

## **Структурные фазовые переходы в плазменно-пылевых кластерах**

*К.Г. Косс<sup>1,2</sup>, О.Ф. Петров<sup>1,2</sup>, М.И. Мясников<sup>1</sup>, К.Б. Стаценко<sup>1,2</sup>, М.М. Васильев<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Объединенный институт высоких температур РАН

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет)

Кластеры обнаруживают особенности, которые не характерны ни для микроскопических, ни для макроскопических тел. Поэтому такие мезоскопические объекты иногда относят к «пятому состоянию материи», в дополнение к твердому, жидкому, газообразному и плазменному. Описание малых систем является не тривиальным, т.к. к ним неприменимы методы статистической термодинамики. Ситуация осложняется, если мы имеем дело с открытыми системами – а в приложениях мы рассматриваем преимущественно их.

Одной из интереснейших задач в изучении кластеров является исследование фазовых переходов в них, что обусловлено распространенностью малых систем в различных технических приложениях. В частности, агрегатное состояние кластеров молекул и атомов оказывает существенное влияние на свойства искусственных материалов, содержащих узкие капилляры и малые поры. Однако классический термодинамический подход к малым системам неприменим. Дело в том, что ключевым понятием в классической термодинамике является термодинамический предел, т.е. переход к системе из бесконечного числа частиц в бесконечном объеме – переход, который невозможно использовать в мезоскопических структурах [1, 2].

Фактически, изучение фазовых переходов в малой системе представляет собой изучение перехода структуры от порядка к хаосу и обратно. Если не ограничиваться рассмотрением термодинамически изолированных систем, практически не встречающихся в природе, то единственной функцией, которую можно использовать в качестве меры хаотичности, является энтропия [3]. В настоящей работе для вычисления динамической энтропии исследуемых систем используется простое приближение, которое легко можно применять для анализа экспериментов и численного моделирования [4-6]: так называемая “динамическая энтропия первого пересечения” (MFPT dynamic entropy).

Экспериментальная часть данной работы была выполнена с уникальным физическим объектом – структурами, формируемыми частицами микронного размера в плазме. Этот объект позволяет наблюдать мезоскопические системы невооруженным глазом и регистрировать движение составляющих их частиц на “кинетическом” уровне.

Плавление квазидвумерных кластеров макрочастиц в плазме было исследовано экспериментально и с помощью численного моделирования. Эксперименты проводились с полимерными частицами, левитирующими в приэлектродном слое высокочастотного емкостного разряда, увеличение кинетической температуры пылинок достигалось с помощью облучения их лазерным пучком. Численное моделирование малых систем проводилось методом молекулярной динамики с использованием термостата Ланжевена. Техника моделирования подробно описана в работе [7]. Расчеты были выполнены для двумерных систем с экранированным кулоновским потенциалом взаимодействия.

Экспериментально и численно получены функции динамической энтропии для систем из 7 частиц для различных значений кинетических температур. Наблюдались три фазовых состояния рассмотренных малых систем (кристаллическое, жидкостное и переходное). Описан механизм фазовых переходов в рассмотренных системах. Предлагаемый способ анализа динамики систем может применяться к сколь угодно малым структурам, вплоть до структур, состоящих из одной частицы.

#### Литература

1. *Gross D.H.E.* Microcanonical Thermodynamics. – Singapore: World Scientific, 2001.
2. *Hill T.L.* Statistical Mechanics: Principles and Selected Applications. – N.Y.: Dover Publications, 1987.
3. *Климонтович Ю.Л.* Введение в физику открытых систем. – М.: Янус-К, 2002.
4. *Gaspard P. and Wang X.-J.* – Phys. Rep. – **235** – 1993 – p.291
5. *Allegrini P., Douglas J.F., and Glotzer S.C.* – PRE – **60** – 1999 – p.5714
6. *Gaspard P., Briggs M.E., Francis M.K., Sengers J.V., Gammon R.W., Dorfman J.R., and Calabrese R.V.* – Nature – **384** – 1998 – p.865
7. Complex and Dusty Plasmas / ed. by Fortov V.E. and Morfill G.E. – CRC Press, 2010.