

УДК 53.072+533.9:51-73

Ж.А. Молдабеков, Т.С. Рамазанов*

Казахский национальный университет имени аль-Фараби, НИИЭТФ, Казахстан, г. Алматы
*E-mail: ramazan@physics.kz

Исследование коллективных колебаний в двухмерной неидеальной плазме методом молекулярной динамики

Методом молекулярной динамики проведено исследование коллективных колебаний в двухмерной неидеальной плазме. Рассмотрена однокомпонентная неидеальная плазма с экранированным межчастичным потенциалом взаимодействия. Были рассчитаны продольная часть и поперечная часть автокорреляционной функции тока. Продольная часть автокорреляционной функции тока характеризует колебания плотности. Показано, что в сильно коррелированной плазме реализуется мода, близкая по характеристикам к акустической моде. Акустическая мода при малых длинах волны переходит в плазменную волну и при больших длинах волны реализует звуковую волну. Скорость звуковой волны больше тепловой скорости частиц плазмы, что свидетельствует о жидкофазном состоянии. Групповая скорость коллективных колебаний стремится к нулю на границе зоны Бриллюэна.

Ключевые слова: неидеальная плазма, метод молекулярной динамики, автокорреляционная функция.

Ж.А. Молдабеков, Т.С. Рамазанов
**Екі өлшемді идеалемес плазмадағы тербелістерді
молекулярлы динамика әдісімен зерттеу**

Молекулярлы динамика әдісімен екі өлшемді идеалемес плазмадағы коллективті тербелістер зерттелді. Экрандалған потенциал арқылы әсерлесетін бір компонентті идеалемес плазма қарастырылды. Ток автокорреляторының бойлы және көлденең құраушылары есептелді. Бойлы құраушысы тығыздық тербелісін сипаттайды. Идеалемес плазмада акустикалық тербелістер орын алатыны, қысқа толқындарда плазмалық тербелістерге, ал кері жағдайда дыбыс тербелісіне өтетіні және дыбыс жылдамдығының бөлшектер жылдамдығынан жоғары екені көрсетілді. Бриллюэн аумағының шекарасында тербелістің топтық жылдамдығы нөлге ұмтылатыны анықталды.

Түйін сөздер: идеалемес плазма, молекулярлы динамика әдісі, автокоррелятор қызметі.

Zh.A. Moldabekov, T.S. Ramazanov
**Investigation of the collective excitation in 2D nonideal plasma
by molecular dynamics simulation method**

The investigation of the collective excitations in strongly coupled, two dimensional plasma is performed by molecular dynamics method. One component nonideal plasma with screened Coulomb interparticle interaction potential is considered. It is shown that in strongly coupled plasma quasi acoustic mode reproduces. The group velocity on the edge of the Brillouen zone approaches to the zero. Long wave length limit is sound wave and short wave length limit is plasma oscillations.

Key words: nonideal plasma, the method of molecular dynamics, the autocorrelation function

Введение

В настоящее время исследование неидеальной двумерной плазмы как в классическом, так и квантовом случае, представляет большой интерес в связи с аномальными коллективными

свойствами наблюдаемые в эксперименте и моделировании. Уменьшение размерности от трехмерного к двумерному приводит к таким эффектам как Бозе конденсация, сверхтекучесть и связанные с этим фазовые переходы. В

классической плазме уменьшение размерности приводит к наблюдению аномальных транспортных характеристик плазмы [1]. Одним из них является так называемая супердиффузия [2]. Это явление наблюдалось в экспериментах по пылевой плазме. Так же, такое поведение получено в компьютерном моделировании [3,4].

В данной работе методом молекулярной динамики исследуется неидеальная однокомпонентная плазма (ОКП). Межчастичный потенциал взаимодействия:

$$\Phi = \frac{\Gamma}{R} \exp[-R / \lambda_D], \quad (1)$$

где λ_D длина экранирования и R расстояние между частицами в единицах среднего межчастичного расстояния $a = (3 / 4\pi n)^{-1/3}$, $\Gamma = Q^2 / ak_p T$ параметр связи, n концентрация частиц, Q заряд частицы.

Информация о колебании плотности заключена в динамическом структурном факторе и находится через автокорреляционную функцию плотности по формуле:

$$S(k, \omega) = \frac{1}{2\pi N} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} |F_t \{ \rho(k, t) \}|^2, \quad (2)$$

где $\vec{k} = k\vec{e}_z$ в единицах среднего межчастичного расстояния a и F_t обозначает Фурье преобразование по времени, ω в единицах плазменной частоты $\omega_p = (2\pi n Q^2 / ma)^{1/2}$, m масса частицы. Фурье компонента флуктуации плотности находим при проведении молекулярной динамики по формуле:

$$\rho(\vec{k}, t) = \sum_{j=1}^N \exp(i\vec{k}\vec{r}_j). \quad (3)$$

Продольные и поперечные колебания в плазме могут быть определены из оператора тока:

$$\vec{j}(\vec{k}, t) = \sum_{j=1}^N \vec{v}_j(t) \exp(ikz_j(t)) \quad (4)$$

Продольный спектр и поперечный спектр колебаний определяются по формулам:

$$L(k, \omega) = \frac{1}{2\pi N} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} |F_t \{ j_L(k, t) \}|^2, \quad (5)$$

$$T(k, \omega) = \frac{1}{2\pi N} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} |F_t \{ j_T(k, t) \}|^2. \quad (6)$$

Связь между динамическим структурным фактором $S(k, \omega)$ и $L(k, \omega)$ [5-7]:

$$S(k, \omega) = \frac{k^2}{\omega^2} L(k, \omega). \quad (7)$$

Как видно из уравнения (7) продольная часть спектра колебаний тока содержит полную информацию о флуктуации плотности. В дальнейшем основное внимание будет сосредоточено на вычислении $L(k, \omega)$.

Спектр колебаний тока

При Фурье анализе любого сигнала в целях устранения шума обычно используют весовую функцию. На рисунках 1 и 2 показаны рассчитанные значения $L(k, \omega)$ при различных значениях волнового вектора в зависимости от частоты. На рисунке 2 приведен $L(k, \omega)$ с использованием весовой функции Хамма (Hamming window function):

$$f(n) = 0.54 - 0.46 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right), \quad (8)$$

где N полное число точек.

Из сравнения рисунков 1 и 2 видно, что смазанные пики при $k = 1.0, 1.3$ (рисунок 1) хорошо воспроизводятся при использовании весовой функции. При этом позиция пиков не изменяется, но искажается высота пика. Последнее не сильно важно, поскольку мы будем исследовать дисперсионную кривую.

На рисунке 3 показана дисперсионная кривая в виде профиля $L(k, \omega)$ на (ω, k) плоскости. Круглыми точками указаны среднее значение частоты, на которое приходится пик $L(k, \omega)$ при заданном волновом векторе. Параметры моделирования: число

частиц 1250, число временных шагов $2 \cdot 700000$, число шагов на котором проводился набор данных $2 \cdot 524288$, длина шага 0.01.

Как видно из рисунка 3, групповая скорость на границе зоны Бриллюэна $k \rightarrow \pi / 2a$ стремится к нулю и частота колебаний примерно в два раза меньше плазменной частоты. Последняя обусловлена сильной неидеальностью плазмы. В целом дисперсионная кривая имеет вид акустической моды.

Длинноволновый предел $k \rightarrow 0$ определяет звуковую волну с групповой скоростью $v \propto \partial\omega / \partial k$. Так в представленном компьютерном эксперименте $v \approx 0.3 \omega_p a$. В единицах тепловой скорости имеем $v \approx 4.2 v_T$, где $v_T = \sqrt{3k_B T / m}$. Таким образом, звуковая волна имеет скорость больше тепловой скорости. Это указывает на жидко- фазное состояние.

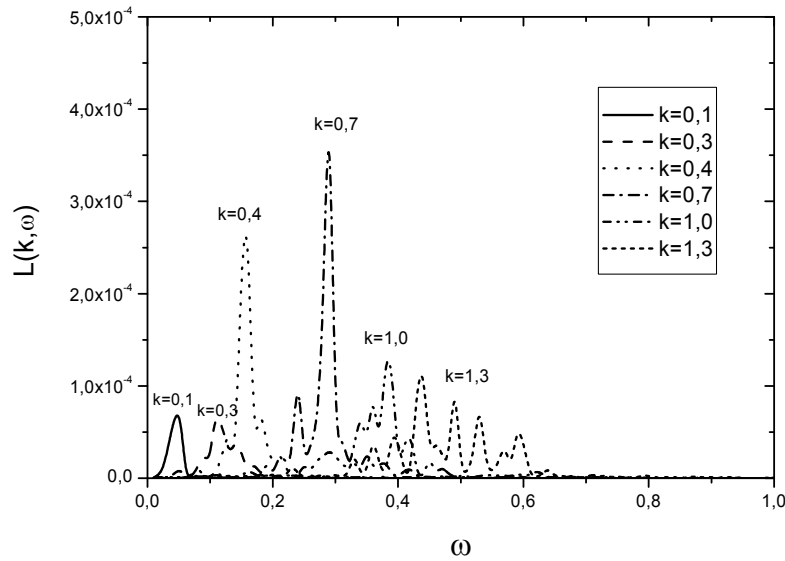


Рисунок 1 – Продольная часть спектра колебаний тока $L(k, \omega)$ без использования весовой функции. $\Gamma = 200, \lambda_D^{-1} = 2$.

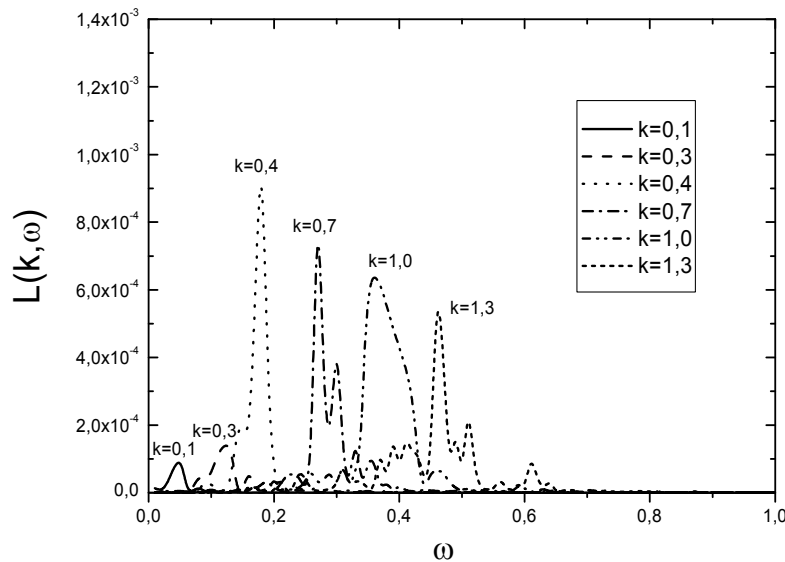


Рисунок 2 – Продольная часть спектра колебаний тока $L(k, \omega)$ с использованием весовой функции. $\Gamma = 200, \lambda_D^{-1} = 2$.

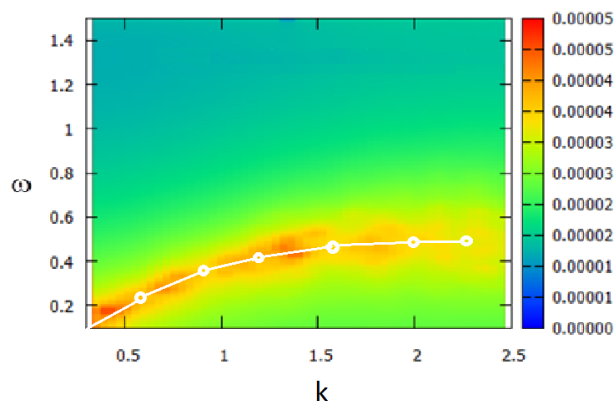


Рисунок 3 – Дисперсионная кривая в виде профиля $L(k, \omega)$ на (ω, k) плоскости. $\Gamma = 200$, $\lambda_d^{-1} = 2$.

Заключение

Провидено моделирование флуктуации плотности тока в неидеальной плазме методом молекулярной динамики. Представлено сравнения продольной части флуктуации тока

рассчитанная без использования весовой функции и с использованием весовой функции. Представлена рассчитанная дисперсионная кривая и показано что она по главным чертам похожа на акустическую моду в кристалле.

References

- 1 B. Alder, and T.E. Wainwright // Phys.Rev.A, 1, 18 (1970).
- 2 Z. Donkó, J. Goree, P. Hartmann, Bin Liu // Phys. Rev. E 79, 026401 (2009).
- 3 T. Ottet. all.// Phys.Rev. E 78, 026409 (2008).
- 4 T. Ott, M. Bonitz // Phys.Rev.Letters 103, 195001 (2009).
- 5 J.P. Hansen, I.R. Mc Donald, and E.L. Pollock //Phys.RevA11,1025(1975).
- 6 J. Boon and S. Yip // Molecular Hydrodynamics (Courier Dover Publications, New York, 1991).
- 7 J. Hansen and I. McDonald // Theory of Simple Liquids (Academic Press, New York, 2006).