

Молдабеков Ж.А.,  
Рамазанов Т.С., Габдулин А.Ж.

**Структурные свойства  
заряженных пылевых частиц  
с дипольными моментами**

В этой работе рассматривается двухмерная система заряженных пылевых частиц, учитывающая дипольный момент, методом Молекулярной Динамики. Как известно, в газовом разряде пылевую частицу и сфокусированное ионное облако можно рассматривать как одну составную частицу с ненулевым дипольным моментом. Отметим, что пылевая плазма, которая состоит из электронов, ионов и нейтральных атомов, в целом трехмерная. При всем том, движение пылинок ограничена двумерной плоскостью. Было проанализировано влияние дополнительного слабого диполь-дипольного взаимодействия на структурные свойства системы на основе парной корреляционной функции. Пылевые частицы левитируют в результате равновесия между силой притяжения и силой внешнего электрического поля. Обсужден возможный метод экспериментального наблюдения дипольного взаимодействия между пылевыми частицами и размер дипольного момента пылевых частиц в газоразрядной комплексной плазме.

**Ключевые слова:** пылевая плазма, свойства плазмы, моделирование плазмы.

Moldabekov Zh.A.,  
Ramazanov T.S., Gabdulin A.Zh.

**Structural properties of charged  
dust particles with dipole  
moments**

Molecular dynamics simulation of a two-dimensional system of charged dust particles was carried out in view of the dipole moments. As it is known, in gas discharge the dust particle and ions focused by the dust grain can be considered as a one compound particle with non-zero dipole moment. Notice that in general dusty plasma, which consists of electrons, ions and neutral atoms, is three-dimensional. However, the movement of dust particles is limited to two-dimensional plane. The influence of non-zero dipole moment on the structural properties of the system was analyzed on the basis of the pair correlation function. Possible experimental observation of dipole interaction between dust particles and that of the measurement of dust particles the dipole moment of the complex plasma are discussed in the gas discharge.

**Key words:** Dusty plasmas, plasma properties, plasma simulation.

Молдабеков Ж.А.,  
Рамазанов Т.С., Габдулин А.Ж.

**Дипольдік моменті бар  
зарядталған бөлшектердің  
құрылымдық қасиеттері**

Бұл жұмыста молекулалық динамика әдісімен дипольдік моментін ескере отырып зарядталған тозаңды бөлшектердің екі өлшемді жүйесі қарастырылады. Барлығымызға белгілі, газдық разрядта тозаңды бөлшекті және фокусталған иондық бұлтты дипольдік моменті нөлге тең емес бір толық бөлшек ретінде қарастырылады. Айта кететін жайт, электрондардан, иондардан және нейтрал атомдардан тұратын тозаңды плазма, әдетте үш өлшемді. Бірақ, тозаңды бөлшектердің қозғалысы екі өлшемді. Қос корреляциялық функцияның негізінде нөлдік емес диполь моментінің жүйенің құрылымдық қасиетіне әсерін анықталды. Сыртқы электр өрісі күші мен ауырлық күш теңескен кезде тозаңды бөлшек тепе-теңдікте тұрады (левитацияланады). Газдық разрядты комплексті плазмадағы тозаңды бөлшектердің дипольдік өзара әсерлесуі және дипольдік моменттің өлшемін экспериментте қалай бақылауға болатындығы талқыланды.

**Түйін сөздер:** тозаңды плазма, плазма қасиеттері, плазма моделдеу.

## СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА ЗАРЯЖЕННЫХ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ С ДИПОЛЬНЫМИ МОМЕНТАМИ

### Введение

Появление дипольного момента у пылинки, в связи с неравновесным эффектом в газоразрядной плазме была теоретически предсказана в [1] – [3]. Тем не менее, экспериментальное наблюдение было реализовано для пылевых частиц в газообразном состоянии [4], [5]. Недавно предполагалось, что аномально высокая кинетическая энергия пылевых частиц, что приводит к плавлению пылевой системы, обусловлена взаимодействием между составными частицами (заряженная пылевая частица + фокусированное ионное облако) [6]. Тем не менее, есть и другие неустойчивости, которые могут быть ответственны за аномально высокую кинетическую энергию пылевых частиц, такие как резонанс между вертикальными и горизонтальными режимами колебаний [7] и переход порядок-беспорядок индуцированного потока ионов [8]. Таким образом, чистого наблюдения дипольного момента пылевых частиц в сильно связанной пылевой плазме по-прежнему не хватает. Поскольку прямое измерение дипольного момента пылевых частиц в такой системе является сложной задачей, в связи с сложной природой фазового перехода системы пылевых частиц в удерживающий потенциал [9], косвенные методы становятся интересными. С этой целью теоретические разработки возможных методов для таких измерений представляют интерес.

Было доказано, что метод молекулярной динамики (МД) может точно описать свойства пылевой плазмы. Очень хорошее согласие наблюдалось между парной корреляционной функции (ПКФ), рассчитанной по МД и ПКФ полученной экспериментально [10]. Кроме того, было показано, что компьютерное моделирование может помочь в точности измерить свойства пылевой плазмы, такие как заряд пылевых частиц и электронов (ионов) [11], [12].

В этой статье мы рассмотрим двумерную систему заряженных пылевых частиц, предполагая, что каждая пылинка имеет определенный дипольный момент. Анализируя ПКФ позиций частиц, прогнозируется наблюдаемое различие в структуре между системой чистых юкавских шаров и системой заряженных частиц с дополнительным диполь-дипольным взаимодействием.

Далее представлен экранированный потенциал взаимодействия между пылевыми частицами, используемый в этой статье.

### Потенциалы взаимодействия

Известно, что экранируемый заряд должен быть принят во внимание для правильного описания свойств плазмы. Для потенциала взаимодействия между пылевыми частицами, используется следующий экранированный потенциал:

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

где  $k_s$  – параметр экранирования,  $Q$  – заряд пылевой частицы,  $d$  – дипольный момент пылевой частицы. Потенциал взаимодействия (1) был получен при помощи мультипольного разложения экранированного потенциала Юкава, учитывающий ненулевой дипольный момент пылевой частицы [13]. Это процесс подобен широко известному мультипольному разложению Кулоновского потенциала [14]. Так как рассматривается двумерная система, дипольный момент всех частиц равен и параллелен между собой. Как следствие, вклад заряд-дипольного взаимодействия к общему межчастичному взаимодействию равен нулю [15].

Первая часть в потенциале взаимодействия (1) соответствует экранированному взаимодействию заряд-заряда и имеет форму потенциала Юкава. Вторая часть потенциала взаимодействия (1) учитывает экранированное взаимодействие диполь-диполя. При  $k_s = 0$ , потенциал (1) становится суммой Кулоновского потенциала и чисто диполь-дипольного взаимодействия. Мы предполагаем, что среднее расстояние между частицами значительно больше, чем размер частиц и аппроксимация поля частицы внутри мультипольного разложения является правильным.

Потенциал взаимодействия между частицами представлен в единицах тепловой энергии. Параметр связи заряд-заряда  $\Gamma = Q^2/ak_bT$  и параметр связи диполь-диполя  $\Gamma = d^2/a^3k_bT$  использовались для описания силы связи; здесь  $a$  среднее межчастичное расстояние, которое задается как  $a = (\pi n)^{-1/2}$ .

Как видно из рисунка 1, потенциал взаимодействия (1) дает сильное отталкивание между пылевыми частицами, чем потенциал Юкава.

ПКФ положений частиц была посчитана стандартным путем при помощи МД модели-

ровании. МД моделирование выполнялось для  $N = 1000$  частиц.

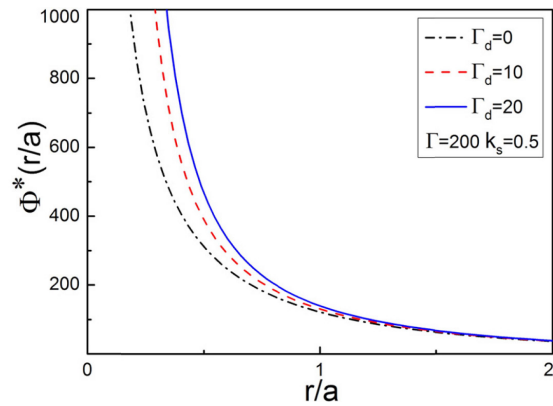


Рисунок 1 – Потенциал взаимодействия (1) между пылевыми частицами в единицах тепловой энергии,  $\Phi^* = \Phi / k_bT$ .

### Результаты и их обсуждение

На рисунках 2-4, показаны ПКФ при разных значениях параметра связи и параметра экранирования. Из рисунков 2-4, видно, что при увеличении параметра связи диполь-диполя  $\Gamma_d$ , корреляция между частицами возрастает. Первый пик становится выше с увеличением  $\Gamma_d$ , но положение последующих пиков и минимумов остаются почти неизменными. Такое поведение обусловлено увеличением отталкивания между частицами. Кроме того, как видно, даже при малых значениях  $\Gamma_d \ll \Gamma$  (параметр связи диполь-диполь), влияние диполь-дипольного взаимодействия на структурные свойства двумерной системы заряженных пылевых частиц является значительным. На рисунке 5, построена зависимость значений первых максимумов ПКФ от параметра связи заряд-заряда при заданном значении параметра связи диполь-диполь. В рассматриваемом диапазоне параметра связи заряд-заряда, первый максимум увеличивается приблизительно линейно по отношению  $\Gamma$ . Тем не менее, для величин  $\Gamma$  в диапазоне от 70 до 90, наблюдалось немонотонная зависимость. Это свидетельствует о возможности существования перехода в порядке частиц. Рисунки 6 и 7 показывают, как значение параметра связи заряд-заряда  $\Gamma^* = \Gamma(\Gamma_c, g_{max})$  меняется при увеличении параметра связи диполь-диполя  $\Gamma_d$  при постоянном значении первого максимума ПКФ. С увеличением  $\Gamma_d$  убывает значение параметра связи заряд-заряд. Наблюдаемое поведение приблизительно линейно.

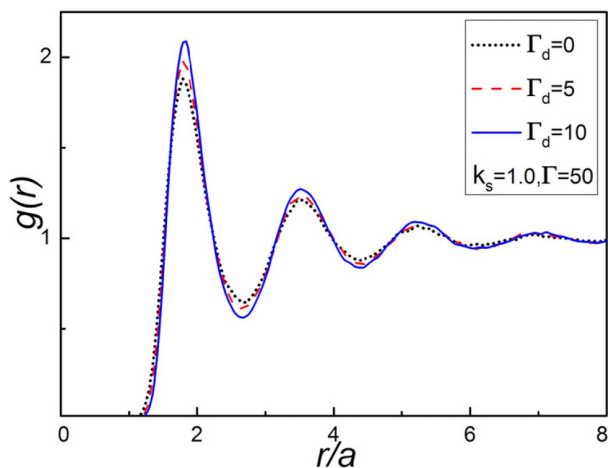


Рисунок 2 – ПКФ частиц при  $k_s = 1$

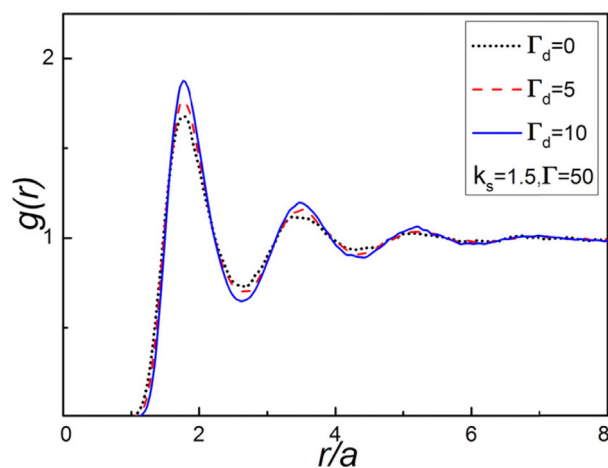


Рисунок 3 – ПКФ частиц при  $k_s = 1.5$

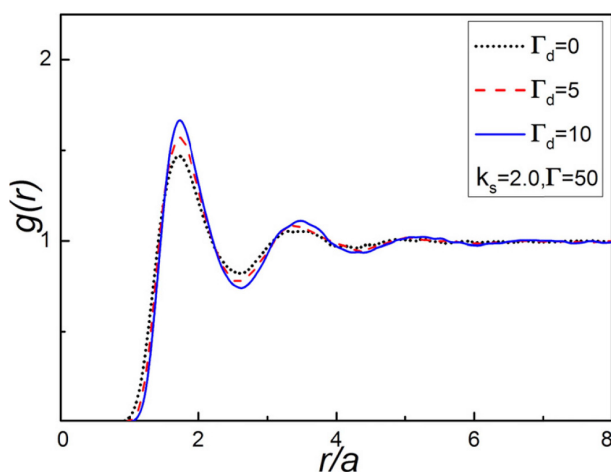


Рисунок 4 – ПКФ частиц при  $k_s = 2$

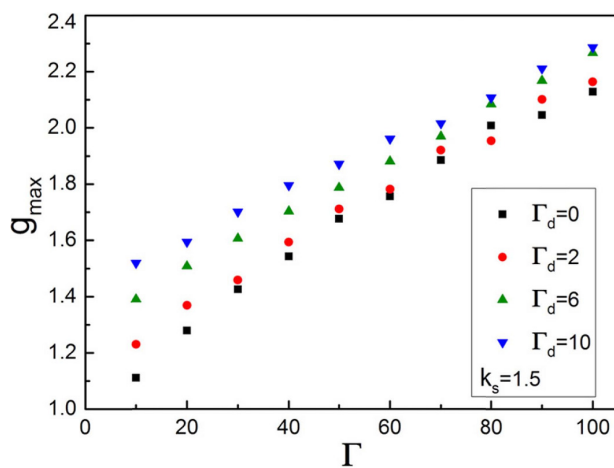


Рисунок 5 – Величина первых максимумов ПКФ частиц для различных величин параметров связи заряд-заряд

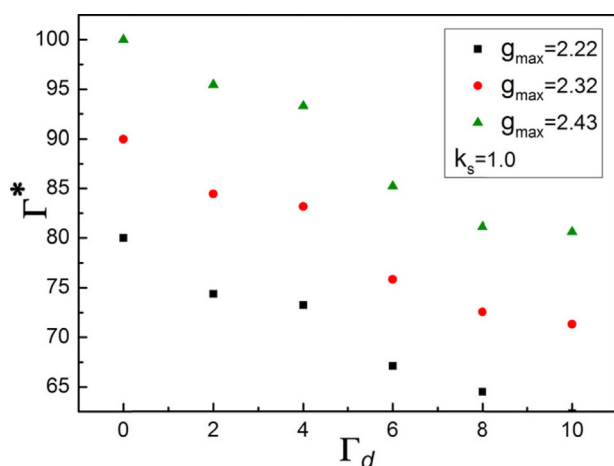


Рисунок 6 – Изменение параметра связи заряд-заряда  $\Gamma^* = \Gamma(\Gamma_d, g_{max})$  с увеличением параметра связи диполь-диполь при этом, не изменяя значение первого максимума ПКФ

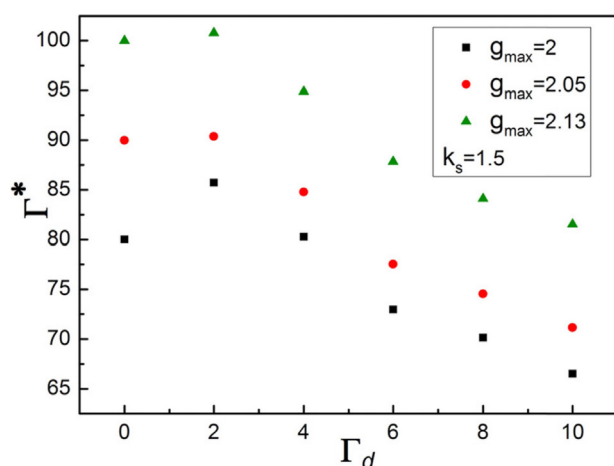


Рисунок 7 – Изменение параметра связи заряд-заряда с увеличением параметра связи диполь-диполь при этом, не изменяя значение первого максимума ПКФ.

Рисунки 6 и 7 могут быть использованы для косвенного измерения дипольного момента пылевой частицы, даже если рассматривается составная частица (пылинка + фокусирующее ионное облако) (например, в экспериментах, где дополнительное внешнее постоянное поле прикладывается к ВЧ разряду [17]).

В таких экспериментах заряд пылевой частицы должен быть точно измерен, как без постоянного внешнего поля, так и с постоянным внешним полем. Добавляя постоянное внешнее поле, дипольный момент составной частицы могут быть индуцированы [3]. Сравнивая пики ПКФ, значение индуцированного дипольного момента может быть измерено на основе модели, представленной в этой статье. Отметим, что автокорреляционная функция скоростей может быть использована в качестве дополнительного

инструмента для косвенного измерения параметров плазмы, как показано в [18]. Пылевая плазма может быть уникальным инструментом для исследований коллективных динамических и статических свойств систем, где важно и Кулоновское взаимодействие, и диполь-дипольное взаимодействие. В частности, это интересно найти единственный эффективный параметр связи, который может описать фазовое состояние системы при различных значениях параметров связи заряд-заряда, диполь-диполя и параметра экранирования. (Для двумерных Юкавских систем, эффективный параметр связи был получен в работе [19].) Это может позволить создать мост между физикой сильно связанных Кулоновских систем и физикой систем с дипольным взаимодействием [20], и может оказаться работой с основополагающим значением.

#### Литература

- 1 Lapenta G. Dipole moments on dust particles immersed in anisotropic plasmas // *Phys. Rev. Lett.* – 1995. – Vol. 75. – P. 4409-4412.
- 2 Shukla P.K. and Eliasson B. Colloquium: Fundamentals of dust-plasma interactions // *Rev. Modern Phys.* – 2009. – Vol. 81. – P. 25-44.
- 3 Sukhinin G.I. and Fedoseev A.V. Formation of a trapped-ion cloud around a dust particle in low-density plasma // *IEEE Trans. Plasma Sci.* – 2010. – Vol. 38, no. 9. – P.2345-2352.
- 4 Chai K.-B. and Bellan P.M. Study on morphology and growth of water-ice grains spontaneously generated in a laboratory plasma // *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.* – 2015. – Vol. 127. – P.83-91.
- 5 Yousefi R., Davis A.B., Carmona-Reyes J., Matthews L.S., and Hyde T.W. Measurement of net electric charge and dipole moment of dust aggregates in a complex plasma // *Phys. Rev. E.* – 2014. – Vol. 90. – P. 033101.
- 6 Lisin E.A., Lisina I.I., Vaulina O.S., and Petrov O.F. Solution of the inverse Langevin problem for open dissipative systems with anisotropic interparticle interaction // *Phys. Plasmas.* – 2015. – Vol. 22, no. 3. – P. 033704.
- 7 Qiao K., Kong J., Carmona-Reyes J., Matthews L.S., and Hyde T.W. Mode coupling and resonance instabilities in quasi-two-dimensional dust clusters in complex plasmas // *Phys.Rev.E.* – 2014. – Vol. 90. – P. 033109.
- 8 Käehlert H. Ion-dust streaming instability with non-Maxwellian ions // *Phys. Plasmas.* – 2015. – Vol. 22, no. 7. – P. 073703.
- 9 Thomsen H. and Bonitz M. Resolving structural transitions in spherical dust clusters // *Phys. Rev. E.* – 2015. – Vol. 91. – P. 043104.
- 10 Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N., Kodanova S.K., Daniyarov T.T., and Dosbolayev M.K. Thermodynamic properties of dusty plasma on the basis of the Langevin dynamics // *Contrib. Plasma Phys.* – 2009. – Vol. 49, nos. 1–2. – P. 15–20.
- 11 Ramazanov T.S., Kodanova S.K., Dzhumagulova K.N., and Bastykova N.K. The new method for measuring of dust particles charge in glow discharge plasma // *Europhys. Lett.* – 2011. – Vol. 96, no. 4. – P. 45004.
- 12 Orazbayev S.A., et al. The diagnostics of dusty plasma in RF discharge by two different methods // *Contrib. Plasma Phys.* – 2013. – Vol. 53, no. 4–5. – P. 436–441.
- 13 Ramazanov T.S., Moldabekov A.Z., and Gabdullin M.T. Multipole expansion and effective interaction potentials of plasma particles // to be published in *Phys.Rev. E.*
- 14 Landau L. D. and Lifshitz E.M. *Theory of Fields.* – M.: Physmathlit, 2003. – P. 133–141.
- 15 Kodanova S.K., Ramazanov T.S., Bastykova N.K., and Moldabekov Z.A. Effect of dust particle polarization on scattering processes in complex plasmas // *Phys. Plasmas.* – 2015. – Vol. 22, no. 6. – P. 063703.
- 16 Allen M.P. and Tildesley D.J. *Computer Simulation of Liquids.* – New York, NY, USA: Oxford Univ. Press, 1991. – P. 184–185.
- 17 Iwashita S. et al. Transport control of dust particles via the electrical asymmetry effect: Experiment, simulation and modeling // *J. Phys. D, Appl. Phys.* – 2013. – Vol. 46, no. 24. – P. 245202.
- 18 Ott T., Stanley M., and Bonitz M. Non-invasive determination of the parameters of strongly coupled 2D Yukawa liquids // *Phys. Plasmas.* – 2011. – Vol. 18, no. 6. – P.063701.
- 19 Hartmann P., Kalman G.J., Donkó Z., and Kutasi K. Equilibrium properties and phase diagram of two-dimensional Yukawa systems // *Phys.Rev.E.* – 2005. – Vol. 72. – P.026409.
- 20 Golden K.I., Kalman G.J., Hartmann P., and Donkó Z. Dynamics of two-dimensional dipole systems // *Phys. Rev. E.* – 2010. – Vol. 82. – P. 036402.

### References

- 1 G. Lapenta, Phys.Rev.Lett., 75, 4409–4412, (1995).
- 2 P.K. Shukla and B. Eliasson, Rev. Modern Phys., 81, 25–44, (2009).
- 3 G.I. Sukhinin and A.V. Fedoseev, IEEE Trans. Plasma Sci., 38 (9), 2345–2352, (2010).
- 4 K.-B. Chai and P.M. Bellan, J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys., 127, 83–91, (2015).
- 5 R. Yousefi, A.B. Davis, J. Carmona-Reyes, L.S. Matthews, and T.W. Hyde, Phys. Rev. E, 90, 033101, (2014).
- 6 E.A. Lisin, I.I. Lisina, O.S. Vaulina, and O.F. Petrov, Phys. Plasmas, 22 (3), 033704, (2015).
- 7 K. Qiao, J. Kong, J. Carmona-Reyes, L.S. Matthews, and T.W. Hyde, Phys.Rev.E, 90, 033109, (2014).
- 8 H. Käehlert, Phys. Plasmas, 22 (7), 073703 (2015).
- 9 H. Thomsen and M. Bonitz, Phys. Rev. E, 91, 043104, (2015).
- 10 T.S. Ramazanov, K.N. Dzhumagulova, S.K. Kodanova, T.T. Daniyarov, and M.K. Dosbolayev, Contrib. Plasma Phys., 49 (1–2), 15–20, (2009).
- 11 T.S. Ramazanov, S.K. Kodanova, K.N. Dzhumagulova, and N.K. Bastykova, Europhys. Lett., 96, no. 4, 45004, (2011).
- 12 S.A. Orazbayev et al., Contrib. Plasma Phys., 53 (4–5), 436–441, (2013).
- 13 T.S. Ramazanov, A.Z. Moldabekov, and M.T. Gabdullin, «Multipole expansion and effective interaction potentials of plasma particles,» to be published in Phys.Rev. E.
- 14 L.D. Landau and E.M. Lifshitz, Theory of Fields. Moscow, Russia: Physmathlit, 2003, pp. 133–141.
- 15 S.K. Kodanova, T.S. Ramazanov, N.K. Bastykova, and Z.A. Moldabekov, Phys. Plasmas, 22, (6), 063703, (2015).
- 16 M.P. Allen and D.J. Tildesley, Computer Simulation of Liquids. New York, NY, USA: Oxford Univ. Press, 1991, pp. 184–185.
- 17 S. Iwashita et al., J. Phys. D, Appl. Phys., 46(24), 245202, (2013).
- 18 T. Ott, M. Stanley, and M. Bonitz, Phys. Plasmas, 18 (6), 063701, (2011).
- 19 P. Hartmann, G. J. Kalman, Z. Donkó, and K. Kutasi, Phys.Rev.E, 72, 026409, (2005).
- 20 K.I. Golden, G.J. Kalman, P. Hartmann, and Z. Donkó, Phys. Rev. E, 82, 036402, (2010).