

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES

ISSN 1991-346X

Volume 2, Number 312 (2017), 25 – 29

K.N. Dzhumagulova¹, T.S. Ramazanov¹, R.U. Masheyeva¹, Z. Donkó²¹IETP, al Farabi, Kazakh National University, 71, al Farabi av., Almaty, 050040, Kazakhstan;²Institute for Solid State Physics and Optics, Wigner Research Centre of the Hungarian Academy of Sciences, H-1525 Budapest, P.O. Box 49, Hungary
e-mail: dzhumagulova.karlvash@gmail.ru**EFFECT OF MAGNETIC FIELD ON DIFFUSION COEFFICIENTS
OF THE THREE-DIMENSIONAL YUKAWA SYSTEMS**

Abstract. In this paper the results of the theoretical investigations of the influence of the magnetic field on the diffusion coefficient. The method of molecular dynamics was used to solve the Newtonian equations of the motion. The external magnetic field introduces anisotropy into the system, as a result of which the diffusion of charged particles depends on the direction. We presented here the results of calculating the diffusion coefficient along and across the magnetic field. The results are obtained for wide ranges of the system parameters.

Key words: dusty plasma, diffusion coefficients, means squared displacements, magnetic fields

УДК 533.09.01

К.Н. Джумагулова¹, Т.С. Рамазанов¹, Р.У. Машеева¹, З. Донко²¹НИИЭТФ, Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби,
пр. аль-Фараби, 71, Алматы, 050040, Казахстан;²Институт физики твердого тела и оптики, Вигнеровский исследовательский центр
Академии наук Венгрии, H-1525 Будапешт, Венгрия**ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА КОЭФФИЦИЕНТ
ДИФФУЗИИ ТРЕХМЕРНОЙ ЮКАВА СИСТЕМЫ**

Аннотация. В данной работе показаны результаты исследований коэффициента диффузии частиц трехмерной Юкава системы во внешнем однородном магнитном поле на основе компьютерного моделирования методом молекулярной динамики. Внешнее магнитное поле вносит анизотропию в систему, вследствие чего диффузия заряженных частиц зависит от направления. Мы представили здесь результаты вычислений коэффициента диффузии вдоль и поперек магнитному полю. Результаты получены в широком диапазоне изменения параметров системы.

Ключевые слова: пылевая плазма, коэффициент диффузии, среднеквадратичное смещение частиц, магнитное поле.

Введение.

Исследование влияния внешнего однородного магнитного поля на динамические и транспортные свойства ансамбля заряженных частиц является одной из важных задач для широкого спектра физических систем. Большой интерес представляет диффузия частиц сильно связанной системы, в которой энергия кулоновского взаимодействия превышает кинетическую энергию частиц. В астрофизике, например, коэффициент диффузии сильно связанных ионов напрямую влияет на оценки возраста белых карликов через временные шкалы гравитационного высвобождения энергии [1]. Недавние эксперименты с ионами, а также с пылевыми частицами в ловушках дали новые результаты по микроскопическому движению заряженных частиц в сильном магнитном

поле.

Основной задачей данной работы является исследование влияния как сильной связи, так и сильного магнитного поля на транспортные свойства трехмерной Юкава системы. Коэффициент диффузии частиц данной системы был вычислен на основе метода среднеквадратичного смещения частиц, расположенных в трехмерном пространстве и подвергающихся влиянию внешнего однородного магнитного поля, которое направлено вдоль оси z . Компьютерное моделирование движения пылевых частиц было проведено с помощью решения уравнений движения Ньютона в рамках взаимодействия Юкава. Во второй части работы описывается метод, модель и процедура вычисления. Результаты представлены в третьей, а выводы в четвертой части работы.

Метод моделирования. Для исследования влияния магнитного поля на частицы плазмы сложного состава был использован метод молекулярной динамики. В качестве межчастичного потенциала взаимодействия частиц был взят потенциал Юкава:

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

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

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

здесь T - температура, $a = (3/4\pi n)^{1/3}$ - трехмерный радиус Вигнера-Зейтца и n - плотность частиц.

Магнитное поле $\vec{B} = (0, 0, B)$ однородно, величина магнитного поля выражается с помощью безразмерного параметра:

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

где $\omega_c = QB/m$ - циклотронная и $\omega_p = \sqrt{nQ^2/\epsilon_0 m}$ - плазменная частота. Параметр магнитного поля, параметр связи Γ и параметр экранировки $\kappa = a/\lambda_D$ полностью характеризуют систему.

Для реализации метода молекулярной динамики все пространство разбивается на равные ячейки (куб), и предполагается, что магнитное поле однородно и направлено перпендикулярно вдоль оси z . 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 [2-5], количество частиц в ячейке бралось равным $N = 1000$. 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 вычислений.

Сильное магнитное поле существенно меняет свойства диффузии слабо связанной плазмы. Из равновесной динамики системы вычисляется поперечный и параллельный коэффициент диффузии [6] с помощью соотношения Эйнштейна на основе среднеквадратичного смещения частиц:

$$D_{\perp} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{4t} \text{MSD}(t), \tag{5}$$

$$\text{MSD}(t)_{\perp} = \left\langle |\vec{x}_i(t) - \vec{x}_i(t_0)|^2 \right\rangle + \left\langle |\vec{y}_i(t) - \vec{y}_i(t_0)|^2 \right\rangle.$$

$$D_{\square} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{2t} \text{MSD}(t), \tag{6}$$

$$\text{MSD}(t)_{\square} = \left\langle |\vec{z}_i(t) - \vec{z}_i(t_0)|^2 \right\rangle.$$

Скобки $\langle \dots \rangle$ в уравнениях (6) и (5) означают усреднение по ансамблю всех частиц.

Результаты.

Результаты исследования влияния внешнего однородного магнитного поля и сильной связи на динамические свойства системы, а именно на среднеквадратичное смещение частиц представлено на рисунке 1. Как можно заметить, с увеличением параметра магнитного поля появляются осцилляции на кривых поперечного среднеквадратичного смещения, что свидетельствует о циклотронном движении частиц. Также с увеличением связи в системе уменьшается среднеквадратичное смещение частиц.

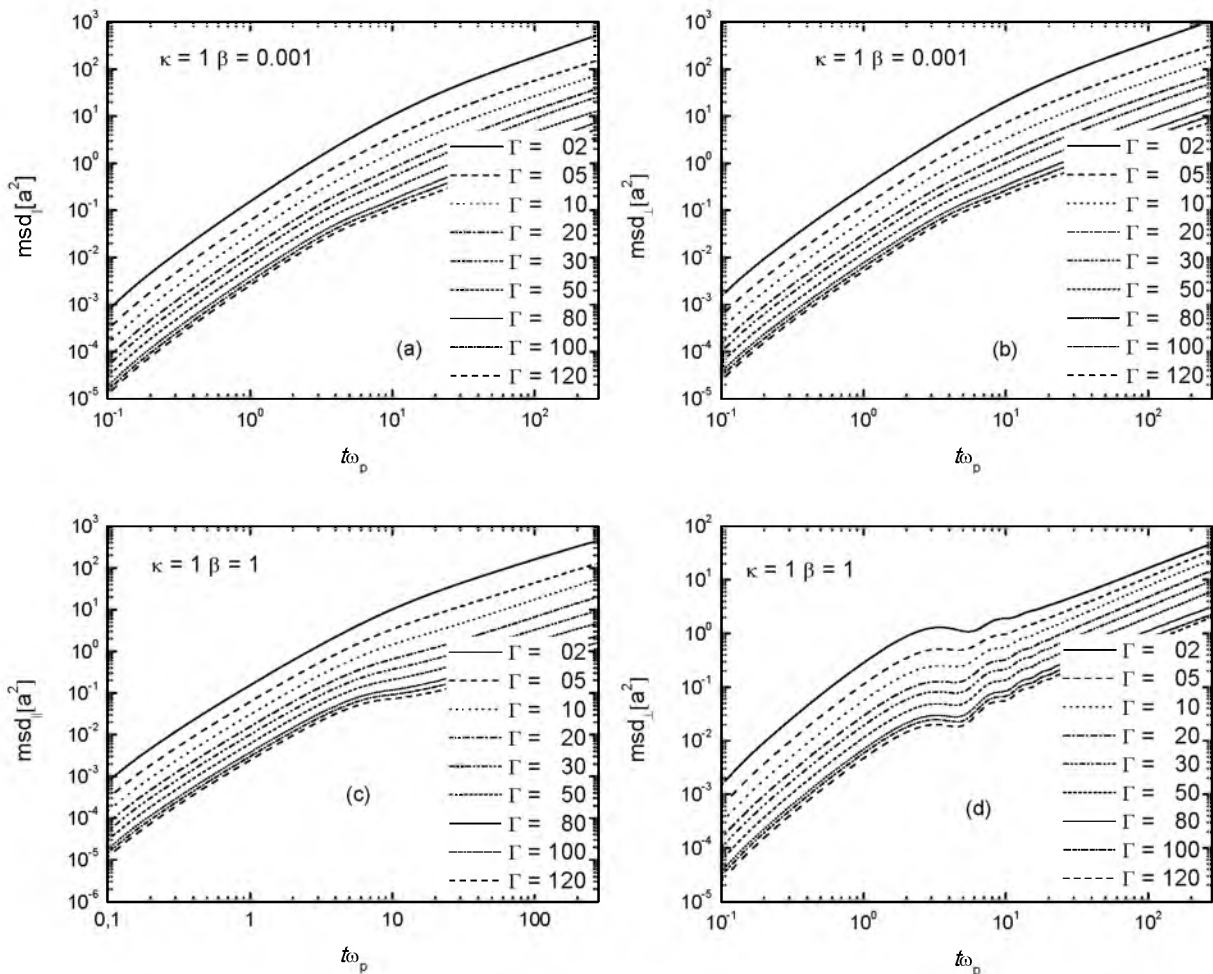


Рисунок 1 - Среднеквадратичное смещение частиц для разных значений параметра связи при $\kappa = 1, \beta = 1.0$

На рисунке 1 представлена зависимость коэффициента диффузии от параметра связи и от параметра магнитного поля при фиксированных параметрах системы. Как видно из рисунка осцилляции на кривых среднеквадратичного смещения частиц параллельно направлению магнитного поля не так сильно выражены, как в случае перпендикулярного направления.

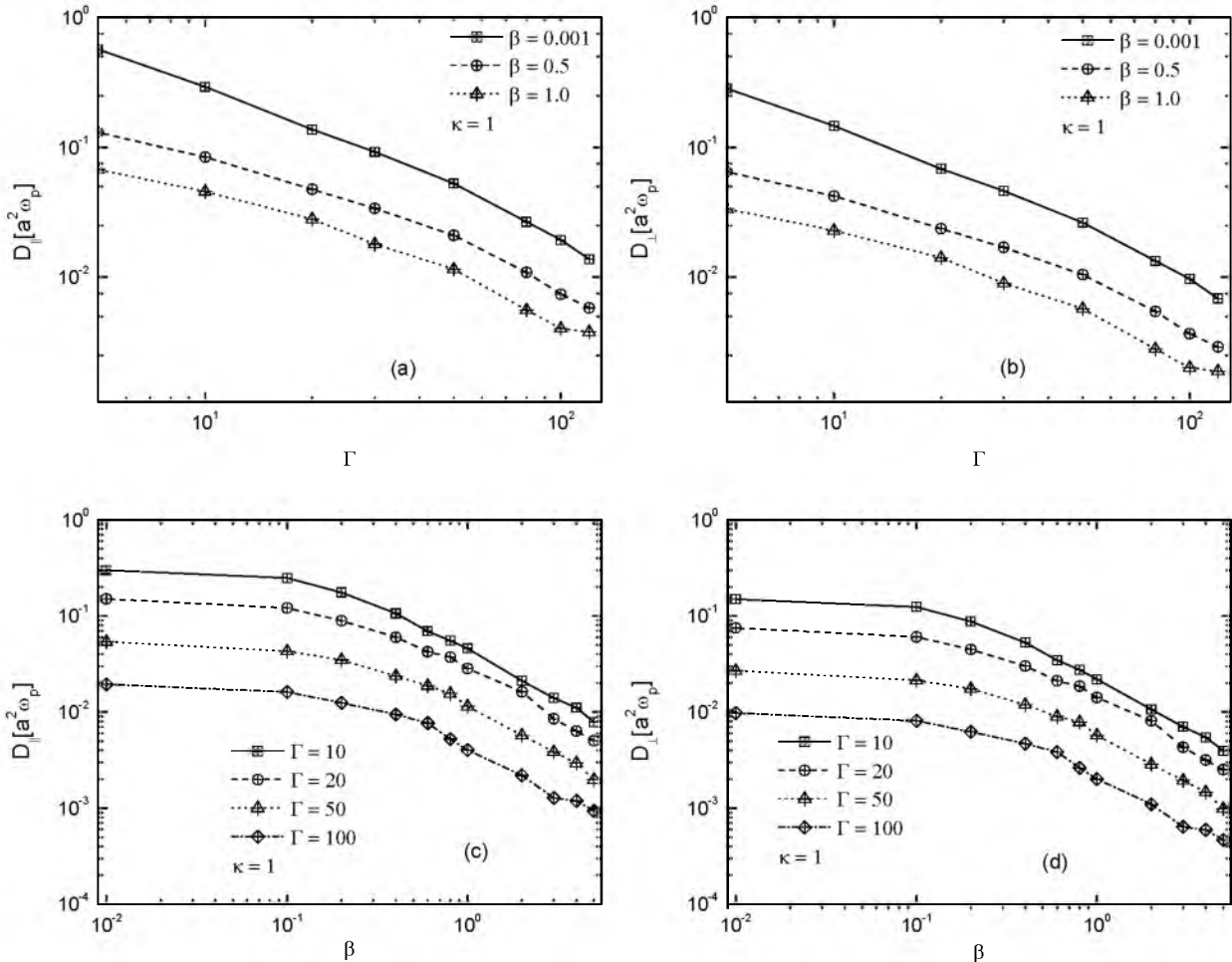


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента диффузии от параметра магнитного поля при разных значениях параметра магнитного поля

Рассматривая зависимость коэффициента диффузии от параметра связи при разных значениях параметра магнитного поля (рисунок 2 (c,d)) можно заметить что, увеличение параметра связи приводит к монотонному снижению как коэффициента диффузии как поперек, так и параллельно направлению магнитного поля, однако в первом случае снижение более сильное чем во втором. Это поведение можно также отметить на зависимостях коэффициента диффузии от параметра магнитного поля при разных значениях параметра связи (рисунок 2 (a,b)).

Заключение.

Было исследовано влияние внешнего магнитного поля и сильной связи на среднеквадратичное смещение частиц и коэффициент диффузии трехмерной Юкава системы с помощью метода компьютерного моделирования молекулярной динамики. Показано, что с учетом влияния внешнего однородного магнитного поля на кривых среднеквадратичного смещения частиц появляются осцилляции, свидетельствующие о циклотронном движении частиц. Увеличение, как параметра связи, так и параметра магнитного поля приводит к монотонному снижению коэффициента диффузии, более выраженному в случае поперечного направления к магнитному полю по сравнению с параллельным направлением.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Hughto J., Schneider A.S., Horowitz C.J. and Berry D.K. Phys. Rev. E 82, 066401 (2010).
 [2] Donko Z., and Nyiri B. Molecular dynamics calculation of the thermal conductivity and shear viscosity of the classical one – component plasma // Phys. Plasmas. – 2000 – Vol.7. - P. 45-50.
 [3] Donko Z. and Hartmann P. Thermal conductivity of strongly coupled Yukawa liquids // Phys.Rev.E. – 2004. – Vol. 69. – P. 016405.
 [4] 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. 4521–4525.
 [5] 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.
 [6] Dzhumagulova K. N., Ramazanov T. S., and Masheeva R. U. // Contr. Plasma Phys. 2013. - №20.- P. 113702-113702-4.

REFERENCES

- [1] J. Hughto, A.S. Schneider, C.J. Horowitz and D.K. Berry, Phys. Rev. E 82, 066401 (2010).
 [2] Donko Z., and Nyiri B. Molecular dynamics calculation of the thermal conductivity and shear viscosity of the classical one – component plasma // Phys. Plasmas. – 2000 – Vol.7. - P. 45-50.
 [3] Donko Z. and Hartmann P. Thermal conductivity of strongly coupled Yukawa liquids // Phys.Rev.E. – 2004. – Vol. 69. – P. 016405.
 [4] 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. 4521–4525.
 [5] 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.
 [6] Dzhumagulova K. N., Ramazanov T. S., and Masheeva R. U. // Contr. Plasma Phys. 2013. - №20.- P. 113702-113702-4.

Қ.Н. Жұмағұлова¹, Т.С. Рамазанов¹, Р.У. Машеева¹, З. Донко²

¹ЭТФҒЗИ, әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, Қазақстан;

²Қатты дене және оптика физикасы институты, Венгрияның ғылым академиясының
Вигнер атындағы зерттеу орталығы, Н-1525 Будапешт, Венгрия

**ҮШ ӨЛШЕМДІ ЮКАВА ЖҮЙЕСІНІҢ ДИФFUЗИЯ КОЭФФИЦИЕНТІНЕ
СЫРТҚЫ МАГНИТ ӨРІСІНІҢ ӘСЕРІ**

Аннотация. Жұмыста үш өлшемді Юкава жүйесінің транспорттық қасиеттерін, жеке жағдайда, диффузия коэффициентін теориялық зерттеу нәтижелері көрсетілген. Есептеу барысында бөлшектердің қозғалыс теңдеуін шешу үшін молекулалық динамика әдісі қолданылды. Әсерлесу потенциалы ретінде Юкава потенциалы қолданылды. Нәтижелер жүйенің параметрлерінің өзгерісінің кең аумағында алынған.

Тірек сөздер: тозанды плазма, диффузия коэффициенті, бөлшектердің орташа ығысуы, магнит өрісі

Сведения об авторах:

Джумагулова Карлыгаш Нурмановна - заместитель декана по научно-инновационной работе и международным связям физико-технического факультета, домашний и служебный адрес: аль-Фараби 71, Телефоны: +7(707) 739 01 95, E-mail: dzhumagulova.karlygash@gmail.com;

Машеева Ранна Уытбаевна - КазНУ им. аль-Фараби, ассистент кафедры физики плазмы и компьютерной физики, домашний и служебный адрес: аль-Фараби 71, Телефоны: +7(775) 769 5714, +7(747) 787 7713, E-mail: ranna_m@mail.ru;

Рамазанов Тлеккабул Сабитович - КазНУ им. аль-Фараби, проректор по научно-инновационной деятельности, домашний и служебный адрес: аль-Фараби 71, Телефоны: +7 (727) 263 87 35, E-mail: Tlekkabul.Ramazanov@kaznu.kz;

Золтан Донко - Институт физики твердого тела и оптики, Вигнеровский исследовательский центр Академии наук Венгрии, профессор, Домашний и служебный адрес: Н-1525 Budapest, P.O.B. 49, Hungary, Телефоны: +36 1 392 2222 ext 1309, E-mail: donko.zoltan@wigner.mta.hu