

УДК 533.9

Ю. В. АРХИПОВ, Ф. Б. БАИМБЕТОВ, А. Е. ДАВЛЕТОВ, Ю. А. ХРАМЦОВ

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ В НЕИДЕАЛЬНОЙ ПЛАЗМЕ

На основе теории линейного диэлектрического отклика с учетом локальных полей предложена модель взаимодействия пылевых частиц в неидеальной плазме. На кривой зависимости потенциала от расстояния имеется минимум, свидетельствующий о наличии нового механизма притяжения пылевых частиц. Исследованы корреляционные функции и показано, что образование кристаллических пылевых структур становится возможным уже при относительно слабой связи пылевых частиц между собой.

Как известно, в условиях осуществления термоядерной реакции в токамаке образуется как высокотемпературная (10^8K), так и сравнительно низкотемпературная (10^4K) пристеночная плазма. Как правило, контакт высокотемпературной плазмы со стенками реактора (диафрагмами) полностью предотвратить не удастся. При подобном контакте в плазму инжектируются частицы макроскопических (микронных) размеров, называемые пылью и способные приобретать, ввиду поглощения электронов, большой отрицательный заряд. Образовавшаяся таким образом заряженная пылевая компонента плазменной среды может существенно влиять на характеристики пристеночной плазмы, меняя их тем или иным образом.

В связи с этим представляется весьма актуальным изучение различных свойств как самой пылевой компоненты, так и ее влияния на свойства плазмы. С теоретической точки зрения очевидно, что для описания пылевой компоненты важно знать потенциал взаимодействия пылевых частиц между собой, поэтому весьма актуальны построение модели взаимодействия пылевых частиц и ее сравнение с другими широко используемыми подходами, а также изучение корреляционных функций системы.

Параметры пылевой плазмы. Рассмотрим систему, состоящую из пылевых частиц с электрическим зарядом $Z_d e$ и концентрацией n_d , которые погружены в однокомпонентную плазму ионов с зарядом e и концентрацией n . Электроны плазмы составляют однородную заряженную среду, на фоне которой происходят изучаемые явления.

Параметр неидеальности пылевых частиц определяется выражением

$$\Gamma_d = \frac{Z_d^2 e^2}{a_d k_B T}, \quad (1)$$

где $a_d = (3/4\pi n_d)^{1/3}$ – среднее расстояние между пылевыми частицами, k_B – постоянная Больцмана, T – температура среды. Параметр неидеальности (1) представляет собой отношение средней кулоновской энергии взаимодействия пылевых частиц к их средней тепловой энергии и в типичной пылевой плазме меняется от нескольких десятков до нескольких сотен и даже тысяч, что свидетельствует о большой роли взаимодействия между частицами.

Еще один важный безразмерный параметр, необходимый для описания системы, называется параметром экранирования и определяется как

$$\kappa = \frac{a_d}{\lambda_D}, \quad (2)$$

где $\lambda_D = (k_B T / 4\pi n e^2)^{1/2}$ – дебаевский радиус экранирования электронов.

Для идеальной однокомпонентной пылевой плазмы параметры (1) и (2) достаточны для описания состояния пылевой компоненты. Основной идеей последующего изложения является то, что пристеночная плазма токамака может находиться в слабонеидеальном состоянии, так как контакт со стенками существенно снижает ее температуру. Поэтому необходимо введение еще одного параметра неидеальности

$$\Gamma = \frac{e^2}{a k_B T}, \quad (3)$$

где $a = (3/4\pi n)^{1/3}$ – среднее расстояние между электронами.

С чисто теоретической точки зрения введенные параметры (1)–(3) полностью характеризуют состояние пылевой плазменной среды.

Потенциал взаимодействия пылевых частиц. Для получения потенциала взаимодействия пылевых частиц воспользуемся приближением диэлектрической среды (ПДС), означающим, что пара пылевых частиц помещена в плазменную среду, которая осуществляет экранировку. Тогда потенциал взаимодействия примет вид

$$\Phi(r) = \frac{1}{(2\pi)^3} \int \frac{\phi(k)}{\varepsilon(k, 0)} \cdot \exp(ikr) dk. \quad (4)$$

Здесь $\phi(k) = 4\pi Z_d^2 e^2 / k^2$ – Фурье-образ потенциала взаимодействия пылевых частиц в вакууме, а $\varepsilon(k, 0)$ – статическая диэлектрическая функция плазменной среды.

В каждом конкретном случае потенциал взаимодействия зависит от выбора статической диэлектрической функции, которая, в свою очередь, определяется физическими условиями в плазменной среде. Например, если плазма может быть рассмотрена как идеальная, то статическая диэлектрическая функция выбирается в приближении хаотических фаз (ПХФ)

$$\varepsilon_{РПА}(k, 0) = 1 + \frac{1}{k^2 \lambda_D^2}. \quad (5)$$

Подстановка (5) в (4) приводит к обычному потенциалу Дебая–Хюккеля, широко используемому при моделировании свойств пылевой плазмы

$$\Phi(r) = \frac{Z_d^2 e^2}{r} \exp\left(-\frac{r}{\lambda_D}\right). \quad (6)$$

В случае, если плазменная среда является неидеальной, необходимо использование поправок на локальные поля (ПЛП) [1]

$$\varepsilon_{LFC}(k, 0) = 1 + \frac{1}{k^2 \lambda_D^2 - G(k)}. \quad (7)$$

Здесь $G(k)$ называется функцией локальных полей и имеет вид

$$G(k) = 1 + \frac{k_B T \tilde{C}(k)}{\phi(k)}, \quad (8)$$

где $\tilde{C}(k)$ представляет собой Фурье-образ прямой корреляционной функции $C(r)$. Для ее получения воспользуемся системой уравнений Орнштейна–Цернике в гиперцепном приближении:

$$\begin{aligned} \tilde{N}(k) &= \rho \tilde{C}(k) / (1 - \rho \tilde{C}(k)), \\ g(r) &= \exp[N(r) - u(r)], \\ C(r) &= g(r) - 1 - N(r), \end{aligned} \quad (9)$$

где $\rho = 3/4\pi$ – безразмерная плотность, $N(r)$ и $\tilde{N}(k)$ означают сумму узловых диаграмм и ее Фурье-образ соответственно, $g(r)$ – радиальная функция распределения.

Вычисления по схеме, приведенной выше, проводились численно и результаты представлены графически (рис. 1, 2). Видно, что неидеальность плазменной среды ведет к появлению минимума на кривой потенциала, т. е. кулоновское

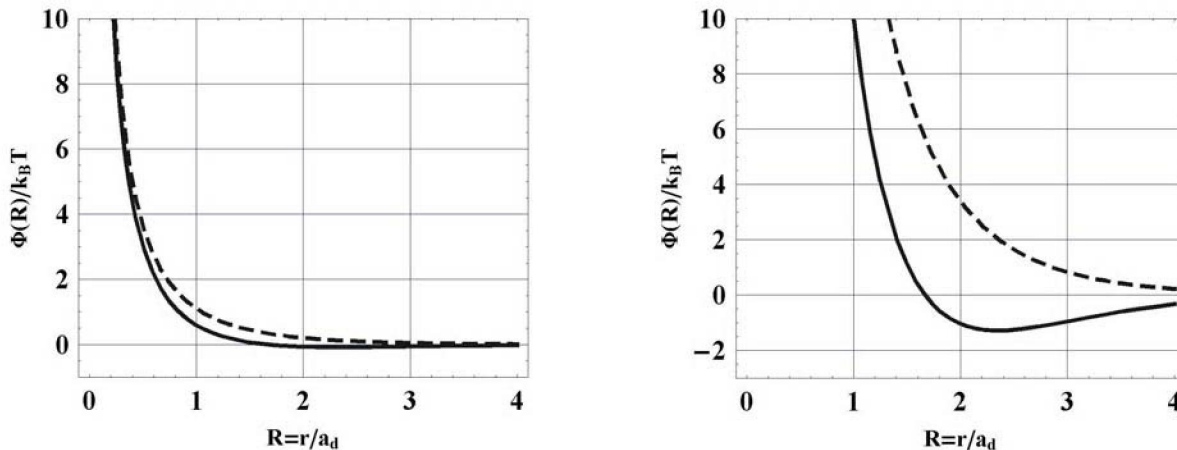


Рис. 1. Безразмерный потенциал взаимодействия частиц пылевой плазмы при $\kappa = 1$ и $\Gamma = 3$. Слева – $\Gamma_d = 3$, справа – $\Gamma_d = 50$. Пунктирная линия – потенциал Дебая–Хюккеля (6)

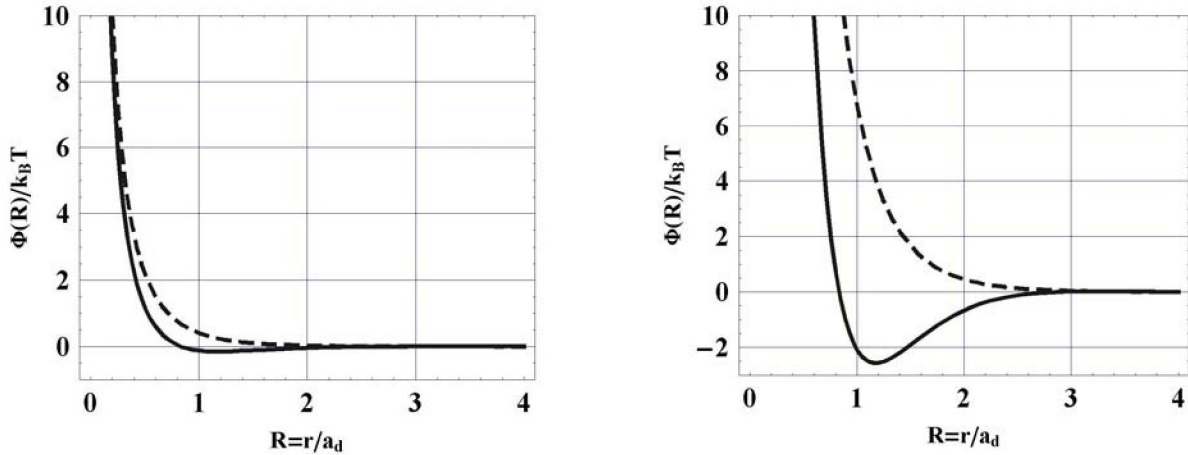


Рис. 2. Безразмерный потенциал взаимодействия частиц пылевой плазмы при $\kappa=2$ и $\Gamma=3$. Слева – $\Gamma_d=3$, справа – $\Gamma_d=50$. Пунктирная линия – потенциал Дебая–Хюккеля (6)

отталкивание пылевых частиц на малых расстояниях сменяется притяжением на больших. Подобное притяжение может приводить как к образованию пылевых комплексов, так и к формированию ближнего и дальнего порядка в системе. Рис. 1 и 2 демонстрируют, что по сравнению с потенциалом Дебая–Хюккеля (6) предложенное выражение практически совпадает с ним при малых значениях параметра связи пылевой компоненты. При больших значениях параметра связи пылевой компоненты уже наблюдается существенное различие, обусловленное появлением минимума, глубина которого в соответствии с видом $\Phi(r)$ (4) прямо пропорциональна Γ_d .

Немонотонное поведение потенциала имеет следующее физическое обоснование. Так как экранировка создается плазмой, то появление

минимума на потенциальной кривой напрямую связано с физическими условиями в среде. Пусть пылевая частица заряжена отрицательно, тогда она притягивает ионы, которые формируют облако вокруг нее, экранируя поле. Подобная картина остается справедливой как для случая идеальной плазмы, так и для неидеальной плазмы с сильным взаимодействием. Отличие последнего состоит в том, что в ионной системе наблюдается ближний порядок, т. е. появляется максимум плотности вероятности найти ионы на определенном расстоянии друг от друга, а значит ионы стремятся расположиться ближе друг к другу. Таким образом, экранирующее облако ионов вокруг пылевой частицы уплотняется, что приводит к немонотонному поведению потенциала взаимодействия пылевых частиц. В соответствии с этим

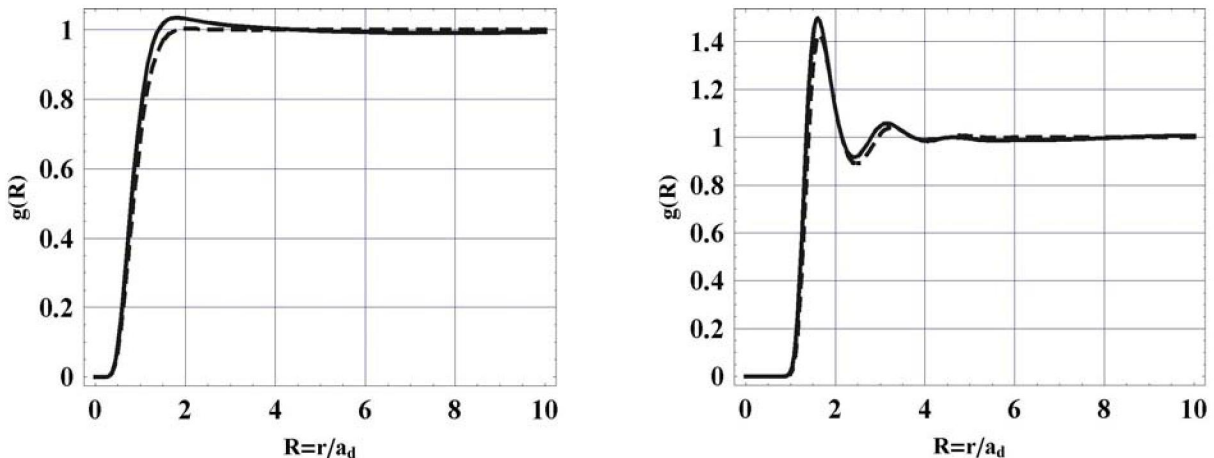


Рис. 3. Радиальная функция распределения пылевой компоненты при $\kappa=1$ и $\Gamma=3$. Слева – $\Gamma_d=3$, справа – $\Gamma_d=50$. Пунктирная линия – потенциал Дебая–Хюккеля (6)

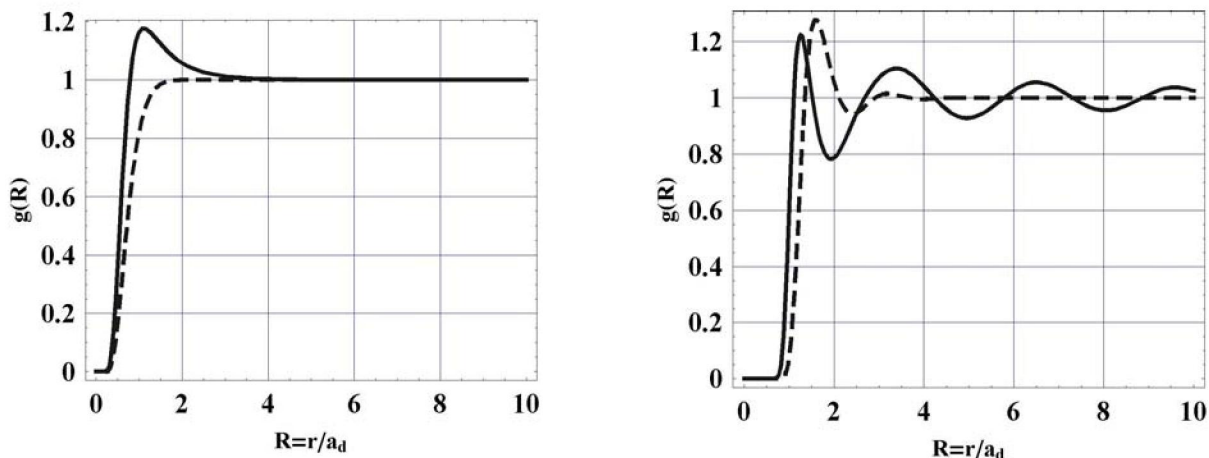


Рис. 4. Радиальная функция распределения пылевой компоненты при $\kappa = 2$ и $\Gamma = 3$. Слева – $\Gamma_d = 3$, справа – $\Gamma_d = 50$. Пунктирная линия – потенциал Дебая–Хюккеля (6)

снижение минимума потенциала при уменьшении параметра экранировки κ (ср. рис. 1 и 2) обусловлено уменьшением концентрации ионов [см. (2)], участвующих в экранировке поля.

Корреляции пылевых частиц в плазме. Так как потенциал взаимодействия частиц пылевой компоненты был определен выше, становится возможным и изучение корреляционных функций пылевых частиц. Для этого опять воспользуемся системой уравнений Орнштейна–Цернике в гиперцепном приближении (9). Численные результаты для радиальных функций распределения представлены ниже (рис. 3, 4). Видно, что при малых значениях параметра экранирования различие между ПХФ и ПЛП чисто количественное, однако с увеличением параметра экранирования наблюдаются существенные отклонения между ними, обусловленные возникновением притяжения пылевых частиц. Из рис. 4 видно, что при достаточно больших значениях параметра неидеальности ($\Gamma_d = 50$) наблюдается формирование упорядоченных структур. Ранее считалось, что образование такого порядка возможно только при $\Gamma_d > 170$.

Таким образом, учет неидеальности плазменной среды привел к существенно новым физическим выводам о том, что формирование ближнего и дальнего порядка в системе с пылевой компонентой возможно при гораздо меньших значениях параметра связи, чем считалось ранее.

Это подтверждается прямыми экспериментами российских ученых с пылевой плазмой газового разряда при криогенных температурах [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Ichimaru S., Mitake S., Ietomi H. Statistical Physics of dense plasmas: thermodynamics, transport coefficients and dynamic correlations // Physics Reports. 1987. V. 149. P. 91.
2. Форттов В.Е. и др. Плазменно-пылевые структуры при криогенных температурах // Доклады РАН. 2002. Т. 382. С. 50.

Резюме

Локалдық өрісті ескере отырып сызықты диэлектриктік әсер теориясы негізінде идеал плазмадағы тозаң бөлшектердің өзара әсерлеу моделі ұсынылған. Потенциалдың арақашықтыққа тәуілділігінің графигінде тозаң бөлшектер арасында тартылыс күшінің болатындығын көрсететін минимум пайда болады. Корреляциялық функцияларын зерттеу негізінде тозаң бөлшектер арасындағы байланыс өте күшті болмаған кезде де кристалдық құрылымдардың пайда болу мүмкіндігі көрсетілген.

Summary

The authors offer a model for non-ideal dusty plasma particle interaction based on the theory of the linear dielectric responses with the local field corrections. The existence of inter-dusty attraction force is observed from the existence of a local minimum of the potential curve. The correlation functions have been researched, and the formation of the crystal dusty structures is demonstrated as plausible already at relatively weak interactions of dusty particles.

НИИ ЭТФ КазНУ им. аль-Фараби,
г. Алматы

Поступила 7.02.06г.