

Машеева Р.У. *, Джумагулова К.Н., Шаленов Е.О.

Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики,
Казахстан, г. Алматы, *e-mail: masheyeva.ranna@gmail.com

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЫ ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

В данной работе рассказывается о разработанном автоматизированном комплексе компьютерных программ по исследованию и моделированию физических свойств магнитоактивной плазмы. Компьютерное моделирование системы было проведено на основе молекулярной динамики с учетом влияния внешнего однородного магнитного поля. Частицы системы взаимодействуют с помощью потенциала Юкавы. Комплекс разработан в среде объектно-ориентированного программирования Borland Delphi7 с использованием дополнительных компонентов. Комплекс состоит из нескольких приложений, с помощью которых можно исследовать динамические и структурные свойства пылевой плазмы во внешнем магнитном поле. Комплекс обеспечивает передачу информации между пользователем-человеком и программно-аппаратными компонентами компьютерной системы, делает общение пользователя с компьютером простым и естественным, на сколько это возможно. Интерфейс максимально приближен пользователю, и пользователь полностью может управлять за ходом действия программы. Для того, чтобы максимально приблизить интерфейс к пользователю, были использованы привычные терминологии, настрой на реалии пользователя, дружелюбие интерфейса и прозрачность интерфейса. Во время расчетов с помощью автоматизированного комплекса можно менять параметры системы, получить график полученных результатов, остановить и выйти из программы. На основе данного комплекса получено авторское свидетельство «Magnetized Dusty Plasma».

Ключевые слова: молекулярная динамика, пылевая плазма, магнитное поле, автоматизированный комплекс.

Masheyeva R.U. *, Dzhumagulova K.N., Shalenov E.O.

Al-Farabi Kazakh National University, Institute of Experimental and Theoretical Physics,
Kazakhstan, Almaty, *e-mail: masheyeva.ranna@gmail.com

Automated complex for investigation the properties of dusty plasma in external magnetic field

This chapter discusses the developed automated complex of computer programs for the investigation and simulation of the physical properties of magnetized dusty plasma. Computer simulation of the system was carried out on the basis of molecular dynamics, taking into account the influence of an external uniform magnetic field. The particles of the system interact with the potential of Yukawa. The complex was developed in the Borland Delphi7 object-oriented programming environment, using additional components. The complex consists of several subprograms with the help of which one can investigate the dynamic and structural properties of dusty plasma in an external magnetic field. The complex provides the transfer of information between the user-person and the software and hardware components of the computer system, makes communication with the computer as simple and natural as possible. The interface is as close as possible to the user, and the user can fully control the course of the program. In order to bring the interface as close as possible to the user, familiar terminology, customization of the user's reality, user-friendly interface and interface transparency were used. During calculations using an automated complex, you can change the system parameters, draw a graph of the results obtained, stop and exit the program. On the basis of this complex, the author's certificate "Magnetized Dusty Plasma" was obtained.

Key words: molecular dynamics, dusty plasma, magnetic field, automated complex.

Машеева Р.У.* , Жұмағұлова Қ.Н., Шаленов Е.О.

әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
Эксперименттік және теориялық физика ғылыми-зерттеу институты,
Қазақстан, Алматы қ., *e-mail: masheyeva.ranna@gmail.com

Сыртқы магнит өрісіндегі тозаңды плазманың қасиеттерін зерттеуге арналған автоматталған комплекс

Жұмыста магнитті белсенді плазманың физикалық қасиеттерін модельдеу және зерттеу бойынша компьютерлік программалардың құрастырылған автоматты комплексі қарастырылады. Сыртқы біртекті магнит өрісінің әсерін ескеруімен молекулалық динамика негізінде жүйенің компьютерлік модельдеуі өткізілді. Жүйенің бөлшектері бір-бірімен Юкава потенциалының көмегімен әрекеттеседі. Комплекс нысанға бағытталған Borland Delphi7 программалау ортасында құрастырылды және қосымша компоненттердің көмегімен құрылды. Ол сыртқы магнит өрісіндегі тозаңды плазманың құрылымдық және динамикалық қасиеттерін зерттеуге мүмкіндік беретін қосымша программалардан тұрады. Комплекс компьютерлік жүйенің тұтынушы-адам және программды-аппаратты компоненттер арасында мүмкіндігінше ақпаратты беруді қамтамасыз етеді. Интерфейс барынша тұтынушыға жақындатылған және тұтынушы программаның орындалуы барысында барлығын толықтай басқарады. Интерфейсті тұтынушыға жақындату мақсатында күнделікті терминология, қолданушы нақты жұмысына келтіру, интерфейсін айқынддылығы қолданылды. Автоматтық комплексті қолдану арқылы есептеулерді жүргізу барысында жүйенің параметрлерін өзгертуге, алынған нәтижелердің сызбасын сызуға, программаны тоқтатып және программадан шығуға мүмкіндік береді. Осы комплекстің негізінде «Magnetized Dusty Plasma» авторлық құқығы алынды.

Түйін сөздер: молекулалық динамика, тозаңды плазма, магнит өрісі, автоматталған комплекс.

Введение

Пылевая плазма представляет собой ионизированный газ с находящимися в нем заряженными частицами вещества микронных размеров (пыль). Исследование свойств пылевой плазмы [1-5] является крайне актуальным на сегодняшний день, что продиктовано как прикладной важностью, так и широкой распространённостью пылевой плазмы в природе.

А вопрос о том, как влияет магнитное поле на динамические, транспортные и структурные свойства ансамбля заряженных частиц представляет большой интерес для широкого спектра физических систем и задач [6-10]. Особое внимание привлекает случай сильной связи, т.е. когда кулоновское взаимодействие превышает кинетическую энергию. Пылевая плазма, образующаяся, в частности, в пристеночной области установок УТС, как раз и представляет собой сильно связанную магнитоактивную плазму.

Новизна работы заключается в детальном изучении и моделировании явления локализации частиц в режиме сильной связи в сильном магнитном поле с помощью, так называемых кейгеновых автокорреляционных функций [11-15]. Этот относительно новый термин от английского слова «Cage», означающего “клетка, садок”, был введен Эраном Рабани и получил

развитие в связи с прямой корреляцией с процессом диффузии многочастичных системах.

Математическая модель исследования свойств пылевой плазмы во внешнем однородном магнитном поле построена на основе метода молекулярной динамики [16-19] (ланжевенной динамики в случае, если учитываются сила трения со стороны буферной плазмы и случайная броуновская сила). Для интегрирования уравнений движения частиц был использован разностный алгоритм Верле, который незаменим при моделировании физических процессов в реальном времени.

Компьютерное моделирование является одним из мощных средств изучения свойств и поведения многочастичных систем, особенно в том случае, когда использование других теоретических подходов затруднительно. Так же большим преимуществом компьютерного моделирования является возможность исследования свойств системы в условиях, близких к реальному эксперименту, но не требующих столь больших экономических затрат.

На сегодняшний день использование информационных технологий в физике плазмы является одним из бурно развивающихся трендов. В связи с этим, был разработан автоматизированный комплекс компьютерных программ по исследованию и моделированию физических

свойств магнитоактивной плазмы. Комплекс разработан в среде объектно-ориентированного программирования Borland Delphi7, с использованием дополнительных компонентов. Комплекс состоит из нескольких подпрограмм, с помощью которых можно исследовать динамические и структурные свойства пылевой плазмы во внешнем магнитном поле.

Интерфейс программы предоставляет пользователю возможность задавать параметры задачи, следить за ходом расчетов, остановить программу, и сохранить полученные расчеты в текстовый файл. После окончания времени расчета результаты можно представить в виде графика.

Теория и результаты

Математическая модель основывается на использовании стандартного метода молекулярной динамики (МД) [20-22] а также специально подобранных уравнений для обработки данных компьютерного эксперимента. С помощью МД метода можно отследить временную эволюцию системы взаимодействующих частиц на основе интегрирования их уравнений движения. Уравнение движения пылевых частиц с учетом влияния магнитного поля записывается следующим образом:

$$m_d \frac{d^2 \vec{r}_i}{dt^2} = \sum_{i \neq j} \vec{F}_{ij}(t) + Q[\dot{\vec{r}} \times \vec{B}], \quad (1)$$

где первый член в правой части – сила $\vec{F}_{\text{int}}(r)$ взаимодействия, появляющаяся в результате взаимодействия с соседними окружающими пылевыми частицами, второй член – сила Лоренца, учитывающая влияние внешнего магнитного поля, сила взаимодействия определяется как $F_{\text{int}}(r) = -\partial\Phi(r) / \partial r$, $r = |\vec{r}_i - \vec{r}_j|$ – межчастичное расстояние; m – масса пылевой частицы.

Ниже будет приведен алгоритм метода молекулярной динамики для двумерного случая. Для трехмерной системы используется тот же самый алгоритм, но с переходом к кубической базовой ячейке и переопределением некоторых параметров, таких как среднее расстояние между частицами, плазменная частота и др.

Взаимодействие пылинок описывалось на основе экранированного потенциала Кулона,

часто упонимаемом в литературе как потенциал Дебая-Хюккеля или потенциал Юкава [23-25]:

$$\phi(r) = \frac{Q^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{\exp(-r/\lambda_D)}{r}, \quad (2)$$

здесь Q – заряд частиц и $\lambda_D = \left(\frac{nQ^2}{\epsilon k_B T} \right)^{-1/2}$ –

Дебаевская длина экранировки. Отношение между межчастичной потенциальной энергией и тепловой энергией выражается через параметр связи: $\Gamma = Q^2 / 4\pi\epsilon_0 a k_B T$, где T – температура, $\kappa = a / \lambda_D$ – параметр экранировки, для двумерной системы $a = (1/\pi n)^{-1/2}$ – радиус Вигнера-Зейтца (среднее расстояние между частицами), n – плотность частиц.

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

Время берется в единицах, обратных плазменной частоте пылевых частиц, а скорость в единицах тепловой скорости частиц

$$v_T = (k_B T / m)^{-1/2}. \quad (3)$$

Для реализации метода молекулярной динамики все пространство разбивается на равные ячейки (квадраты), т.е. частицы двигаются в плоскости (x,y) и предполагается, что магнитное поле однородно и направлено перпендикулярно двумерному слою частиц, то есть $\vec{B} = (0, 0, B)$. Одна из ячеек считается базовой, остальные – копии (реплики). Конфигурации частиц базовой ячейки повторяются во всех остальных ячейках. На базовую ячейку и на реплики были наложены периодические граничные условия, количество частиц в ячейке бралось равным $N = 4000$. Начальное распределение компонент координат и скоростей частиц берется случайным, однако компоненты скоростей должны быть распределены по гауссовскому закону с заданной температурой. На первом этапе моделирования система должна перейти в равновесное состояние, что происходит достаточно быстро. Так как моделирование проводится для канонического

ансамбля, используется термостат для поддержания постоянной температуры. После того, как в системе достигается равновесие, начинается сбор данных о скоростях и координатах частиц, эти данные необходимы для дальнейших вычис-

лений. Таким образом, алгоритм выполнения компьютерного моделирования МД состоит из следующих этапов.

Основное окно программного комплекса продемонстрировано на рисунке 1.



Рисунок 1 – Основное окно автоматизированного комплекса

Программный интерфейс для исследования динамических свойств пылевой плазмы. С помощью данных о микроскопических свойствах системы, а именно скоростях пылевых частиц, можно исследовать автокорреляционную функцию скоростей (АФС), которая является одной из важных динамических [26-27] характеристик системы. Данная функция вычисляется на основе следующего уравнения:

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

где скобки означают усреднение по ансамблю и по различным начальным моментам времени. А ее нормированное значение ($A_{vv}(0)=1$) выражается следующим образом:

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

По виду автокорреляционных функций скоростей можно судить о наличии каких-либо автоколебаний в системе, а также можно вычислить коэффициент диффузии на основе метода Грина-Кубо. В основе этого метода лежит следующее выражение:

$$D(t) = \frac{1}{d} \int_0^t A_{vv} dt, \quad (6)$$

здесь d – размерность системы. Интерфейс загрузки программы по расчету автокорреляционной функции скоростей пылевых частиц приведен на рисунке 2. А по расчету коэффициента диффузии представлен на рисунке 3.

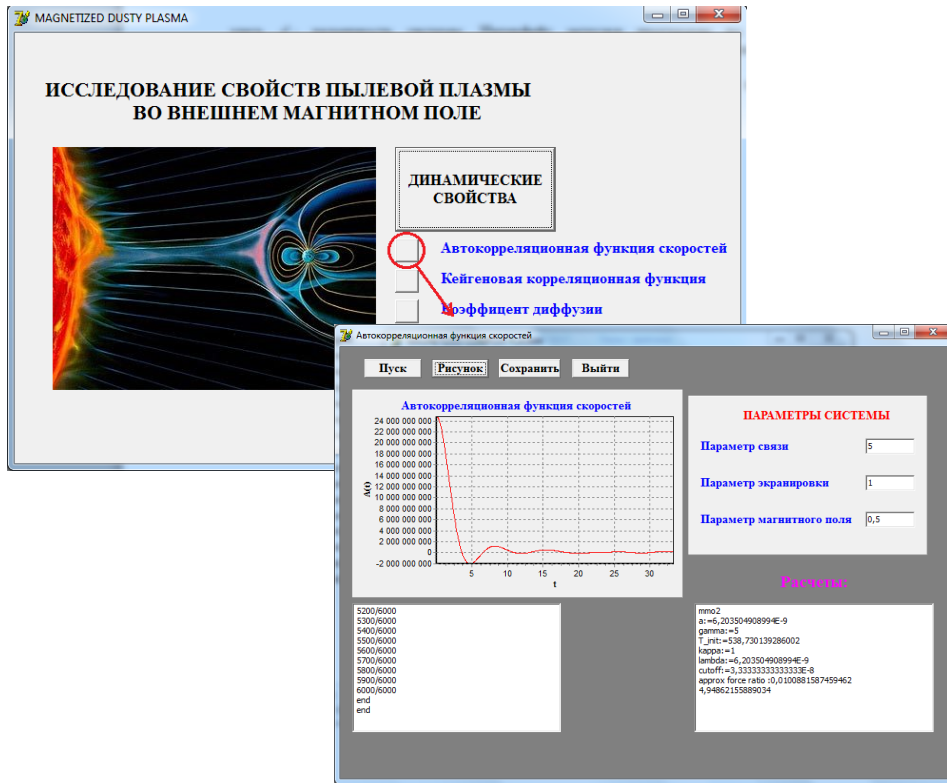


Рисунок 2 – Интерфейс для вычисления автокорреляционных функций скоростей

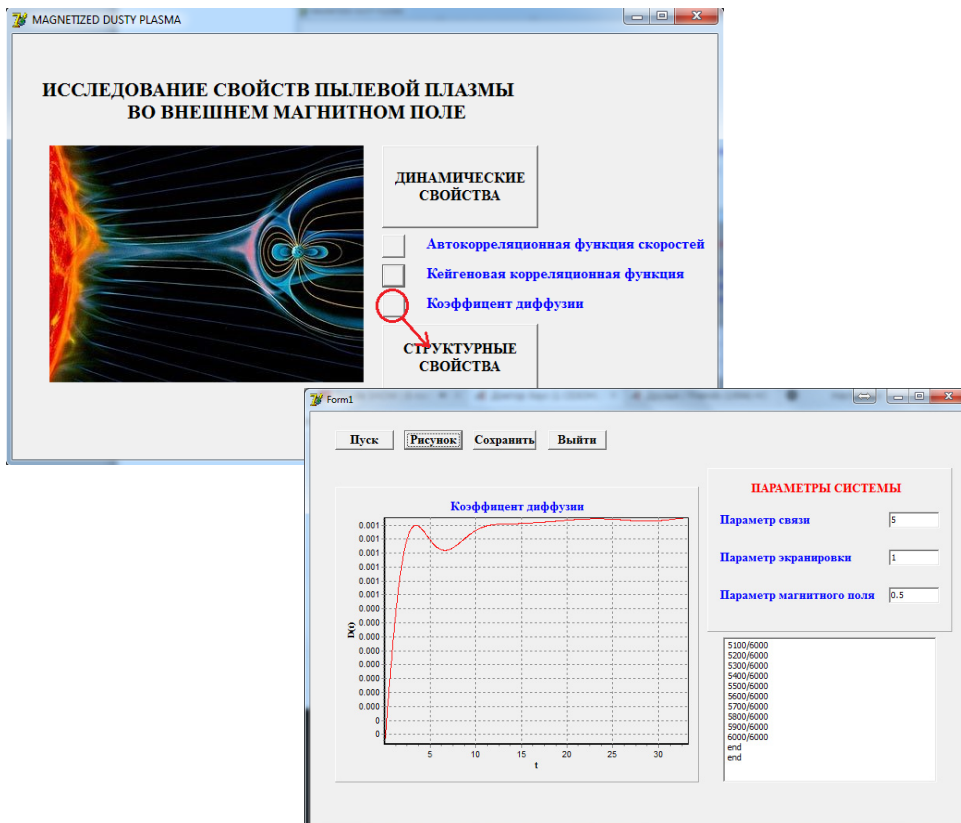


Рисунок 3 – Интерфейс для расчета коэффициента диффузии

Для исследования локализации частиц отслеживается изменение окружения отдельной частицы с помощью корреляционного метода. Список соседей l_i частицы i определяется следующим образом:

$$l_i = \{f(r_{i,1}), f(r_{i,2}) \dots f(r_{i,N})\} \quad (7)$$

где $f(r_{i,j}) = \Theta(r_c - r_{i,j})$ и Θ – функция Хевисайда (т.е. если $f = 1$ $r_{i,j} \leq r_c$, и $f = 0$ в противном случае). Здесь r_c – радиус клетки (сферической формы), и условие $r_{i,j} \leq r_c$ означает, что частицы близко расположены друг к другу.

В данном случае радиус клетки равен $r_c = 2.42$, который приблизительно равен расстоянию первого минимума парной корреляционной функции $g(r)$ при больших значениях параметра связи. Выбор данного значения означает, что соседние частицы расположены в первой координатной оболочке. Наши

вычисления $\int_0^{r_c} rg(r)dr$ координационного числа

привели к значениям приближенным к значению 14, которое является количеством первичных ближайших и вторичных ближайших соседей, как в ОЦК так и в ГЦК решетках. В жидкой фазе эти частицы образуют общую оболочку вокруг пробной частицы.

Взаимодействие между окружением частицы в момент времени $t = 0$ и t вычисляется с помощью функции «списка», которая определяется через скалярное произведение соседних векторов списка:

$$C_i(t) = \frac{\langle l_i(t)l_i(0) \rangle}{\langle l_i(0)^2 \rangle}, \quad (8)$$

где $\langle \dots \rangle$ усреднение по всем частицам и по начальным временам. Число частиц, покинувших начальную клетку частицы i в момент времени t , определяется следующим образом:

$$n_i^{out}(t) = |l_i(0)^2| - l_i(0) \cdot l_i(t), \quad (9)$$

Первая часть данного уравнения определяет число частиц, окружающих частицу i в момент времени $t = 0$, а вторая часть определяет число частиц, которые остались после некоторого момента времени t . Кейгеновая корреляционная функция C_{cage} , которая характеризует распад первичной группы частиц в клетке, вычисляется как ансамбль и среднее время функции $\Theta(c - n_i^{out})$ для разного числа частиц, покинувших клетку (окружение пробной частицы):

$$C_{cage}^c(t) = \langle \Theta[c - n_i^{out}(0, t)] \rangle. \quad (10)$$

Кейгеновая корреляционная функция может быть вычислена для разного числа значения c , обычно $c = 7$, то есть, количество частиц, покинувших клетку равно половине числа частиц, которые находились в первой координатной оболочке (в жидкой фазе). Когда $C_{cage}^7(t)$ функция опускается до 0.1, то первичная группа частиц считается уже некоррелированной. Интерфейс вычисления кейгеновой корреляционной функции представлен на рисунке 4.

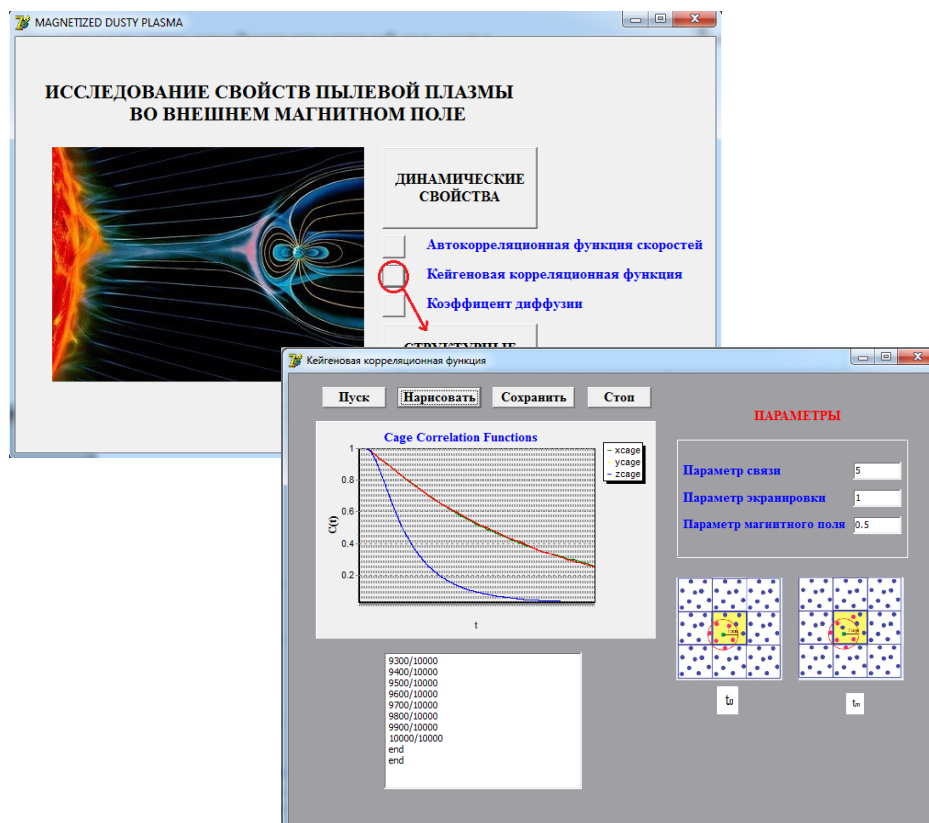


Рисунок 4 – Интерфейс для вычисления кейгеновых корреляционных функции

Программный интерфейс для исследования структурных свойств пылевой плазмы. Одной из важнейших структурных характеристик много частичной системы являются парные корреляционные функции.

Парная корреляционная функция распределения $F_2(\vec{r}_1, \vec{r}_2)$ определяет вероятность нахождения первой частицы в точке \vec{r}_1 и второй в точке \vec{r}_2 . В случае изотропной системы парная функция зависит лишь от расстояния между частицами и называется радиальной функцией распределения $g(r)$. Потенциал взаимодействия частиц влияет на поведение функции распределения. Там, где потенциал взаимодействия стремится к нулю, т.е. на больших расстояниях имеем некоррелированное распределение.

Вероятность нахождения частиц на заданном расстоянии принято рассматривать относительно некоррелированного распределения, следовательно, радиальные функции с ростом межчастичного расстояния должны стремиться к единице.

На основе обработки данных компьютерного моделирования можно получить радиальные функции распределения частиц. Когда имеется набор координат частиц в разные моменты времени (конфигурации), подсчет радиальной функции распределения осуществляется следующим образом. Для каждой частицы пространство вокруг этой частицы от 0 до $\frac{L}{2}$ делится на круговые слои толщиной Δr и подсчитывается число частиц в каждом слое $\Delta N(r)$. Полученные значения усредняются по всем частицам данной конфигурации и по различным конфигурациям траектории марковской цепи.

Радиальная функция распределения вычисляется по формуле

$$g(r) = \frac{v}{2\pi r} \cdot \frac{\Delta \bar{N}(r)}{\Delta r}, \quad (11)$$

где $v = 1 / n_p$, $\Delta \bar{N}(r)$ - усредненное значение числа частиц в круговом слое.

Вид данной функции связан с фазовым состоянием системы. Интерфейс радиальной функций распределения представлен на рисунке

5, который появляется при нажатии кнопки «структурные свойства».

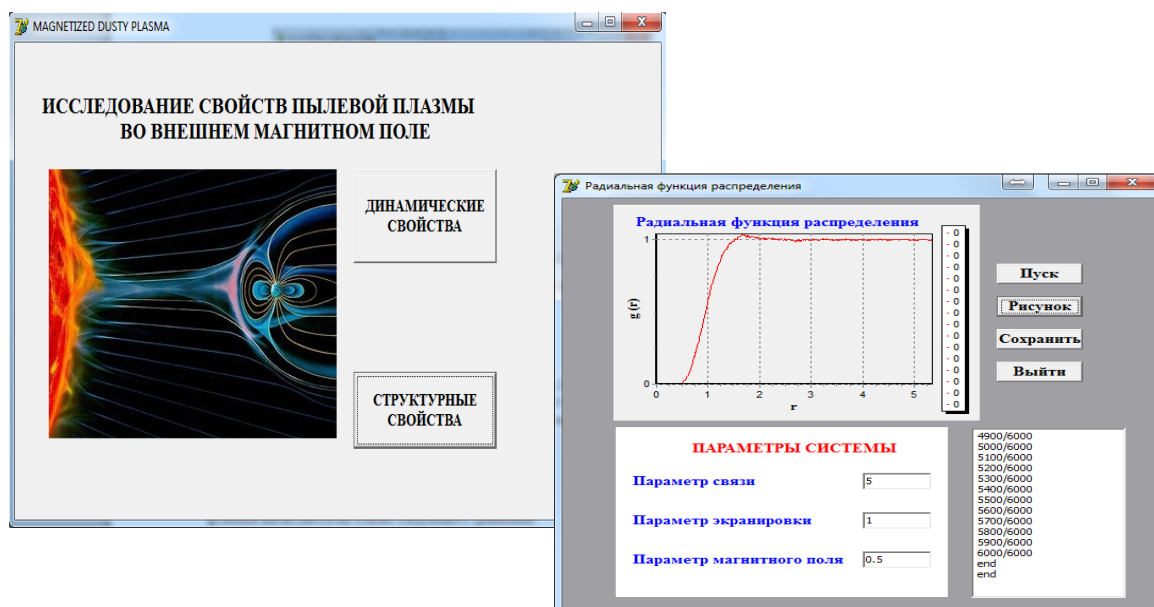


Рисунок 5 – Интерфейс для вычисления парной корреляционной функции

Заключение

Работа посвящена компьютерному моделированию пылевой плазмы во внешнем магнитном поле с помощью метода компьютерного моделирования молекулярной динамики. Проведено детальное моделирование микроскопических и динамических свойств пылевой плазмы на основе Юкавовской модели взаимодействия, учитывающей коллективные эффекты экранировки поля заряженной пылинки, окруженной плазмой буферного газа.

Создана программная оболочка с графическим интерфейсом, позволяющая исследовать влияние внешнего магнитного поля на динамические и структурные свойства Юкава системы на основе компьютерного метода молекулярной динамики.

По результатам компьютерного моделирования создан автоматизированный комплекс для моделирования и исследования свойств системы. Комплекс программы предоставляет пользователю возможность задавать параметры задачи, следить за ходом расчетов, останавливать программу, и сохранять полученные расчеты в текстовый файл. После окончания времени расчета результаты можно представить в виде графика.

Нами было получено авторское свидетельство «Magnetized Dusty Plasma», свидетельствующее о новизне и о оригинальности данного программного комплекса.

Работа была выполнена в рамках Гранта AP05132665 Министерства образования и науки Республики Казахстан.

Литература

- 1 Fortov V. E., Khrapak A. G., and Iakubov I. T., Physics of Strongly Coupled Plasmas: Oxford University Press, Oxford, 2005. – 587 p.
- 2 Baimbetov F.B., Ramazanov T.S., Nurenkenov Kh.T. Pseudopotential theory of classical non-ideal plasma // Phys. Lett. A. – 1995. – Vol. 202. – P. 211.

- 3 Баимбетов Ф.Б., Рамазанов Т.С., Джумагулова К.Н. К термодинамике слабо неидеальной плазмы // ТВТ. – 1995. – Т.33, №4. – С. 150-152.
- 4 Fortov V.E., Nefedov A.P., Petrov O.F., Samarian A.A., Chernyshev A.V. Emission properties and structural ordering of strongly coupled dust particles in a thermal plasma // Phys. Letters. A. – 1996. – Vol. 219. – P. 89-94.
- 5 Рамазанов Т.С., Джумагулова К.Н., Омарбакиева Ю.А., Петров О.Ф., Гавриков А.В., Липаев А.М. Исследование пылевой плазмы и плазменного кристалла в условиях микрогравитации на аппаратуре ПК-3 на борту МКС // Вестник НАН РК. – 2005. – №6. – С. 160-168.
- 6 Bonitz M., Donko Z., Ott T., Kahlert H., and Hartmann P. Nonlinear magnetoplasmons in strongly coupled Yukawa plasmas // Phys. Rev. Lett. – 2010. – V. 105. – P. 055002.
- 7 Ott T., Bonitz M., Hartmann P. and Donko Z. Higher harmonics of the magnetoplasmon in strongly coupled Coulomb and Yukawa systems // Phys. Rev. E. – 2011. – Vol. 83. – P. 046403.
- 8 Dzhumagulova K. N., Masheeva R. U., Ramazanov T. S. and Donko Z. Effect of magnetic field on the velocity autocorrelation and the caging of particles in two-dimensional Yukawa liquids // Physical Review E. – 2014. – Vol. 89. – P. 033104.
- 9 Feng Yan, Goree J. and Bin Liu. Superdiffusion of two dimensional Yukawa liquids due to a perpendicular magnetic field // Phys. Rev. E. – 2014. – Vol. 90. – P. 013105.
- 10 Джумагулова К.Н., Рамазанов Т.С., Машеева Р.У., Донко З. Влияние внешнего магнитного поля на автокорреляционные функции скоростей пылевых частиц // Вестник КазНУ, серия физическая – 2015. – №3 (54).
- 11 Golden K. I., Kalman G. J., Quasilocalized charge approximation in strongly coupled plasma physics // Phys. Plasmas – 2000. – Vol. 7. – P. 14.
- 12 Dzhumagulova K.N., Masheyeva R.U., Ramazanov T.S., Xia G., Kalimoldayev M.N., and Donko Z., Simultaneous effect of an external magnetic field and gas-induced friction on the caging of particles in two-dimensional Yukawa systems // Contrib. Plasma Phys. – 2018. – Vol. 58. – P. 217.
- 13 Rabani E., Gezelter J.D., and Berne B.J. Calculating the hopping rate for self-diffusion on rough potential energy surfaces: Cage correlations // J. Chem. Phys. – 1997. – Vol. 107. – P. 6867.
- 14 Rabani E., Gezelter J. D., Berne B. J., Direct Observation of Stretched-Exponential Relaxation in Low-Temperature Lennard-Jones Systems Using the Cage Correlation Function // Phys. Rev. Lett. – 1999. – Vol. 82. – P. 3649.
- 15 Машеева Р.У., Джумагулова К.Н., Рамазанов Т.С., Исследование связи кейгеновой корреляционной функции и коэффициента диффузии для трехмерной Юкавской жидкости // Сборник трудов международной конференции «СДФФФФ-9» – Алматы, 2016. – С. 72.
- 16 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 – 109.
- 17 Refson K. Moldy: A portable molecular dynamics simulation program for serial and parallel computers // Computer Physics Communications. – 2000. – Vol. 126(3). – P. 310-329.
- 18 Amini M., Fincham D. Evaluation of temperature in molecular dynamics simulation // Computer Physics Communications. – 1990. – Vol. 56(3). – P. 313-324.
- 19 Van Gunsteren W.F., Berendsen H.J.C. A Leap-Frog Algorithm for Stochastic Dynamics // Molecular Simulation. – 1988. – Vol. 1(3). – P. 173-185.
- 20 Rosenberg M., Kalman G.J., Hartmann P., Donko Z. Waves in a quasi-two-dimensional superparamagnetic dusty plasma liquid in a trap // Physical Review E. – 2016. – Vol. 94. – P. 033203.
- 21 Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N. Shear viscosity of dusty plasma obtained on the basis of the Langevin dynamics // Contr. Plasma Phys. – 2008. – №4 (48). – P.357 – 360.
- 22 Vaulina O.S., Khrustal'ov Yu.V., Petrov O.F., Numerical Study of Heat Capacity in Dissipative Two-Dimensional Yukawa Systems // Contrib. Plasma Phys. – 2011. – T. 51.6. – С. 495.
- 23 Kiyokawa S. Energy barrier of bcc-fcc phase transition via the Bain path in Yukawa system // Physics of Plasmas. – 2018. – Vol. 25. – P. 053703
- 24 Kumar S., Das A. Spiral waves in driven strongly coupled Yukawa systems // Physical Review E. – 2018. – Vol. 97 (6). – P. 063202
- 25 Wang K., Huang D., Feng Y. Dynamical heterogeneities of cold 2D Yukawa liquids // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2018. – Vol. 51 (24). – P. 245201.
- 26 Джумагулова К. Н., Машеева Р. У. Динамические характеристики и коэффициент диффузии пылевой компоненты плазмы сложного состава // Вестник КазНУ, серия физическая. – 2012. Vol. – 1(40). – с. 20-23.
- 27 Dzhumagulova K. N., Ramazanov T. S., Masheeva R. U. Velocity Autocorrelation Functions and Diffusion Coefficient of Dusty Component in Complex Plasmas // Contrib. Plasma Phys. – 2012. – Vol. 52 (3). – P. 182 – 185.

References

- 1 V.E. Fortov, A.G. Khrapak, and I.T. Iakubov, Physics of Strongly Coupled Plasmas (Oxford University Press, Oxford, 2005), 587 p.
- 2 F.B. Baimbetov, T.S. Ramazanov, and Kh.T. Nurekenov, Phys. Lett. A. 202, 211 (1995).
- 3 F.B. Baimbetov, T.S. Ramazanov, and K.N. Dzhumagulova, TVT. 33(4), 150-152 (1995). (In Russ)
- 4 V.E. Fortov, A.P. Nefedov, O.F. Petrov, A.A. Samarian, A.V. Chernyshev, Phys. Letters. A. 219, P. 89-94 (1996).
- 5 T.S. Ramazanov, K.N. Dzhumagulova, Yu.A. Omarbakiyeva, O.F. Petrov, A.V. Gavrikov, A.M. Lipayev, Vestnik NAN RK 6, 160-168 (2005). (In Russ)
- 6 M. Bonitz, Z. Donko, T. Ott, H. Kahlert, and P. Hartmann, Rev. Lett. 105, 055002 (2010).
- 7 T. Ott, M. Bonitz, P. Hartmann and Z. Donko, Phys. Rev. E. 83, 046403 (2011).

- 8 K.N. Dzhumagulova, R.U. Masheeva, T.S. Ramazanov and Z. Donkó, *Physical Review E*. 89, 033104 (2014).
- 9 Yan Feng, J. Goree and Liu Bin, *Phys. Rev. E*. 90, 013105 (2014).
- 10 K.N. Dzhumagulova, T.S. Ramazanov, R.U. Masheyeva, Z. Donko, *Recent Contributions to Physics*, 3 (54), 150-158 (2015). (In Russ)
- 11 K.I. Golden, G. J. Kalman, *Phys. Plasmas* 7, 14 (2000).
- 12 K.N. Dzhumagulova, R.U. Masheyeva, T.S. Ramazanov, G. Xia, M.N. Kalimoldayev, and Z. Donkó, *Contrib. Plasma Phys.* 58, 217 (2018).
- 13 E. Rabani, J.D. Gezelter, and B.J. Berne, *J. Chem. Phys.* 107, P. 6867 (1997).
- 14 E. Rabani, J. D. Gezelter, B. J. Berne, *Phys. Rev. Lett.* 82, P. 3649 (1999).
- 15 R.U. Masheyeva, K.N. Dzhumagulova, T.S. Ramazanov, *Sbornik trudov mezhdunarodnoy konferentsii «SDFFFO-9» (Almaty, Kazakhstan 2016)*, p.72. (In Russ)
- 16 Q. Spreiter and M. Walter, *J. Comput. Phys.* 152, 102 – 109 (1999).
- 17 K. Refson, *Computer Physics Communications*. 126(3), 310-329 (2000).
- 18 M. Amini, D. Fincham, *Computer Physics Communications*. 56(3), 313-324 (1990).
- 19 W.F. Van Gunsteren, H.J.C. Berendsen, *Molecular Simulation*. 1(3), 173-185 (1988).
- 20 M. Rosenberg, G.J. Kalman, P. Hartmann, Z. Donkó, *Physical Review E*. 94, 033203 (2016).
- 21 T.S. Ramazanov, K.N. Dzhumagulova, *Contr. Plasma Phys.* 4 (48), 357 – 360 (2008).
- 22 O.S. Vaulina, Yu.V. Khrustalyov, O.F. Petrov, *Contrib. Plasma Phys.* 51(6), 495 (2011).
- 23 S. Kiyokawa, *Physics of Plasmas*. 25, 053703 (2018).
- 24 S. Kumar., A. Das, *Physical Review E*. 97 (6), 063202 (2018).
- 25 K. Wang, D. Huang, Y. Feng, *Journal of Physics D: Applied Physics*. 51 (24), 245201. (2018).
- 26 K.N. Dzhumagulova, R.U. Masheyeva, *Recent Contributions to Physics* 1(40), 20-23 (2012). (In Russ)
- 27 K. N. Dzhumagulova, T. S. Ramazanov, R. U. Masheeva, *Contrib. Plasma Phys.* 52 (3), P. 182 – 185 (2012).