

(НИИЭТФ, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы)

КОЛЕБАНИЯ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ В ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЕ

Аннотация

Проведено систематическое исследование микроскопических и динамических свойств пылевой плазмы методом ланжевеновой динамики на основе модели взаимодействия Юкава, учитывающей коллективные эффекты экранировки поля пылинки окружающей плазмой буферного газа.

В статье была исследована зависимость автокорреляционных функций скоростей пылинок от различных параметров систем, таких как параметры связи, экранировки и трения. При исследовании было выявлено, что время затухания автокорреляционной функции скоростей увеличивается с уменьшением параметра трения и с увеличением параметра экранировки, а также, что с увеличением параметра связи наблюдается появление осцилляций на автокорреляционных функциях скоростей, которые быстро затухают с увеличением параметра трения. Увеличение коэффициента трения при слабой связи может приводить к возникновению осцилляций, а в режиме сильной связи, наоборот, к их сглаживанию.

Ключевые слова: пылевая плазма, Ланжевенова динамика, автокорреляционная функция скоростей.

Кілт сөздер: тозаңды плазма, ланжевендік динамика, жылдамдықтардың автокорреляциялық функциясы.

Keywords: dusty plasma, Langevin dynamics, the velocity autocorrelation function.

Введение. Плазма с макрочастицами широко распространена в природе (планетарные кольца, кометные хвосты, межзвездные облака) и находит применение в технике (установки для плазменного травления при производстве микросхем в электронике, плазмо-химические реакторы, различные энергетические установки). Несмотря на то, что исследования такой плазмы имеют давнюю историю, в последние годы сформировалась новая область физики – физика пылевой плазмы. Сегодняшний интерес к пылевой плазме связан, прежде всего, с процессами самоорганизации и образования упорядоченных структур, так называемых плазменно-пылевых кристаллов [1-3].

Пылевая плазма является широко развивающейся областью исследований, включающей в себя фундаментальные вопросы физики плазмы, гидродинамики, кинетики фазовых переходов, нелинейной физики, физики твердого тела, а также прикладные проблемы (нанотехнологии, плазменные технологии, новые материалы).

В данной работе на основе моделирования ланжевеновой динамикой с потенциалом Юкава в качестве потенциала взаимодействия частиц пылевой плазмы осуществляются исследования зависимости автокорреляционных функций скоростей от различных параметров системы, таких как параметры связи, экранировки, трения.

Метод Ланжевеновой динамики. Метод Ланжевеновой динамики [4, 5] нашел свое широкое применение в изучении свойств пылевой плазмы. Моделирование пылевых частиц по пространственно-временным траекториям было выполнено на основе следующих уравнений:

$$m_d \frac{d^2 \vec{r}_i}{dt^2} = \sum_j \mathbf{e}_j F_{\text{int}}(r) \Big|_{r=|\vec{r}_i - \vec{r}_j|} \frac{\vec{r}_i - \vec{r}_j}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|} - m_d \nu_{fr} \frac{d\vec{r}_i}{dt} + \vec{F}_{br}(t), \quad (1)$$

здесь $F_{\text{int}}(r) = -\partial\Phi(r)/\partial r$ – сила, появляющаяся в результате взаимодействия с соседними окружающими пылевыми частицами; $r = |\vec{r}_i - \vec{r}_j|$ – межчастичное расстояние; $F_{br}(t)$ – случайная сила, которая учитывает случайные толчки окружающих плазменных частиц или другие стохастические процессы; ν_{fr} – коэффициент трения пылевых частиц, который определяет частоту их столкновений с нейтральными частицами окружающей плазмы; m_d – масса пылевой частицы; $\Phi(r)$ – парный потенциал взаимодействия макрочастиц.

В качестве межчастичного потенциала взаимодействия пылинок взят потенциал Юкава, в безразмерном виде он записывается так:

$$\Phi(R) = \frac{\Gamma}{R} e^{-\kappa R}, \quad (2)$$

где $\kappa = a/\lambda$ – коэффициент экранировки; $\Gamma = (Z_d e)^2 / (a k_B T_d)$ – параметр связи пылевой компоненты; $a = (3/4\pi n_d)^{1/3}$ – расстояние берется в единицах среднего расстояния между пылевыми частицами.

Время берется в единицах, обратных ленгмюровской пылевой частоте

$$\omega_d = \frac{\sqrt{4\pi n_d Z_d^2 e^2}}{m_d} \frac{\zeta}{\psi}^{1/2}. \text{ Безразмерный параметр трения } \theta = \frac{\nu_{fr}}{\omega_d} \text{ определяется через отношение}$$

коэффициента трения к частоте ленгмюровских плазменных колебаний пылинок

$$\omega_d = \frac{\sqrt{4\pi n_d Z_d^2 e^2}}{m_d} \frac{\zeta}{\psi}^{1/2}, \text{ скорость берется в единицах тепловой скорости частиц. Таким образом,}$$

поведение системы определяется тремя безразмерными параметрами Γ , k , θ .

Автокорреляционные функции динамических величин пылинок в широких диапазонах изменения различных параметров, характеризующих систему. Одной из важных динамических характеристик системы является автокорреляционная функция скоростей [6, 7], которую можно найти через следующее выражение:

$$A_{vv}(t) = \langle \bar{v}(t)\bar{v}(0) \rangle, \quad (3)$$

где скобки означают усреднение по ансамблю и по различным начальным моментам времени. Автокорреляционная функция скоростей демонстрирует затухание, что характеризуется временем затухания τ – время, за которое автокорреляционная функция уменьшается в e раз. Было показано, что с увеличением значения параметра связи время затухания τ уменьшается.

На рисунке 1 представлены автокорреляционные функции скоростей, полученные на основе Ланжеве-новой динамики при различных значениях k и θ , при постоянных значениях других параметров. Там же отложена линия, соответствующая уменьшению автокорреляционной функции в e раз. Как видно из этого рисунка, время затухания увеличивается с уменьшением θ и с увеличением параметра экранировки.

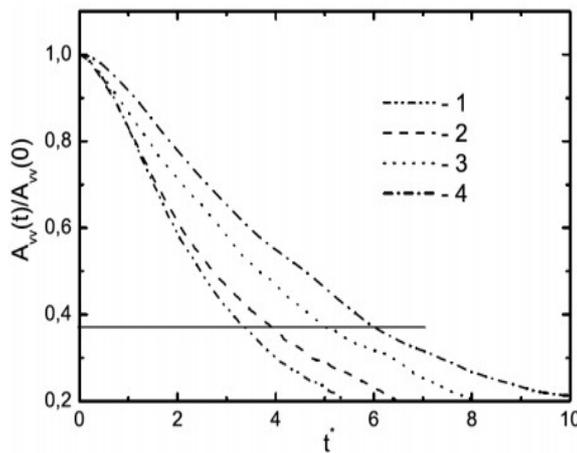


Рисунок 1 – АФС, полученные для разных k и θ при $\Gamma = 1$.

- 1) $\theta = 0,05, k = 0,1$, 2) $\theta = 0,05, k = 0,5$,
 3) $\theta = 0,05, k = 2$, 4) $\theta = 0,001, k = 2$. Здесь $t^* = t\omega_d$

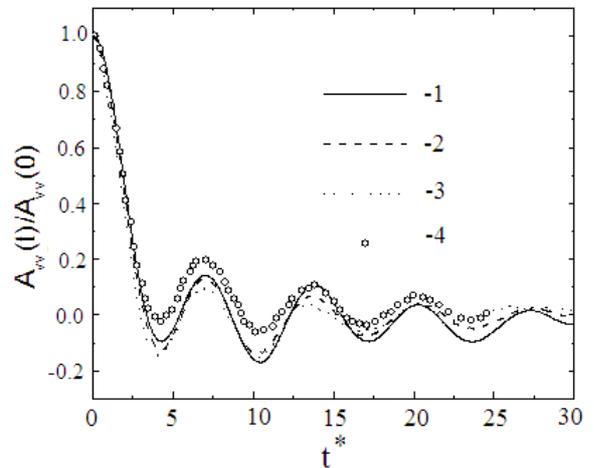


Рисунок 2 – Автокорреляционные функции скоростей, полученные для разных θ

- при $\Gamma = 50$ и $k = 0,1$. 1) $\theta = 0,001$, 2) $\theta = 0,05$,
 3) $\theta = 0,1$, 4) MD [5, 6]. Здесь $t^* = t\omega_d$

С увеличением параметра связи наблюдается появление осцилляций на АФС, что показано на рисунке 2 для $\Gamma = 50$. Сравнение с результатом МД моделирования [8,9], в рамках которого трение не учитывалось, дано на этом же рисунке. Из этого рисунка видно, что при одинаковых Γ и k , но разных θ , осцилляции быстрее затухают с увеличением θ . На рисунке 3 для анализа времени релаксации и глубины точки возврата представлены автокорреляционные функции скоростей при $\Gamma = 100$ и разных θ сфокусированные на первом затухании. А на рисунке 4 даны автокорреляционные

функции при $\Gamma = 5$ и тех же значениях θ . Из сравнения видно, что при больших значениях параметра связи увеличение трения в системе приводит к уменьшению глубины точки возврата колеблющейся частицы. Это объясняется тем, что столкновение пылинки с атомами и ионами приводят к тому, что пылинке даже в режиме сильной связи сложнее удержаться в пределах некоторого равновесного положения, вокруг которого она совершает колебательные движения, чем в случае, когда влияние плазмы не учитывается. А при малых значениях параметра связи, столкновения играют обратную роль, тормозя пылинки (отклоняя её от некоторого начального направления) и тем самым способствуя попаданию частицы в локальную потенциальную ямку небольшой глубины, так как Γ невелико, но в пределах которой уже становятся возможны возвратные движения пылинок, как видно из рисунка 4 при $\theta = 0,67$, но эти колебания, по-видимому, затухают сразу же после первого минимума.

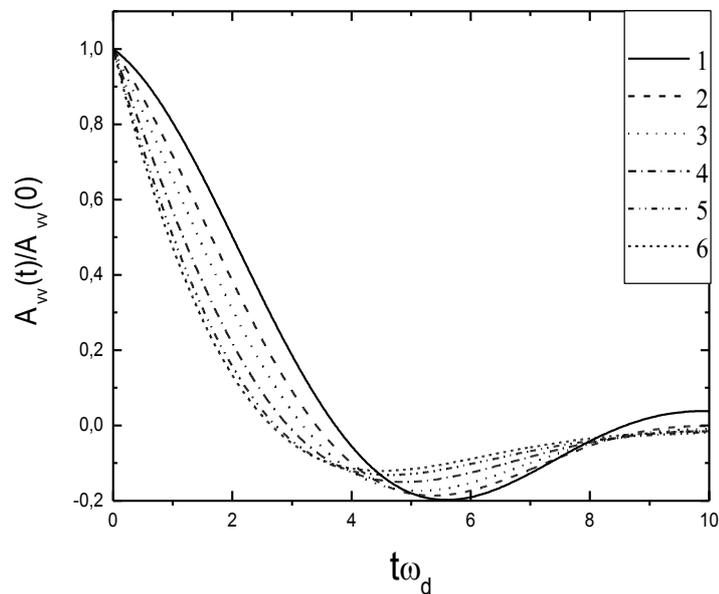


Рисунок 3 – Автокорреляционные функции скоростей, полученные для разных θ , при $\Gamma = 100$, $k = 2$, $Z = 5000$.

- 1) $\theta = 0,113$, 2) $\theta = 0,226$, 3) $\theta = 0,339$, 4) $\theta = 0,452$, 5) $\theta = 0,565$, 6) $\theta = 0,678$

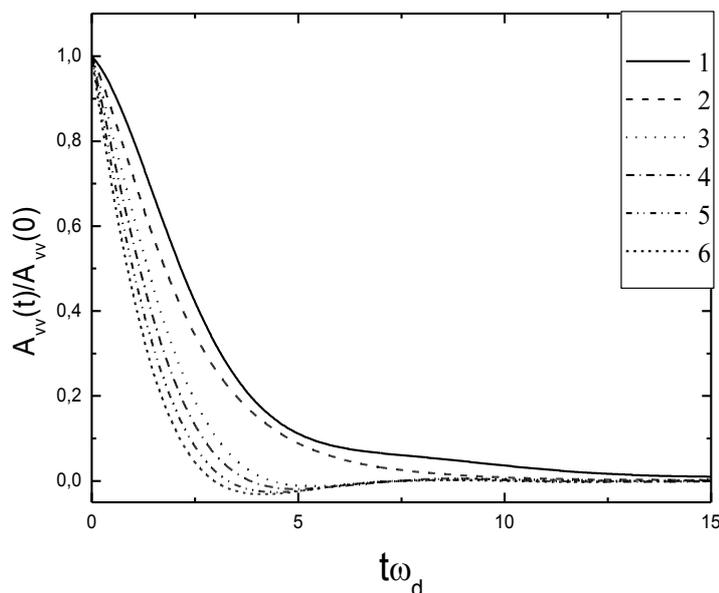


Рисунок 4 – Автокорреляционные функции скоростей, полученные для разных θ , при $\Gamma = 5$, $k = 2$, $Z = 5000$.

- 1) $\theta = 0,113$, 2) $\theta = 0,226$, 3) $\theta = 0,339$, 4) $\theta = 0,452$, 5) $\theta = 0,565$, 6) $\theta = 0,678$

Таким образом, в данной работе получены автокорреляционные функции скоростей пылевых частиц. В пылевой системе впервые замечено, что увеличение коэффициента трения при слабой связи может приводить к возникновению осцилляций, а в режиме сильной связи, наоборот, к их сглаживанию. На основе автокорреляционных функций скоростей могут быть исследованы коэффициент диффузии, частотный спектр колебаний.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Цытович В.Н. Плазменно-пылевые кристаллы, капли и облака // УФН. – 1997. – Т. 167. – С. 57.
- 2 Morfill G.E., Thomas H.M., Konopka U. and Zuzic M. The plasma condensation: Liquid and crystalline plasmas // Physics of Plasmas. – 1999. – Vol. 6, N 5. – P. 44-62.
- 3 Fortov V.E., Molotkov V.I., Nefedov A.P., et al. Formation of Liquidlike and Crystalline Structures in dusty Plasmas // IEED Transact. on Plasma Science. – 2001. – Vol. 29, N 2. – P. 210.
- 4 Рудяк В.Я., Харламов Г.В., Белкин А.А. Прямое численное моделирование процессов переноса в гетерогенных средах. I // Препринт НГАСУ. – 1998. – № 2(12). – С. 38.
- 5 Рудяк В.Я., Харламов Г.В., Белкин А.А. Прямое численное моделирование процессов переноса в гетерогенных средах. II. Диффузия наночастиц и макромолекул в плотных газах и жидкостях // Препринт НГАСУ. – 2000. – № 1(13). – С. 39.
- 6 Dzhumagulova K.N., Ramazanov T.S., Masheeva R.U. Velocity Autocorrelation Functions and Diffusion Coefficient of Dusty Component in Complex Plasmas // Contr. Plasma Phys. – 2012. – Vol. 52, N 3. – P. 182.

7 Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N., Dosbolaev M.K., Jumabekov A.N. Velocity autocorrelation functions of dusty particles obtained by the Langevin dynamics // 28th ICPIG. – 2007. – P. 253.

8 Ramazanov T. S., and Dzhumagulova K. N. Shear viscosity of dusty plasma obtained on the basis of the Langevin dynamics // *Contr. Plasma Phys.* – 2008. – Vol. 48. – P. 357.

9 Baimbetov F.B., Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N., Kadyrsizov E.R., Petrov O.F., Gavrikov A.V. Modelling of dusty plasma properties by computer simulation methods // *J. Phys.A: Math. And Gen.* – 2006. – Vol. 39. – P. 4521.

REFERENCES

1 Tsytoich V. N. Plasmennno-pylevye cristally, capli i oblaka. *UFN*. **1997**. T. 167. C. 57. (in Russ).

2 Morfill G.E., Thomas H.M., Konopka U. and Zuzic M. The plasma condensation: Liquid and crystalline plasmas. *Physics of Plasmas*. **1999**. Vol. 6. №5. P. 44-62.

3 Fortov V.E., Molotkov V.I., Nefedov A.P, et al. Formation of Liquidlike and Crystalline Structures in dusty Plasmas. *IEED Transact. on Plasma Science*. **2001**. Vol. 29. №2. P. 210.

4 Rudyak V. Ya. Kharlamov G. V., Belkin A.A. Prjamoe chislennoe modelirovanie protsessov perenosa v geterogennyh sredah I. *Preprint NGASU*. **1998**. № 2 (12). C. 38. (in Russ).

5 Rudyak V. Ya. Kharlamov G. V., Belkin A.A. Prjamoe chislennoe modelirovanie protsessov perenosa v geterogennyh sredah. II. Diffuzia nanochastits b micromolecul v plotnyh gazah i gidkostjah. *Preprint NGASU*. **2000**. № 1 (13). C. 39. (in Russ).

6 Dzhumagulova K.N., Ramazanov T.S., Masheeva R.U. Velocity Autocorrelation Functions and Diffusion Coefficient of Dusty Component in Complex Plasmas. *Contr. Plasma Phys.* **2012**. Vol. 52. № 3. P. 182.

7 Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N., Dosbolaev M.K., Jumabekov A.N. Velocity autocorrelation functions of dusty particles obtained by the Langevin dynamics. *28th ICPIG*. **2007**. P. 253.

8 Ramazanov T. S., and Dzhumagulova K. N. Shear viscosity of dusty plasma obtained on the basis of the Langevin dynamics. *Contr. Plasma Phys.* **2008**. Vol.48. P. 357.

9 Baimbetov F.B., Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N., Kadyrsizov E.R., Petrov O.F., Gavrikov A.V. Modelling of dusty plasma properties by computer simulation methods . *J.Phys.A: Math. And Gen.* **2006**. Vol. 39. P. 4521.

Резюме

Қ. Н. Жұмағұлова, Р. У. Машеева

(ЭТФҒЗИ, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ.)

ТОЗАҢДЫ БӨЛШЕКТЕРДІҢ ГАЗРАЗЯДТЫ ПЛАЗМАДАҒЫ ТЕРБЕЛІСІ

Ланжевендік динамика-компьютерлік әдісі арқылы, тозаңды бөлшек заряды өрісінің қоршап тұрған буферлі газ плазмасымен экрандалуының ұжымдық әсерлерін ескеретін Юкава әсерлесу үлгісінің негізінде, күрделі құрамды плазманың микроскопиялық және динамикалық қасиеттеріне жүйелі түрде зерттеулер жүргізілді.

Жұмыста тозаңшалар жылдамдықтары автокорреляциялық функцияларының жүйенің байланыс, экран-далу және үйкеліс сияқты параметрлерге тәуелділігі зерттелді. Зерттеу барысында жылдамдықтардың авто-корреляциялық функциясының сөну уақыты үйкеліс параметрі төмендеген сайын және экрандалу параметрі өскен сайын өседі, сонымен қатар, байланыс параметрі өскен сайын жылдамдықтардың автокорреляциялық функцияларында осцилляция пайда болатындығы байқалды, бірақ бұл осцилляция үйкеліс параметрі өскен сайын жылдам сөнеді. Әлсіз байланыс кезіндегі үйкеліс коэффициентінің өсуі осцилляцияның пайда болуына, тығыз байланыс кезінде, керісінше, олардың тегістелуіне әкеледі.

Кілт сөздер: тозаңды плазма, ланжевендік динамика, жылдамдықтардың автокорреляциялық функциясы.

Summary

K. N. Dzhumagulova, R. U. Masheeva

(IETP, Al-Farabi Kazakh national university, Almaty)

OSCILLATIONS OF THE DUST PARTICLES IN THE GAS DISCHARGE PLASMAS

The microscopic and dynamic properties of the dust plasma by the langevin dynamics method on the basis of Yukawa interaction model, which takes into account the collective effects of screening of the field of dusty particles charge by the surrounding plasma of buffer gas, were systematic investigated.

In this article the dependencies of velocity autocorrelation functions on the system parameters such as coupling parameter, screening and friction parameters were investigated. In the study it was found, that the relaxation time of the velocity autocorrelation function increases with decrease of the friction parameter and with increase of the screening parameter, and also the increase of the coupling parameter can cause the appearance of the oscillations, which is more rapidly decay with increase of the friction parameter. It was presented, that, at weak coupling the increase in the friction coefficient can cause the oscillations appearance, but at strongly coupled regime they are flatten.

Keywords: dusty plasma, Langevin dynamics, the velocity autocorrelation function.

Поступила 27.03.2013г.