

ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ СВОЙСТВ ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВЫХ ФОРМИРОВАНИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СПЕКТРА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ПЛОТНОСТИ

Т.Т. Данияров, М.К. Досболаев, Е.Б. Жанкарашев, А.Н. Джумабеков, Т.С. Рамазанов
НИИЭТФ, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы

В работе исследуются структурные свойства макроскопических пылевых формирований в комплексной плазме на анализа спектра пространственной плотности, основанного на двумерном преобразовании Фурье. Показана способность метода к выявлению скрытой симметрии в системе, что служит обоснованием ее применения для изучения динамики фазовых переходов в плазменно-пылевых структурах в режиме реального времени.

Введение

Макроскопические пылевые формирования в комплексной плазме предоставляют уникальную возможность для изучения широкого спектра коллективных процессов в сильно-взаимодействующих системах [1]. К таким процессам можно отнести фазовые переходы «газ-жидкость», «жидкость-твердое тело», распространение нелинейных волн и т.п. Динамика этих процессов может быть изучена в лабораторных условиях на самом фундаментальном – кинетическом – уровне с помощью достаточно простого экспериментального оснащения, что существенно отличает плазменно-пылевые формирования (далее - ППФ) от других физических объектов.

В эксперименте информация о системе пылевых частиц получается на основе последовательности изображений ППФ в плазме, регистрируемых фото- или видеокамерой при освещении лазерным ножом [2]. При последующей компьютерной обработке изображений из них извлекается информация о координатах отдельных пылевых частиц, которая служит основой для применения различных методов анализа временной эволюции структурных и динамических характеристик системы. При этом, точность определения координат ограничивается лишь разрешающей способностью оптической системы.

Для характеристики степени и характера пространственной упорядоченности ППФ наиболее часто используется парная корреляционная функция $g(r)$ пылевых частиц (далее - ПКФ) [3]. Данная функция определяет вероятность нахождения пылевой частицы на расстоянии r от пробной частицы, и для изотропной и однородной системы, ее расчет производится согласно :

$$g(r) = \frac{1}{n_d} \cdot \frac{\Delta \bar{N}(r)}{\pi dr(2R - dr)}. \quad (1)$$

Нормировка ПКФ производится таким образом, что при $r \rightarrow \infty$, $g(r) \rightarrow 1$, что отражает отсутствие корреляций между частицами на достаточно большом расстоянии друг от друга.

В жидкой и кристаллической фазе на ПКФ можно наблюдать характерные максимумы и минимумы, что свидетельствует о наличии упорядоченности в ППФ. Для характеристики степени упорядоченности на основе ПКФ в литературе используется отношение высоты первого максимума к высоте первого минимума ПКФ, $\gamma = g_{\max} / g_{\min}$. При $\gamma \geq 2,2$ можно предположить в системе наличие плазменно-пылевого кристалла; в обратном случае предполагается, что система находится в жидком состоянии [4].

В тоже время рядом авторов отмечено достаточное неудобство ПКФ для исследований процессов в области фазового перехода в ППФ. В этом случае образование пылевого кристалла происходит не мгновенно, и в некотором узком интервале физических параметров обе фазы – жидкая и твердая – сосуществуют одновременно. При этом кристаллическая структура формируется постепенно в виде доменов, порядок в которых хаотически

ориентирован относительно других доменов. В таких условиях использование ПКФ является затруднительным, т.к. она не позволяет достаточно надежно выявить и характеризовать наличие симметрии в системе. Как следствие, требуется вычисление дополнительных физических параметров, таких как, например, параметр Линдемана. Вычисление и трактовка этих параметров также не лишены определенной степени условности и сопряжены с достаточно интенсивными вычислительными процедурами.

Такая ситуация определяет интерес к поиску альтернативных методов анализа структурных свойств ППФ. В связи с этим авторами работы было предложено использование двумерного преобразования Фурье (далее - ДПФ) изображений пылевых структур для изучения скрытого порядка в условиях фазовых переходов [5]. При этом используется соответствие квадрата модуля двумерного Фурье-образа, также называемого спектром пространственной плотности пылевых частиц, рентгеновской дифракционной картине Фраунгофера, которая традиционно используется для характеристики структурных свойств твердых тел.

В данной работе исследуется возможность применения ДПФ для качественной характеристики структурных свойств ППФ. Для этого способность ДПФ к обнаружению скрытой симметрии в системе будет проиллюстрирована на примере смоделированных двумерных изображений, а также реальных конфигураций плазменно-пылевых формирований.

Обсуждение результатов

Исследование свойств ДФП было произведено на основе смоделированных изображений размером 256x256 пикселей, в которых градация интенсивности описывалась целым числом от 0 до 255. Изображения состояли из черного фона и нескольких пылевых частиц, которые имели эффективный радиус, равный 3 пикселям, и интенсивность свечения которых спадало по закону Гаусса.

Для построения спектров пространственной плотности было использовано быстрое дискретное преобразование Фурье. С помощью полученных пространственных распределений реальной и мнимой компонент ДФП, получается распределение квадрата модуля ДФП. Последнее преобразуется в цифровое изображение, яркость пикселей которого пропорциональна модулю Фурье-образа в соответствующей точке. Для предотвращения искажений пространственного спектра в результате преобразования Фурье, к смоделированным изображениям применяется комбинация линейных фильтров, эффективно уменьшающих интенсивность структур менее 2 пикселей (помехи) и более 200 пикселей (фон).

На рис 1-3 приведены смоделированные изображения и их пространственные спектры. Рисунок 1а показывает ситуацию, в которой отсутствует корреляция между частицами. Положение частиц сгенерировано случайно с равной вероятностью по всей площади изображения. Как следствие, пространственный спектр изображения, приведенный на рис. 1б, не имеет каких-либо особенностей, свидетельствующих о наличии симметрии в системе.

На рис. 2а приведено изображение, которое получено суперпозицией рис. 1а и фрагментом кристаллической квадратной решетки из 25 частиц. Внешне приведенная структура кажется неупорядоченной, однако ее пространственный спектр, приведенный на рис. 2б, четко выявляет наличие скрытой симметрии. Легко понять, что применение ПКФ в данном случае являлось бы не эффективным, т.к. информация о симметрии в системе была бы утеряна при усреднении по конфигурациям частиц.

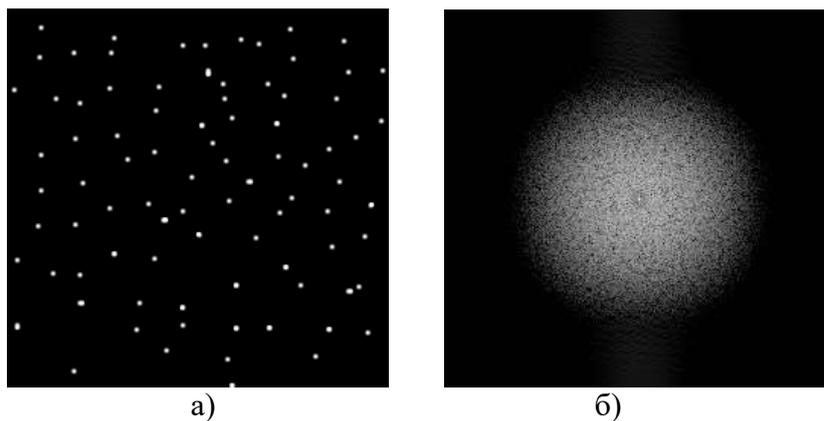


Рис. 1. Результаты моделирования: а) смоделированная пылевая структура с случайно распределенными частицами; б) соответствующий спектр пространственной плотности

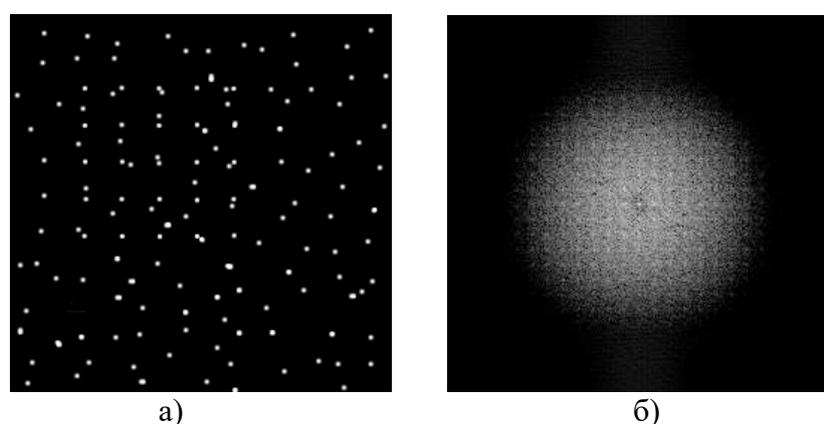


Рис. 2. Результаты моделирования: а) то же, что и 1а, с добавлением фрагмента кристаллической решетки из 25 частиц; б) соответствующий спектр пространственной плотности

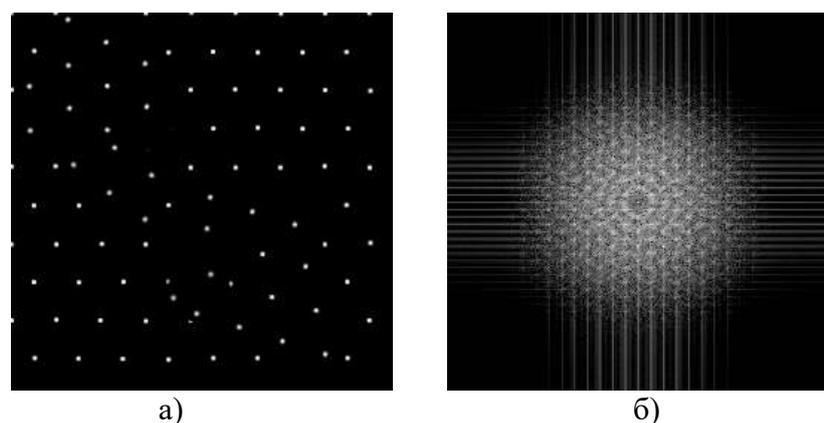


Рис. 3. Результаты моделирования: а) пылевая структура, состоящая из доменов со случайно ориентированными осями симметрии; б) соответствующий спектр пространственной плотности

Другим интересным случаем, имеющим практическое применение, является рис. 3а, на котором приведен фрагмент пылевой системы, состоящей из нескольких доменов, обладающих внутренней плотноупакованной кристаллической структурой. При этом оси симметрии отдельных доменов случайно ориентированы относительно осей симметрии других доменов. Спектр пространственной плотности для этого изображения приведен на

рис. 3б. На данном спектре четко выявляется симметрия пылевой структуры в виде шести равноудаленных максимумов интенсивности, расположенных в центре изображения. Смещение кристаллических осей доменов относительно других доменов приводит к размыванию структуры и формированию четко различимого шестиугольника на спектре пространственной плотности.

Используя полученные сведения о свойствах ДФП можно проанализировать структурные свойства реального ППФ, полученного в тлеющем разряде постоянного тока в атмосфере аргона при давлении $p = 0,2$ Торр и силе тока $I = 0,23$ мА (рис.4а) [6]. Анализ структуры на основе традиционных методов, в частности, ПКФ, в таком случае достаточно затруднен в виду достаточно небольшого общего числа частиц в системе. В тоже время, спектр пространственной плотности, приведенный на рис. 4б, позволяет четко выявить наличие о симметрии в системе пылевых частиц. На основании случая, рассмотренного на примере рис. 3, можно утверждать наличие плотноупакованной поликристаллической структуры.

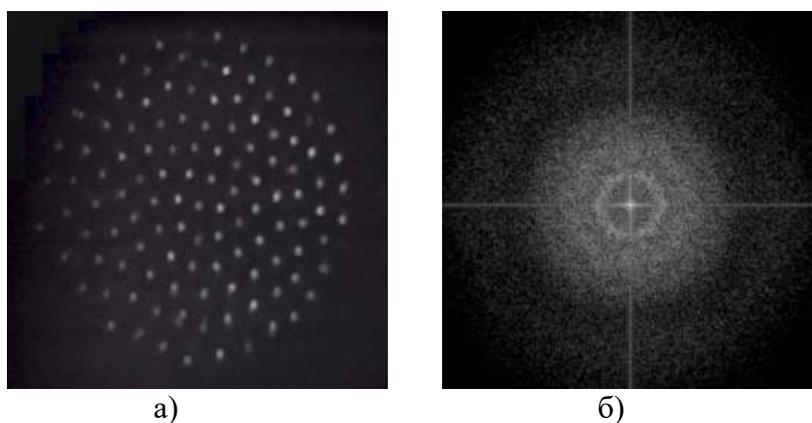


Рис. 4. Результаты эксперимента: а) пылевая структура, наблюдаемая в тлеющем разряде постоянного тока при $p = 0,2$ Торр $I = 0,23$ мА; б) соответствующий спектр пространственной плотности

Следует еще раз подчеркнуть, что данный вывод сделан на основании анализа всего одного изображения пылевой структуры. Так как вычислительные алгоритмы, необходимые для реализации ДФП, являются хорошо изученными и не предъявляют повышенных требований к вычислительной мощности, результаты, полученные в данной работе, открывают возможность для реализации методики анализа фазовых переходов в ППФ в режиме реального времени, например, для изучения динамики упорядоченности от условий эксперимента. Это выгодно отличает данный метод от традиционных методов анализа структурных свойств ППФ, которые предоставляют информацию только после окончания эксперимента.

Заключение

В данной работе подтверждена актуальность применения анализа спектров пространственной плотности для изучения структурных свойств ППФ комплексной плазмы в области фазовых переходов «жидкость – твердое тело». Результаты, полученные в работе, обосновывают дальнейшие работы по созданию экспериментальной методики, позволяющей надежно отслеживать и количественно характеризовать динамику формирования симметрии в режиме реального времени.

Благодарность

Данная работа выполнена за счет средств грантов МОН РК ОС-1.1 и МП-1.

Литература

1. Фортов В.Е., Храпак А.Г., Храпак С.А., Молотков В.И., Петров О.Ф. // УФН. 2004. Т.174. №5. С.495-543.
2. T.S. Ramazanov, K.N. Dzhumagulova, A.N. Jumabekov, and M.K. Dosbolayev, Phys. Plasmas 15, No.5, 053704 (2008).
3. F.V.Baimbetov, T.S.Ramazanov, K.N.Dzhumagulova, E.R.Kadysizov, O.F.Petrov and A.V. Gavrikov. // J.Phys.A: Math. And Gen. 2006, 39, 4521–4525.
4. Ваулина О.С., Петров О.Ф., Фортов В.Е., Чернышев А.В., Гавриков А.В., Шахова И.А., Семенов Ю.П. // Физика Плазмы. 2003. Т.29. №8. С.698-713.
5. Бульба А.В., Луизова Л.А., Пискунов А.А., Соловьев А.В. // ФНТП-2007. 2007. Т.2. С.214.
6. T.S. Ramazanov, M.K. Dosbolayev, A.N. Jumabekov, O.F. Petrov, S.N. Antipov 5th PPPT. September 18-22, 2006, Minsk, Belarus. P. 384-387

КЕҢІСТІКТІК ТЫҒЫЗДЫҚ СПЕКТРІН САРАПТАУ НЕГІЗІНДЕ ТОЗАҢДЫ-ПЛАЗМАЛЫҚ ҚҰРАМАЛАРДЫҢ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ

Т.Т. Данияров, М.К. Досболаев, Е.Б. Жанқарашев, А.Н. Жұмабеков, Т.С. Рамазанов

Бұл жұмыста комплексті плазмадағы макроскопиялық тозаңды құрамалардың құрылымдық сипаттамалары үшін екі өлшемді Фурье түрлендіруіне негізделген кеңістіктік тығыздық спектр сараптауын қолдану зерттелінген. Қолданылған әдістің жүйедегі жасырын симметрияны табу қабылеттілігі осы әдісті нақты уақыт мезетінде тозаңды плазмалық құрылымдардағы фазалық ауысу динамикасын зерттеу үшін қолдануға болатындығының дәлелі екені көрсетілген.

INVESTIGATION OF STRUCTURAL PROPERTIES OF DUST FORMATIONS IN COMPLEX PLASMA ON THE BASIS OF SPATIAL DENSITY SPECTRUM ANALYSIS

T.T. Daniyarov, M.K. Dosbolayev, Ye.B. Zhankarashev, A.N. Jumabekov, T.S. Ramazanov

In this paper, application of analysis of spatial density spectrum on the basis of two-dimensional Fourier transformation to the investigation of structural properties of macroscopic dusty formation in complex plasma is studied. The ability of this method to reveal hidden symmetry in the system is shown. This property rectifies its application to further study of real-time dynamics of phase transitions in dusty plasma.