

Джумагулова К.Н.,
Рамазанов Т.С., Машеева Р.У.,
Донко З.

Влияние внешнего магнитного поля на автокорреляционные функции скоростей пылевых частиц

Было исследовано влияние внешнего магнитного поля на поведение автокорреляционных функций скоростей частиц в двумерной сильно связанной системе Юкава. Для исследования был использован метод молекулярной динамики, в котором временная эволюция системы взаимодействующих частиц отслеживается интегрированием их уравнений движения. Все результаты были получены для разного значения параметров системы (параметр связи, параметр магнитного поля, параметр экранировки). На характер автокорреляционных функций скоростей влияет как учет магнитного поля, так же увеличение связи в системе.

Ключевые слова: пылевая плазма, автокорреляционная функция скоростей, магнитное поле.

Dzhumagulova K.N.,
Ramazanov T.S., Masheyeva R.U.,
Donkó Z.

Effect of magnetic field on the velocity autocorrelation function of dust particles

We investigate the effect of an external magnetic field on the velocity autocorrelation function of the particles in a two-dimensional strongly coupled Yukawa system, via numerical simulations. The results were obtained for various values of system parameters (coupling parameter, screening coefficient, strength of magnetic field). The velocity autocorrelation function affects by the magnetic field, and by the coupling in the system.

Key words: dusty plasma, velocity autocorrelation functions, magnetic field

Жұмағұлова Қ.Н.,
Рамазанов Т.С., Машеева Р.У.,
Донко З.

Тозаңды бөлшектердің автокорреляциялық функциясына сыртқы магнит өрісінің әсері

Екі өлшемді күшті байланысқан Юкава жүйесінің бөлшектерінің жылдамдықтарының автокорреляциялық функциясының сипатына сыртқы магнит өрісінің әсері зерттелген. Зерттеу әдісі ретінде молекулалық динамика әдісі қолданылды. Бұл әдісте әсерлесетін бөлшектер жүйесінің уақыт бойынша эволюциясы бақыланады. Барлық нәтижелер жүйенің параметрлерінің (байланыс параметрі, магнит өрісінің параметрі, экрандалу параметрі) әртүрлі мәндерінде алынған. Жылдамдықтардың автокорреляциялық функциясына магнит өрісі де, байланыс параметрі де әсерін тигізеді.

Түйін сөздер: тозаңды плазма, жылдамдықтардың автокорреляциялық функциясы, магнит өрісі.

¹ НИИЭТФ, Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
Республика Казахстан, г. Алматы² Институт физики твердого тела и оптики,
Вигнеровский исследовательский центр Академии наук Венгрии,
Будапешт, Венгрия

*E-mail: dzhumagulova.karlygash@gmail.ru

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА АВТОКОРРЕЛЯЦИ- ОННЫЕ ФУНКЦИИ СКОРОСТЕЙ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ

Введение

Сильно связанная плазма включает в себе большой класс физических систем, в которых соотношение потенциальной и кинетической энергии выражается с помощью параметра связи Γ , превышающего 1. Пылевая плазма [1] – примечательный вид многочастичной неидеальной системы, которая встречается в астрофизических средах, также может быть реализована в лабораторных условиях. В лабораторных установках пылевые частицы могут расти в реактивной плазменной среде либо преднамеренно вводиться в плазму. В последнем случае может быть реализована как трехмерная, так и двумерная конфигурация частиц. В условиях микрогравитации предпочтительнее трехмерные установки, в то время как в присутствии силы тяжести регулярно образуются конфигурации меньшей размерности.

Двумерный слой частиц может быть реализован в обычных установках [2]. При этом положения частиц определяются с помощью баланса основных сил, действующих на частицы, это обычно электростатическая сила, гравитационная сила и сила ионного увлечения. Дополнительные силы, например термофоретическая, сила могут резко изменить конфигурацию частиц и реализовать трехмерную структуру в присутствии теплового градиента фонового газа. Широкий спектр физических явлений, например формирование двумерного кристалла и плавление, процессы переноса [3], а также распространение волн [4], были тщательно исследованы с помощью экспериментальных, теоретических и численных методов.

Влияние магнитного поля на сильно связанную пылевую плазму стало важной темой в последние несколько лет [5-7]. Теоретические и численные исследования показали формирование магнитоплазмонов и их высших гармоник в сильно связанных Кулоновской и Юкавовской системах [5].

Детальные исследования влияния магнитного поля на коллективные возбуждения и самодиффузию были представлены, соответственно, в [6] и [7]. Влияние магнитного поля на бинарные Юкавовские системы было изучено в [8].

Эксперименты, направленные на реализацию намагниченной пылевой плазмы, столкнулись с серьезными трудностями, так как внешние магнитные поля вызывают значительные возмущения в самой плазме и серьезно влияют на динамику пылевой системы [9]. Альтернативный метод исследования влияния магнитного поля был предложен в [10], он основан на эквивалентности магнитной силы Лоренца и силы инерции Кориолиса, действующей на движущиеся объекты, когда они рассматриваются во вращающейся системе отсчета. Экспериментальная реализация вращающейся пылевой плазмы подтвердила теоретические предсказания и доказала формирование магнетоплазмов [11] в "намагниченной" пылевой плазме. Отметим, что в намагниченной сильно связанной плазме многие эффекты качественно отличаются от наблюдаемых и хорошо известных эффектов в слабо связанной плазме, из-за влияния магнитного поля и сильной связи одновременно.

В данной работе было исследовано влияние магнитного поля на поведение автокорреляционных функций скоростей в широком диапазоне изменения параметров системы. Исследования были проведены с помощью метода молекулярной динамики.

Модель и метод моделирования

Было исследовано влияние магнитного поля на многочастичные системы, где частицы взаимодействуют с помощью экранированного Кулоновского (потенциал Дебая-Хюкеля или Юкава) потенциала:

$$\phi(r) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \frac{\exp(-r/\lambda_D)}{r}, \quad (1)$$

где Q – заряд частиц и λ_D – Дебаевская длина экранировки. Соотношение межчастичной потенциальной энергий и тепловой энергий выражается через параметр связи:

$$\Gamma = \frac{Q^2}{4\pi\epsilon_0 a k_B T}, \quad (2)$$

здесь T – температура, $\kappa = a/\lambda_D$ – параметр экранировки, $a = (1/\pi n)^{1/2}$ – двумерный радиус Вигнера-Зейтца и n – плотность частиц.

Для описания движения частиц был использован метод молекулярной динамики. Для интегрирования уравнения движения частиц в присутствии магнитного поля использован метод, описанный в работе [12]. Число частиц $N = 4000$. Частицы движутся в плоскости (x, y) и предполагается, что магнитное поле однородное и направлено перпендикулярно двумерному слою (2D) частиц, то есть $\vec{B} = (0, 0, B)$. Параметр магнитного поля выражается следующим образом:

$$\beta = \frac{\omega_c}{\omega_p}, \quad (3)$$

где $\omega_c = QB/m$ – циклотронная и $\omega_p = \sqrt{nQ^2/2\epsilon m a}$ – 2D плазменная частота. Отметим, что ларморовский радиус становится меньше радиуса Вигнера-Зейтца при $\beta \geq 0.1$.

Автокорреляционная функция скоростей определяется (АФС) как:

$$A_{vv}(t) = \langle \vec{v}(t) \vec{v}(0) \rangle, \quad (4)$$

тогда как ее нормированное значение ($A_{vv}(0) = 1$) выражается:

$$\bar{A}_{vv}(t) = \frac{\langle \vec{v}(t) \vec{v}(0) \rangle}{\langle \vec{v}(0) \vec{v}(0) \rangle}, \quad (5)$$

Фурье-преобразование АФС определяется следующим образом:

$$A_{vv}(\omega) = \int_0^\infty A_{vv}(t) e^{i\omega t} dt, \quad (6)$$

и рассчитывается путем замены верхнего предела интеграла на t_{\max} , для которого $A_{vv} \cong 0$ при $t > t_{\max}$.

Результаты

Влияние внешнего магнитного поля на поведение автокорреляционных функций скоростей представлено на рисунке 1 при $\Gamma = 120$ и $\kappa = 2$. При $\beta = 0$ автокорреляционная функция скоростей имеет несколько колебаний, описывающих локализованное колебание частиц. С учетом магнитного поля экстремумы автокорреляционных функций скоростей увеличиваются.

Серия нормированных автокорреляционных функций скоростей при разных значениях параметра магнитного поля при фиксированных значениях $\Gamma = 120$ и $\kappa = 1$ представлены на рисунке 2. Данные показывают, что с учетом влияния магнитного поля поведение $A_{vv}(t)$ значительно меняется. Колебания автокорреляционных функций скоростей сохраняются дольше с увеличением параметра магнитного поля.

Результаты исследования влияния сильной связи в системе на нормированные автокорреляционные функции скоростей при фиксированном значении параметра магнитного поля $\beta = 0.5$ показаны на рисунке 3 для $\kappa = 1$. Данные автокорреляционных функций скоростей в зависимости от времени показывают устойчивую корреляцию при сильной связи.

Заключение

Было исследовано влияние внешнего магнитного поля на поведение автокорреляционных функций скоростей частиц в двумерной сильно связанной системе Юкава с помощью численных методов. Автокорреляционные функции скоростей проанализированы в зависимости от времени в широком диапазоне изменения параметров системы. Без учета магнитного поля автокорреляционная функция имеет монотонный характер, который характеризует локализованное колебание частиц. Колебания автокорреляционных функций скоростей сохраняются дольше с увеличением параметра магнитного поля, также данные показывают устойчивую корреляцию при сильной связи.

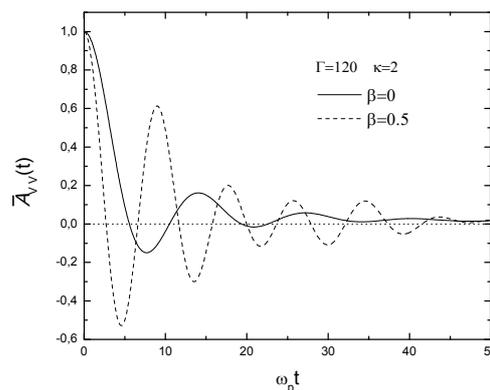


Рисунок 1 – Нормированные автокорреляционные функции скоростей при $\beta = 0$ и $\beta = 0.5$, для $\Gamma = 120, \kappa = 2$

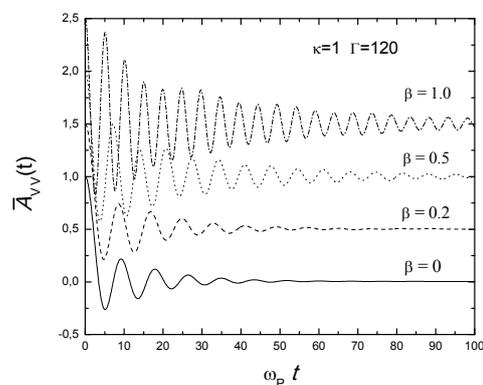


Рисунок 2 – Нормированные автокорреляционные функции скоростей при $\Gamma = 120, \kappa = 1$ для разных значений β

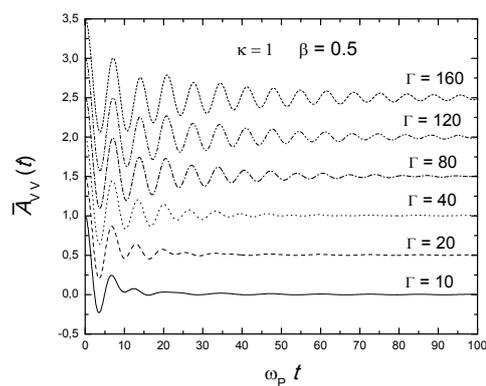


Рисунок 3 – Нормированные автокорреляционные функции скоростей при $\beta = 0.5, \kappa = 1$ для разных значений Γ

References

- 1 Bonitz M., Horing N., and Ludwig P. Introduction to complex plasmas // *Optical and Plasma Physics*. -2010. – Vol. 59.
- 2 Thomas H., Morfill G. E., Demmel V., Goree J., Feuerbacher B., and Möhlmann D. Plasma crystal: coulomb crystallization in a dusty plasma // *Phys. Rev. Lett.* – 1994. – Vol. 73. P. 652.
- 3 Ramazanov T. S. and Dzhumagulova K. N. Shear viscosity of dusty plasma obtained on the basis of the langevin dynamics // *Contrib. Plasma Phys.* – 2008. – Vol. 48. – P. 357; Dzhumagulova K. N., Ramazanov T. S., and Masheeva R. U. Velocity autocorrelation functions and diffusion coefficient of dusty component in complex plasmas // *Contrib. Plasma Phys.* – 2010. – Vol. 52. – P. 182.
- 4 Kalman G., Rosenberg M., and DeWitt H. E. Collective modes in strongly correlated yukawa liquids: waves in dusty plasmas // *Phys. Rev. Lett.* – 2000. – Vol. 84. – P. 6030; Zhdanov S., Nunomura S., Samsonov D., and Morfill G. E. Tsunami in a complex plasma // *Phys. Rev. E.* – 2003. – Vol. 68. – P. 035401.
- 5 Bonitz M., Donkó Z., Ott T., Kählert H., and Hartmann P. Nonlinear magnetoplasmons in strongly coupled Yukawa plasmas // *Phys. Rev. Lett.* – 2010. – Vol. 105. – P. 055002; Ott T., Bonitz M., Hartmann P., and Donkó Z. Higher harmonics of the magnetoplasmon in strongly coupled Coulomb and Yukawa systems // *Phys. Rev. E.* – 2011. – Vol. 83. – P. 046403.
- 6 Ott T., Baiko D.A., Kählert H., and Bonitz M. Wave spectra of a strongly coupled magnetized one-component plasma: Quasilocalized charge approximation versus harmonic lattice theory and molecular dynamics // *Phys. Rev. E.* – 2013. – Vol. 87. – P. 043102.
- 7 Ott T. and Bonitz M. Diffusion in a strongly coupled magnetized plasma // *Phys. Rev. Lett.* 2011. – Vol. 107 – P. 135003.
- 8 Ott T., Löwen H., and Bonitz M. Dynamics of two-dimensional one-component and binary Yukawa systems in a magnetic field // *Phys. Rev. E.* – 2014. – Vol. 89. – P. 013105.
- 9 Konopka U., Samsonov D., Ivlev A.V., Goree J., Steinberg V., and Morfill G.E. Rigid and differential plasma crystal rotation induced by magnetic fields // *Phys. Rev. E.* – 2000. – Vol. 61. – P. 1890; Schwabe M., Konopka U., Bandyopadhyay P., and Morfill G. E. Pattern formation in a complex plasma in high magnetic fields // *Phys. Rev. Lett.* 2011. – Vol. 106. – P. 215004.
- 10 Kählert H., Carstensen J., Bonitz M., Löwen H., Greiner F., and Piel A. Magnetizing a complex plasma without a magnetic field // *Phys. Rev. Lett. E.* – 2012. – Vol. 109. – P. 155003;
- 11 Hartmann P., Donkó Z., Ott T., Kählert H., and Bonitz M. Magnetoplasmons in Rotating Dusty Plasmas // *Phys. Rev. Lett.* – 2013. – Vol. 111. – P. 155002.
- 12 Spreiter Q. and Walter M. Classical molecular dynamics simulation with the velocity verlet algorithm at strong external magnetic fields // *J. Comput. Phys.* – 1999. – Vol. 152 – P. 102.