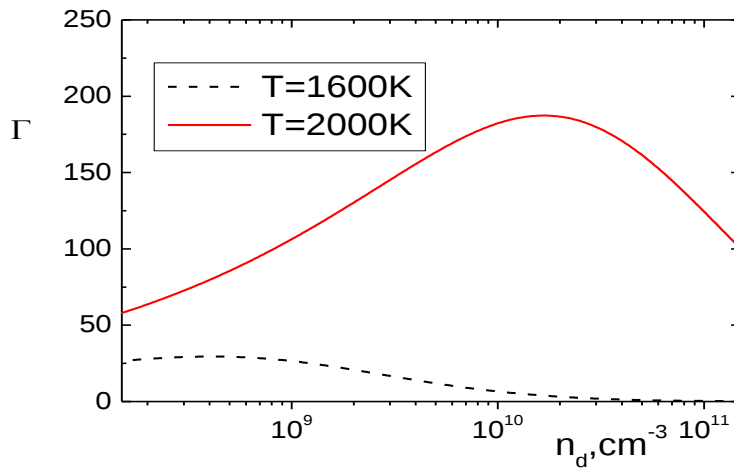


Рис. 2.2 Зависимость параметра связи от плотности макрочастиц.

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, Perth, 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.