

Ж.А. Молдабеков

*Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби
Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики,
050040, Алматы, Казахстан
Институт прикладных наук и информационных технологий,
050040 г.Алматы, ул. Шашкина 40-48, Казахстан
e-mail: zhandos@physics.kz*

ДВУМЕРНАЯ ЮКАВА-ЖИДКОСТЬ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ СЛАБЫМ ДИПОЛЬ - ДИПОЛЬНЫМ МЕЖЧАСТИЧНЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ

Аннотация. Система заряженных частиц, взаимодействующих посредством экранированного потенциала Юкавы называют в современной научной литературе Юкава-системой. Если эта система сильно коррелирована и в этой системе имеется ближний порядок, то ее называют Юкава-жидкостью. В экспериментах по пылевой плазме реализуются Юкава системы с дополнительным диполь-дипольным взаимодействием между частицами. Дополнительный дипольный момент может быть индуцирован фокусировкой ионов за счет стационарного потока ионов и притяжения отрицательно заряженной пылевой частицей. Используя молекулярную динамику (МД), в данной работе представлены результаты расчета парной корреляционной функции двухмерной системы пылевых частиц с дополнительным диполь-дипольным взаимодействием. Сравнение с экспериментальными данными указывает на то, что использованная модель может быть применима для объяснения экспериментальных наблюдений. Так же, представлены результаты расчета коэффициента диффузии. Для расчета коэффициента диффузии было использовано соотношение Грина-Кубо и данные автокорреляционной функции скоростей частиц из МД моделирования двухмерной системы. Показано, что дополнительное диполь-дипольное взаимодействие ведет к уменьшению значения коэффициента диффузии. Проведено обсуждение экспериментальной реализации двухмерной Юкава системы с дополнительным контролируемым диполь-дипольным взаимодействием между пылевыми частицами в комплексной плазме.

Ключевые слова: пылевая плазма, двумерные системы, Юкава системы, дипольное взаимодействие, газовый разряд, плазма.

Введение

В комплексной плазме, реализуемой в высокочастотном газовом разряде [1], потенциал заряженной пылевой частицы экранирован ионами и электронами, вследствие чего реализуется Юкава система. В данной работе рассмотрим тот случай, когда все пылевые частицы расположены на двумерной плоскости, образуя двухмерную Юкава жидкость. Отметим, что при этом пылевая плазма, которая состоит из электронов, ионов и атомов в целом трехмерная. Только движение пылинок ограничено двумерной плоскостью. Именно поэтому некорректно говорить о двумерной пылевой плазме. Пылевые частицы левитируют в результате равновесия между силой притяжения и силой внешнего

электрического поля. Если пылевая компонента состоит из частиц одинакового размера и из одного и того же материала, то они все имеют равновесное положение на одной и той же высоте [2].

В газовом разряде присутствует постоянный поток ионов в области, где расположены пылевые частицы. Часть этих ионов попадают на поверхность частицы и рекомбинирует с электронами, другая часть рассеивается отрицательно заряженной пылинкой. Поскольку имеется дрейф ионов в вертикальном направлении, в среднем число ионов рассеянных в направлении скорости дрейфа больше, чем число ионов рассеянных в других направлениях. Эти рассеянные ионы, однако, не могут оставаться вблизи пылинки, вслед-

ствие закона сохранения момента импульса налетающего иона. Здесь нужно вспомнить, что в комплексной плазме также присутствуют нейтральные атомы. При соударении иона, рассеянного в область вблизи пылевой частицы с нейтральным атомом, налетающий ион теряет часть своей кинетической энергии и становится захваченным полем пылинки [3, 4]. Таким образом, за пылевой частицей в направлении дрейфа ионов появляется облако сфокусированных полем самой пылинкой ионов [3,4]. Через некоторое время захваченный ион падает на поверхность пылинки. Однако, на его место приходит новый ион, рассеянный пылинкой и захваченный его полем после соударения с атомом. В целом картина динамичная, но облако сфокусированных ионов стационарное. Можно говорить о составной частице с ненулевым полным зарядом и ненулевым дипольным моментом, которая состоит из отрицательно заряженной пылинки и положительно заряженного облака сфокусированных ионов. Из описанной микроскопической картины понятно, что появление такой составной частицы возможно только вследствие открытости системы, так как в плазму постоянно подается энергия извне.

Теперь мы видим, что неидеальную двумерную систему из заряженных частиц можно описать в рамках модели однокомпонентной Юкава жидкости с дополнительным диполь - дипольным взаимодействием. Здесь учтено, что вклад монополь - дипольного взаимодействия равен нулю, поскольку дипольные моменты составных частиц параллельны. Важно учесть экранирование дополнительного диполь - дипольного взаимодействия ионами и электронами. Для описания вышеуказанной системы составных частиц можно использовать эффективный экранированный потенциал полученный в работе [5] из мультипольного разложения потенциала типа Юкавы. Далее, для простоты будем называть описанные составные частицы просто пылинками, поскольку именно пылинки создают облако сфокусированных ионов и содержат в себе основную массу. К тому же облако сфокусированных ионов имеет

заряд, не превышающий половины абсолютного значения заряда пылинки [6].

Модель взаимодействия

Далее введем безразмерные параметры связи для описания взаимодействия заряд-заряд (монополь-монополь)

$$\Gamma = Q^2 / (ak_B T) \text{ и } \text{диполь-диполь}$$

$$\Gamma_d = d^2 / (a^3 k_B T), \text{ здесь } d - \text{дипольный момент}$$

$$\text{частицы, } a = (\sqrt{\pi n})^{-1} - \text{среднее межчастичное}$$

расстояние и $k_B T$ характеризует кинетическую энергию теплового движения частиц. Отметим, что речь идет о поступательном движении пылевой частицы как целого. Берем $\Gamma_d \ll \Gamma$ поскольку в рассматриваемом случае, взаимодействие монополь-монополь доминирует и относительно него диполь - дипольное взаимодействие слабо. Используя эти параметры, запишем потенциал взаимодействия частиц в следующем безразмерном виде [5]:

$$\Phi^*(r) = \frac{\Gamma}{R} \exp(-Rk_s) + \frac{d^2}{R^3} (1 + Rk_s) \exp(-Rk_s), \quad (1)$$

где расстояние выражено в единицах среднего межчастичного расстояния $R = r/a$ и параметр экранирования определен как отношение среднего межчастичного расстояния к длине экранирования $k_s = a/\lambda_s$.

Для исследования влияния дополнительного слабого диполь-дипольного взаимодействия на свойства двумерной Юкава жидкости, экранированный потенциал взаимодействия (1) использован в качестве парного межчастичного взаимодействия при моделировании методом молекулярной динамики (МД). Время задавалось в единицах обратной плазменной частоты пылинок. В процессе МД моделирования решались уравнения движения 1528 частиц. В начальные 10^5 плазменных периодов система приводилась в требуемое состояние с параметрами Γ и Γ_d путем постоянной перенормировки скоростей частиц. Уравнения движения частиц решались с помощью алгоритма Бимана

Парная корреляционная функция позиции частиц

Влияние дополнительного слабого диполь-дипольного взаимодействия на

структурные свойства Юкава жидкости исследовано на основе парной корреляционной функции позиции частиц (ПКФ). ПКФ описывает среднее по времени моделирование отклонения плотности от его среднего значения на данном расстоянии от частицы, часто говорят, что ПКФ определяет "вероятность" нахождения одной частицы от другой на данном расстоянии (однако ПКФ не нормирована на единицу). Немонотонный характер ПКФ указывает на существование корреляции между частицами. Если высота пиков ПКФ спадают с расстоянием экспоненциально $\sim \exp(-R)$, то система находится в жидкофазном состоянии. Если же высота пиков ПКФ спадает с расстоянием по степенному закону со степенью меньше 1/3, то имеет место кристаллическое состояние. По этим признакам было установлено, что при параметрах экранирования $k_s = 1$ и $k_s = 2$ фазовый переход происходит при $\Gamma \approx 188$ и $\Gamma \approx 350$, соответственно. Мы будем рассматривать жидкофазное состояние далеко от точки кристаллизации.

На рисунках 1 и 2, ПКФ Юкава-жидкости с дополнительным диполь-дипольным взаимодействием и без него приведена в сравнении с данными эксперимента [7].

Видно, что дополнительное диполь-дипольное взаимодействие приводит к улучшению согласия структурных характеристик пылевой компоненты комплексной плазмы с данными эксперимента.

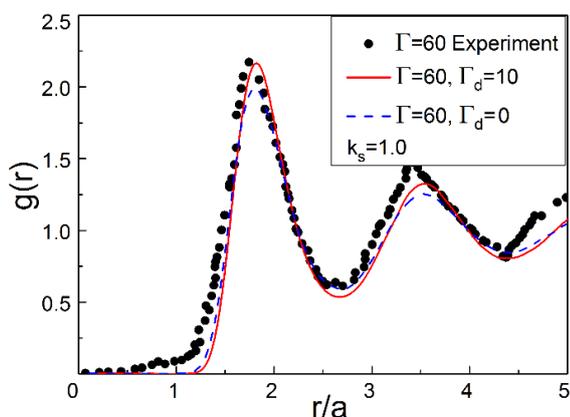


Рисунок 1 – Парная корреляционная функция Юкава-жидкости

с дополнительным диполь-дипольным взаимодействием и без него в сравнении с данными эксперимента [7]

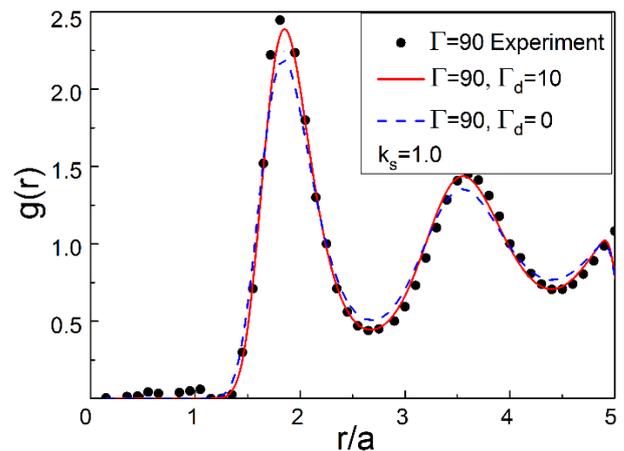


Рисунок 2 – Парная корреляционная функция Юкава-жидкости с дополнительным диполь-дипольным взаимодействием и без него в сравнении с данными эксперимента [7]

Коэффициента диффузии

Влияние дополнительного слабого диполь-дипольного взаимодействия на колебания плотности в Юкава жидкости исследовано на основе автокорреляционной функции скоростей частиц (АКФ) [8]. Площадь под АКФ пропорциональна коэффициенту диффузии. Немонотонный характер АКФ указывает на присутствие колебаний плотности в системе. Частоту этих колебаний можно определить, рассматривая Фурье образ АКФ. Исследование влияния дипольного взаимодействия на АКФ и спектр колебаний частиц было представлена в работе [9]. В этой работе представлены результаты исследования коэффициента диффузии.

Как было отмечено, согласно известным соотношениям Грина-Кубо, площадь под кривой АКФ пропорциональна значению коэффициента диффузии. На рисунке 3 приведены значения отношения D/D_Y коэффициента диффузии Юкава жидкости с дополнительным диполь-дипольным взаимодействием D к коэффициенту диффузии Юкава жидкости без дипольного взаимодействия D_Y . Интегрирование АКФ проводилось в интервале от нуля до 100

плазменных периодов. Видно, что дополнительное диполь-дипольное взаимодействие ведет к уменьшению значения коэффициента диффузии.

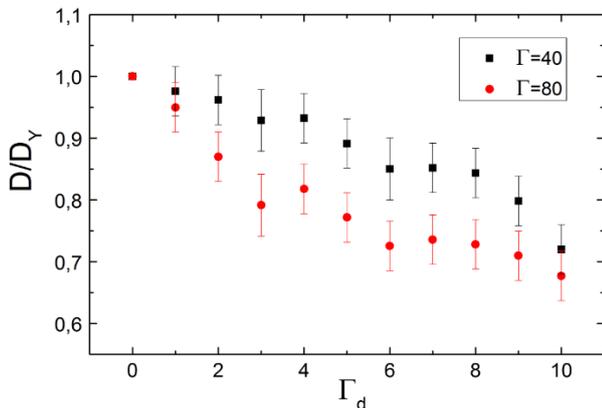


Рисунок 3 – Отношение коэффициентов диффузии Юкава жидкости с дополнительным диполь-дипольным взаимодействием и без него

Заключение

Реализация исследований по определению дополнительного диполь-дипольного взаимодействия между частицами в двумерной системе заряженных пылинок в комплексной плазме может быть проведена в пылевой плазме высокочастотного разряда. Для контроля значения дипольного момента может быть использовано дополнительное постоянное напряжение. Изменение значения постоянного внешнего электрического поля позволит увеличивать, либо уменьшать значение дипольного момента составной частицы "пылинка + захваченное ионное облако". Решение кинетических уравнений для ионов близи поверхности пылевой частицы показало, что значение коэффициента поляризуемости составной частицы порядка ~ 1 , где λ_D – длина Дебая ионов [3, 6]. Причем значение дополнительного постоянного электрического поля может быть относительно слабо, так, что разряд все еще существует только за счет переменного высокочастотного внешнего поля. Результаты этой работы указывают на то, что модель взаимодействия (1) может быть использовано для экспериментального и теоретического исследования Юкава жидкости с дополнительным ди-

поль-дипольным взаимодействием в описанных выше экспериментах по получению пылевой плазмы в высокочастотном разряде с дополнительным внешним постоянным электрическим полем.

Работа сделана в рамках гранта AP05133536 Министерства образования и науки республики Казахстан.

Литература

- Ott T., Stanley M., and Bonitz M. Non-invasive determination of the parameters of strongly coupled 2D Yukawa liquids //Phys. Plasmas-2011.-Vol.18.-P.063701.
- Vaulina O.S., Vasilieva E.V., Petrov O.F., Fortov V.E. Equilibrium structural properties of two-dimensional nonideal systems //Euro Physics Letters -2011.-Vol.96.-P.65003.
- Sukhinin G. I., and Fedoseev A. V. Formation of a Trapped-Ion Cloud Around a Dusty Particle in Low-Density Plasma //IEEE Transactions on plasma science-2010.-Vol.38, №6.-P.2345-2352.
- Reocker T.B., Zhdanov S. K., Ivlev A.V., Lampe M., Joyce G., and Morfill G.E. Effective dipole moment for the mode coupling instability: Mapping of self-consistent wake models //Phys. Plasmas-2012.-Vol.19.-P.073708.
- Ramazanov T. S., MoldabekovZh. A., and Gabdullin M. T. Multipole expansion in plasmas : Effective interaction potentials between compound particles // Physical Review E. – 2016. – Vol. 93. – P. 053204.
- Sukhinin G.I., Fedoseev A.V., Antipov S.N., Petrov O.F., and Fortov V.E. Dust particle radial confinement in a dc glow discharge //Phys. Rev. E-2013.-Vol.87.-P.013101.
- Vaulina O.S., Vasilieva E.V., Petrov O.F., Fortov V.E. Equilibrium structural properties of two-dimensional nonideal systems //Euro Physics Letters -2011.-Vol.96.-P.65003.
- Баимбетов Ф. Б., Рамазанов Т.С. Математическое моделирование в физике неидеальной плазмы.-Алматы: Ғылым, 1994.- 212 с.
- Ramazanov T.S., Gabdulin A. Zh., MoldabekovZh.A. Effect of dipole-dipole in-

teraction on the compressional oscillations in two-dimensional Yukawa liquids //Contrib. Plasma Phys. doi: 10.1002/ctpp.201500125.

Принято к печати 13.08.2019

Ж.А. Молдабеков

*Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби
Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики,
050040, Алматы, Казахстан
Институт прикладных наук и информационных технологий,
050040 г.Алматы, ул. Шашикина 40-48, Казахстан
e-mail: zhandos@physics.kz*

ДВУМЕРНАЯ ЮКАВА-ЖИДКОСТЬ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ СЛАБЫМ ДИПОЛЬ-ДИПОЛЬНЫМ МЕЖЧАСТИЧНЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ

Аннотация. Система заряженных частиц, взаимодействующих посредством экранированного потенциала Юкавы называют в современной научной литературе Юкава-системой. Если эта система сильно коррелирована и в этой системе имеется ближний порядок, то ее называют Юкава-жидкостью. В экспериментах по пылевой плазме реализуются Юкава системы с дополнительным диполь-дипольным взаимодействием между частицами. Дополнительный дипольный момент может быть индуцирован фокусировкой ионов за счет стационарного потока ионов и притяжения отрицательно заряженной пылевой частицей. Используя молекулярную динамику (МД), в данной работе представлены результаты расчета парной корреляционной функции двухмерной системы пылевых частиц с дополнительным диполь-дипольным взаимодействием. Сравнение с экспериментальными данными указывает на то, что использованная модель может быть применима для объяснения экспериментальных наблюдений. Так же, представлены результаты расчета коэффициента диффузии. Для расчета коэффициента диффузии было использовано соотношение Грина-Кубо и данные автокорреляционной функции скоростей частиц из МД моделирования двухмерной системы. Показано, что дополнительное диполь-дипольное взаимодействие ведет к уменьшению значения коэффициента диффузии. Проведено обсуждение экспериментальной реализации двухмерной Юкава системы с дополнительным контролируемым диполь-дипольным взаимодействием между пылевыми частицами в комплексной плазме.

Ключевые слова: пылевая плазма, двумерные системы, Юкава системы, дипольное взаимодействие, газовый разряд, плазма.

Zh.A. Moldabekov

*Al-Farabi Kazakh National University,
Institute of Experimental and Theoretical Physics, 050040, Almaty, Kazakhstan
Institute of Applied Sciences and Information Technology,
050040 Almaty, Shashkin str., 40-48, Kazakhstan
e-mail: zhandos@physics.kz*

TWO-DIMENSION YUKAWA-LIQUID WITH AN ADDITIONAL WEAK DIPOLE-DIPOLE INTERPARTICLE INTERACTION

Abstract. The system of charged particles interacting through the screened potential of the Yukawa is called the Yukawa system in the modern scientific literature. If this system is highly correlated and there is a short range order in this system, then it is called a Yukawa liquid. In dusty plasma experiments, Yukawa systems with an additional dipole-dipole interaction between particles are realized. An additional dipole moment can be induced by ion focusing due to the stationary ion flux and attraction by a negatively charged dust particle. Using molecular dynamics (MD), this paper presents the results of calculation of the pair correlation function of a two-dimensional system of dust particles with an additional dipole-dipole interaction. Comparison with experimental data indicates that the model used can be applied to explain experimental observation. Also, the results of computation of the diffusion coefficient are presented. To calculate the diffusion coefficient, the Green-Kubo relation and the data of the auto-correlation function of particle velocities from the MD simulation of a two-dimensional system were

used. It is shown that an additional dipole – dipole interaction leads to a decrease in the diffusion coefficient. A discussion of the experimental realization of a two-dimensional Yukawa system with an additional controlled dipole-dipole interaction between dust particles in a complex plasma is given.

Keywords: dusty plasma, two-dimensional systems, Yukawa systems, dipole interaction, gas discharge, plasma.

Ж.А. Молдабеков

*Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті,
Экспериментальдыжәне теориялық физика ғылымизерттеу институты,
0500400, Алматы, Қазақстан.*

*Қолданбалы ғылымдар және ақпараттық технологиялар институты, 050040 Алматы қ.,
Шашкин к., 40-48, Қазақстан.*

e-mail: zhandos@physics.kz

ЕКІ ӨЛШЕМДІ ӘЛСІЗ ҚОСЫМША ДИПОЛЬ-ДИПОЛЬ ӨЗАРА ӘРЕКЕТТЕСУІ БАР ЮКАВА-СҮЙЫҚТЫҚ

Аннотация. Юкаваның экрандалған потенциалы арқылы өзара әрекеттесетін зарядталған бөлшектер жүйесі қазіргі заманғы ғылыми әдебиетте Юкава-жүйе деп аталады. Егер бұл жүйе күшті корреляцияланған болса және бұл жүйеде жақын құрылым болса, онда оны Юкава-сүйықтық деп атайды. Тозанды плазма бойынша эксперименттерде бөлшектер арасындағы қосымша диполь-дипольдық өзара әрекеттесуі бар Юкава жүйесі орын алады. Қосымша дипольді момент иондардың тұрақты ағыны және теріс зарядталған тозан бөлшектің есебінен иондарды фокустаумен индуцирленуі мүмкін. Молекулалық динамиканы (МД) пайдалана отырып, бұл жұмыста қосымша диполь-дипольдық өзара әрекеттесуі бар екі өлшемді тозан бөлшектерінің қос корреляциялық функциясын есептеу нәтижелері келтірілген. Эксперименталды деректермен салыстыру қолданылған модель эксперименталды бақылауды түсіндіру үшін қолданылуы мүмкін екендігін көрсетеді. Сонымен қатар, диффузия коэффициентін есептеу нәтижелері келтірілген. Диффузия коэффициентін есептеу үшін Грин-Кубо қатынасы және екі өлшемді жүйені МД модельдеуінен бөлшектердің жылдамдығының автокорреляциялық функциясының деректері қолданылды. Қосымша дипольды әсерлесу диффузия коэффициентінің мәнінің азаюына әкеледі. Тозанды плазмадағы тозан бөлшектері арасындағы қосымша бақыланатын диполь-дипольдық өзара әрекеттесумен екі өлшемді Юкава жүйесін эксперименттік іске асыру талқыланды.

Түйін сөздер: тозанды плазма, екі өлшемді жүйе, Юкава жүйе, дипольдік өзара әрекеттесу, газ разряды, плазма.