

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

СКЕЙЛИНГОВЫЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ КОЭФФИЦИЕНТА ДИФФУЗИИ ПЫЛЕВОЙ КОМПОНЕНТЫ ПЛАЗМЫ СЛОЖНОГО СОСТАВА

Аннотация

Целью данной работы является исследование динамических и транспортных свойств пылевой компоненты сложного состава. Для исследования свойств таких систем используется метод Ланжевеновой динамики, в котором временная эволюция системы взаимодействующих частиц отслеживается [интегрированием](#) их уравнений движения. По результатам полученных значений микросостояний, то есть координат и скоростей частиц, можно получить коэффициент диффузии с помощью соотношения Грина–Кубо, связывающего коэффициент диффузии с автокорреляционной функцией скоростей и методом среднеквадратичного смещения. В предыдущих работах авторов [1] сделано сравнение коэффициентов диффузии, определенных этими двумя методами, показана их сходимость. Сделаны многочисленные вычисления коэффициента диффузии в широком диапазоне изменения параметров системы. На основе интерполяции по данным компьютерного моделирования была получена скейлинговая формула для коэффициента диффузии пылевой компоненты плазмы сложного состава. Данная формула может быть использована при расчетах параметров реальных технологических установок, использующих плазму с конденсированной дисперсной фазой, например, в установках по получению микросхем.

Ключевые слова: пылевая плазма, коэффициент диффузии, скейлинговая формула.

Кілт сөздер: тозанды плазма, диффузия коэффициенті, скейлингті формула.

Keywords: dusty plasma, the diffusion coefficient, the scaling formula.

Введение. Плазма, являющаяся наиболее распространенным состоянием вещества в космосе (звезды, межзвездная среда, ионосферы планет), на Земле в природных условиях встречается лишь при грозовых разрядах и в пламени. Между тем в лаборатории и промышленности вещество в плазменном состоянии встречается весьма широко. В последние годы наблюдается возрастание интереса к физике плазмы сложного состава. Данное обстоятельство продиктовано как необходимостью фундаментальных теоретических исследований многих природных явлений, так и множеством

практических приложений. Данные о физических свойствах такой плазмы оказываются важными для успешного развития таких направлений современной физики и новой техники, как термоядерная энергетика, астрофизика, физика верхней атмосферы и нанотехнологии и т.д.

Данная работа посвящена расчетам и анализу коэффициента диффузии на основе двух методов: с использованием данных по среднеквадратичному смещению и теории Грина–Кубо [2], связывающей коэффициент диффузии с автокорреляционной функцией скоростей пылевых частиц. Получена скейлинговая формула, описывающая коэффициент диффузии пылевой компоненты в широких диапазонах изменения параметров пылевой плазмы.

Скейлинговые формулы для коэффициента диффузии. Одним из методов моделирования свойств многочастичных систем является метод Ланжевеновой динамики. Данный метод описывался в работах [1, 3, 4]. Моделирование пылевых частиц по пространственно-временным траекториям было выполнено на основе следующих уравнений:

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

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

Время берется в единицах, обратных ленгмюровской пылевой частоте

$$\omega_d = \frac{4\pi n_d Z_d^2 e^2}{3 m_d} \frac{1}{\chi}^{1/2}. \text{ Безразмерный параметр трения } \theta = \frac{\nu_{fr}}{\omega_d}, \text{ который определяется через}$$

соотношение коэффициента трения к частоте ленгмюровских плазменных колебаний

$$\text{пылинок } \omega_d = \frac{4\pi n_d Z_d^2 e^2}{3 m_d} \frac{1}{\chi}^{1/2}, \text{ а скорость – в единицах тепловой скорости частиц. Таким}$$

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

На основе полученных значений микросостояний можно получить коэффициент диффузии на основе известного соотношения, связывающего коэффициент диффузии со среднеквадратичным смещением частиц:

$$D_{\text{msd}} = \lim_{t \rightarrow \Gamma} (\langle \vec{r}(0) - \vec{r}(t) \rangle^2 / 6t). \quad (3)$$

С другой стороны, коэффициент переноса можно вычислить соотношением Грина-Кубо, для коэффициента диффузии в трехмерном случае он запишется так:

$$D_{\text{G-K}} = \frac{1}{3} \int_0^{\infty} A_{vv}(t) dt, \quad (4)$$

здесь $A_{vv}(t)$ автокорреляционная функция скоростей [5, 6].

В работах [7] приведены расчеты коэффициента диффузии вычисленный соотношениями (4), (1).

Для получения скейлинговой формулы для коэффициентов переноса пылевой плазмы были проведены многочисленные расчеты коэффициента диффузий. Результаты расчетов приведены ниже.

На рисунках 1, 2 даны зависимости коэффициента диффузии от коэффициента трения v_{fr} , полученные с помощью уравнения (1) для $\Gamma = 50$, $\kappa = 2$ и при разных значениях параметра Z_d . При $Z_d = 8000$ получена следующая интерполяционная формула:

$$D = \frac{A k_B T_d}{(v_{fr} + B) m_d}, \quad (3)$$

где коэффициенты $A = 0,34$ и $B = 100$.

При $\Gamma = 50$, $Z = 12\,000$ коэффициенты равны: $A = 0,34$, $B = 140$.

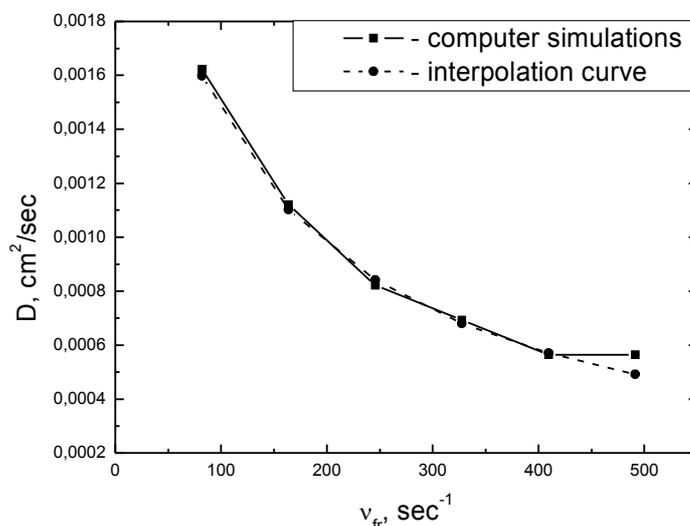


Рисунок 1 –

Коэффициент диффузии

при $\Gamma = 50$, $Z = 8000$, $\kappa = 2$

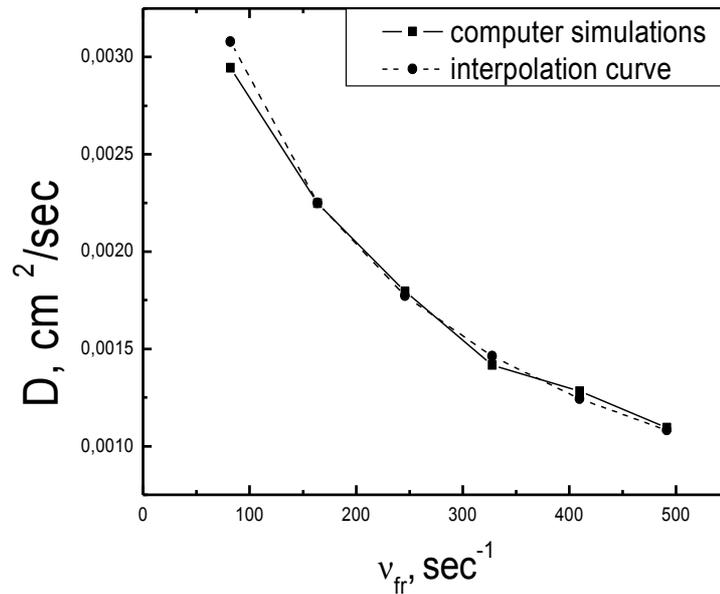


Рисунок 2 – Коэффициент диффузии при $\Gamma = 50$, $Z = 12\ 000$, $\kappa = 2$

На рисунках 3, 4 приведены графики зависимости коэффициентов А и В от параметра связи. Из них видно, что коэффициент А не зависит от Z и зависит только от параметра связи Γ , а коэффициент В зависит не только от параметра связи, но и от Z . С увеличением Z увеличивается и коэффициент В. На основе анализа поведения коэффициента диффузии при изменении тех или иных параметров скейлинговая формула для коэффициента диффузии пылевой плазмы имеет следующий вид:

$$D = \frac{A(\tilde{A})k_B T_d}{(v_{fr} + B(\tilde{A}, Z))m_d}, \quad (4)$$

где $A(\tilde{A}) = \frac{6}{(4 + \sqrt[3]{\Gamma^2})}$, $B(\tilde{A}) = \frac{0.156Z}{4 + \tilde{A}^{1/2}}$.

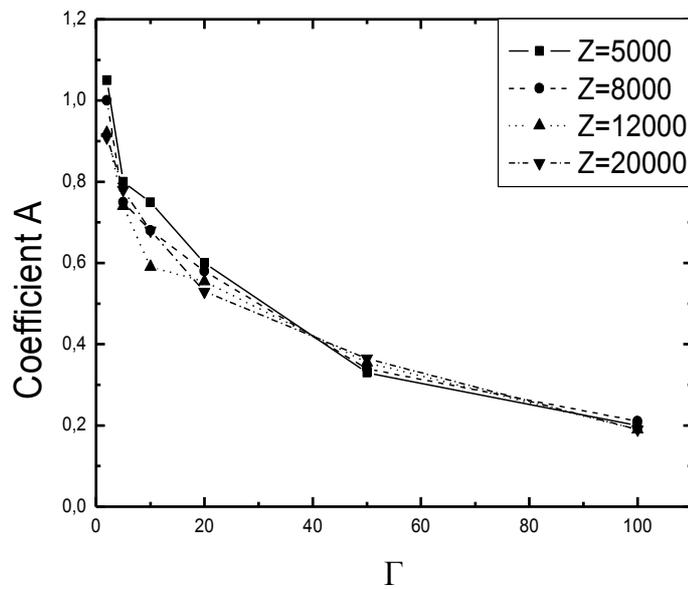


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента А от параметра связи

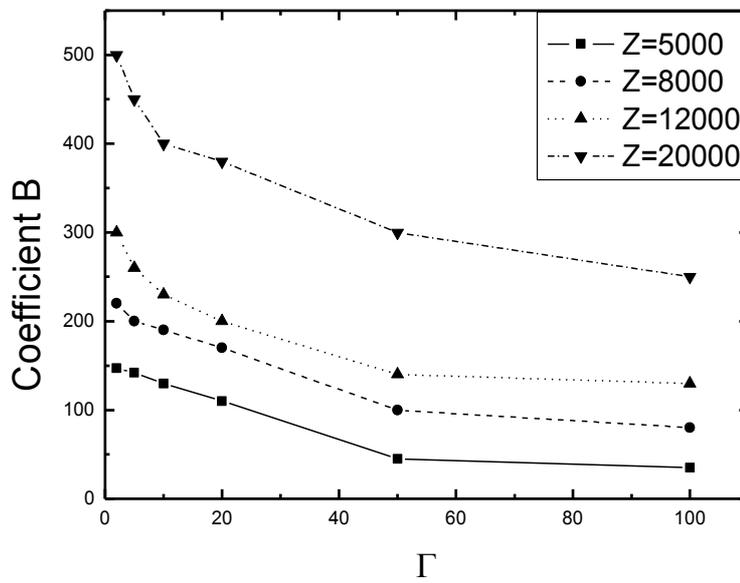


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента В от параметра связи

На рисунке 5 приведен коэффициент диффузии, вычисленный по формуле (4) при разных значениях параметра Z_d .

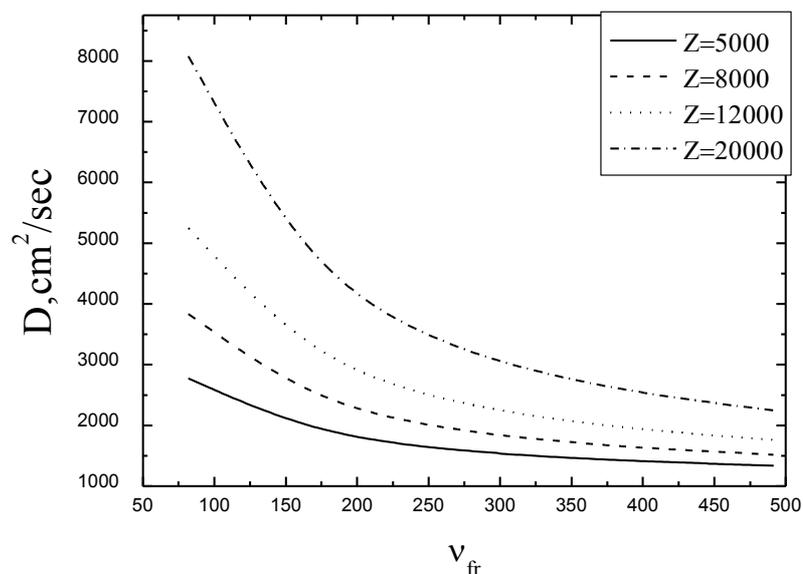


Рисунок 5 – Коэффициент диффузии при $\Gamma = 2$, полученный соотношением (4)

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Джумагулова К.Н., Машеева Р.У. Динамические характеристики и коэффициент диффузии пылевой компоненты плазмы сложного состава // Вестник КазНУ. – 2012. – № 1(40). – С. 20-23.
- 2 Кубо Р. Термодинамика необратимых процессов. – М.: Некоторые вопросы статистическо-механической теории неперотимых процессов, 1962. – 421 с.
- 3 Ваулина О.С., Храпак С.А. Моделирование динамики сильно взаимодействующих макрочастиц в слабоионизованной плазме // ЖЭТФ. – 2001. – Т. 119. – С. 264.
- 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 Джумагулова К.Н. Автокорреляционные функции скоростей макрочастиц в пылевой плазме // Известия НАН РК. – Серия физико-математическая. – 2007. – № 2. – С. 65-67.
- 6 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. – Prague, 2007. – P. 253.
- 7 Dzhumagulova K.N., Ramazanov T.S., Masheeva R.U. Velocity Autocorrelation Functions and Diffusion Coefficient of Dusty Component in Complex Plasmas // Contributions to Plasma Physics. – 2012. – Vol. 52. – № 3. – P. 182-185.

REFERENCES

- 1 Dzhumagulova K.N., Masheeva R.U. *Vestnik KazNU*. **2012**. №1(40). 20-23 (in Russ.).
- 2 Kubo R. *Termodinamica neobratimyh prosesov*. **1962**. 421 (in Russ).
- 3 Vaulina O.S., Khrapak S.A. *JETF*. **2001**. T.119. 264 (in Russ)
- 4 Baimbetov F.B., Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N., Kadyrsizov E.R., Petrov O.F., Gavrikov A.V. *J.Phys.A: Math. And Gen*. **2006**. Vol. 39. P. 4521–4525.
- 5 Dzhumagulova K.N. *Izvestia NAN RK*. **2007**. № 2. S. 65-67 (in Russ).

6 Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N., Dosbolaev M.K., Jumabekov A.N. *28th ICPIG. Prague. 2007.* P. 253.

7 Dzhumagulova K.N., Ramazanov T.S., Masheeva R.U. *Contributions to Plasma Physics. 2012.* Vol. 52. № 3. P. 182 – 185.

Резюме

Қ. Н. Жұмағұлова, Р. У. Машеева

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

КҮРДЕЛІ ҚҰРАМДЫ ПЛАЗМАНЫҢ ТОЗАҢДЫ КОМПОНЕНТІНІҢ ДИФфуЗИЯ КОЭФФИЦИЕНТІ ҮШІН СКЕЙЛИНГТІ ФОРМУЛАЛАР

Берілген жұмыстың мақсаты, күрделі құрамды плазманың тозаңды компонентінің динамикалық және транспорттық қасиеттерін зерттеу болып табылады. Осындай жүйелердің қасиеттерін зерттеу үшін әсерле-сетін бөлшектер жүйесінің уақыттық эволюциясын, олардың қозғалыс теңдеуін интегралдау арқылы зерттей-тін ланжевендік динамика әдісі қолданылады. Алынған микрокүйлердің, яғни бөлшектердің координаттары мен жылдамдықтары мәндерінің нәтижелерін алу арқылы, диффузия коэффициентін жылдамдықтың авто-корреляциялық функциясымен байланыстыратын Грин-Кубо теориясы арқылы және орташа квадраттық ығысу әдісімен диффузия коэффициентін анықтауға болады. Авторлардың алдыңғы жұмыстарында осы екі әдіс арқылы алынған диффузия коэффициенті өзара салыстырылған және сәйкестігі көрсетілген. Жүйе параметрлерін өзгерте отырып көптеген есептеулер жүргізілді. Компьютерлік үлгілеу мәліметтерін интер-поляциялау арқылы күрделі құрамды плазманың тозаңды компонентасының диффузия коэффициенті үшін скейлингті формула алынды. Бұл формула конденсирленген дисперсиялы фазалы плазманы қолданатын реалды технологиялық құрылғылардың, мысалы, микросхемаларды алатын құрылғыларда, параметрлерін есептеу барысында қолданылуға болады.

Кілт сөздер: тозаңды плазма, диффузия коэффициенті, скейлингті формула.

Summary

K. N. Dzhumagulova, R. U. Masheeva

(IETP, al Farabi Kazakh National University, Almaty)

SCALING FORMULAS FOR THE DIFFUSION COEFFICIENT OF THE DUST COMPONENT COMPLEX PLASMA

The purpose this work is to study the dynamic and transport properties of the dust component of complex plasma. It uses the Langevin dynamics method, in which the time evolution of a system of interacting particles is investigated by integrating their equations of motion, to study the properties of such systems. It can be obtained the diffusion coefficient by the Green-Kubo relation, which is connected the diffusion coefficient with velocity autocorrelation function of the particles and by the method of the mean square displacement according to the results obtained values of microstates that is, coordinates and velocities of the particles. It was presented the comparison of the diffusion coefficient defined by these two methods and presented their convergence in an earlier paper [1]. It was made numerical calculation of the diffusion coefficient for a wide range of the system parameters. It was obtained the scaling formula for the diffusion coefficient of the dust component of the complex plasma based on the interpolation of the computer simulation data. This formula can be used in the calculation of the parameters of real technological facilities which is used plasma with condensed disperse phase, for example, the unit for production of chips.

Keywords: dusty plasma, the diffusion coefficient, the scaling formula.

Поступила 27.03.2013га