*Владимир Афанасьевич ПИЛИПЕНКО —
доцент кафедры моделирования
физических процессов и систем
физического факультета,
кандидат физико-математических наук*

УДК 536.7

РЕШЕТОЧНЫЕ СИСТЕМЫ С МНОГОЧАСТИЧНЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ

АННОТАЦИЯ. Обсуждается возможность учета многочастичного взаимодействия в решеточных системах классической статистической физики методом производящего функционала.

The lattice systems of classical statistical physics with many-particle interactions are considered on the basis of the generating functional method.

Решеточные модели равновесной статистической физики рассматривались во многих работах [1-2]. В зависимости от типа и размерности решетки, характера взаимодействия эти модели имеют различную физическую интерпретацию. Модель решеточного газа применялась для изучения фазового перехода первого рода жидкость—газ, для изучения локализованной адсорбции на подложке, имеющей регулярную кристаллическую структуру. Решеточная модель полимеров оказалась полезной для объяснения эффектов упорядочения сложных молекул в растворах и на поверхности кристаллов.

Особый интерес представляют решеточные модели, допускающие аналитическое решение. Анализ свойств решений таких моделей оказался полезным для понимания сложных реальных систем. Прежде всего, следует напомнить о той важной роли, которую исторически сыграло решение Онсагером модели Изинга. Именно тогда впервые была высказана мысль о необходимости при изучении объемных свойств систем статистической механики находить предельные характеристики бесконечных систем. В традиционном методе расчета статистических сумм ансамблей Гиббса фазовый переход связывается с нарушением аналитичности термодинамических потенциалов по параметрам, определяющим термодинамическое состояние системы. Янг и Ли в работе 1952 г. [3], исследуя распределение нулей в комплексной плоскости активности z статистической суммы большого канонического ансамбля, показали, что такие особенности у термодинамических функций могут появляться только при выполнении термодинамического предельного перехода. К сожалению, класс точно решаемых решеточных моделей ограничивается одномерными и двумерными системами с бинарным взаимодействием ближайших соседей.

В основном, применяются приближенные методы нахождения корреляционных и термодинамических характеристик решеточных систем. При этом, как и в случае непрерывных систем, ограничиваются бинарным взаимодействием. Соответствующие уравнения для частичных функций распределения являются сложными уравнениями зацепляющегося типа, и при получении замкнутых уравнений для бинарной функции распределения используются качественные соображения, которые трудно обосновать и оценить допускаемую погрешность. Подобные теории не могут правильно описать критическую область, где существенную роль играют многочастичные корреляции. Кроме того, через эти корреляции выражается вклад многочастичных взаимодействий в термодинамические функции. Согласно экспериментальным данным, такой вклад в давление и внутреннюю энергию может достигать 15%. Эти соображения диктуют необходимость учета многочастичных взаимодействий и корреляций. Плодотворным в этом отношении является метод производящего функционала (ПФ), в котором свойства всех частичных функций распределения определяются свойствами их ПФ.

Рассмотрим бесконечную систему одинаковых частиц на решетке Z^d, находящейся в термодинамическом равновесии со средой и имеющей с ней механический, тепловой и материальный контакты. Интенсивность теплового взаимодействия характеризуется величиной $\beta > 0$, обратно пропорциональной температуре, а интенсивность материального взаимодействия описывается активностью $z>0$. Энергия конфигурации N частиц имеет вид:

$$U\{N\} = \sum_{k=1}^{N} \sum_{\{k\}\subset\{N\}} \Phi_k\{k\}, \tag{1}$$

где $\Phi_k\{k\}$ — k-частичный потенциал, симметричный относительно перестановки частиц, $\{k\}$ — совокупность координат группы k частиц, причем допускается совпадение координат разных частиц.

Центральным в методе ПФ является уравнение Боголюбова, которому удовлетворяют производящие функционалы гиббсовских состояний рассматриваемой системы:

$$\prod_{i=1}^{s}\left(1+t_1(x_i)\right)\frac{\delta L(t)}{\prod_{i=1}^{s}\delta t_1(x_i)} = z^s \exp\left(-\beta\overline{U}\{s\}\right)L\left(\bar{t}[s]\right). \tag{2}$$

Аргументом ПФ t является совокупность симметричных функций $t_k\{k\}$, $\overline{U}\{s\}$ — энергия взаимодействия выделенной группы s частиц с модифицированными потенциалами

$$\overline{\Phi}_k\{k\} = \Phi_k\{k\} - \frac{1}{\beta}\ln(1+t_k\{k\}), \tag{3}$$

$\bar{t}[s]$ — преобразованный аргумент производящего фунционала, зависящий от группы s частиц как от параметров:

$$(1+\bar{t}[s])\{k\} = (1+t_k\{k\})\prod_{l=1}^{s}\prod_{\{l\}\subset\{s\}} exp\left(-\beta\overline{\Phi}_{l+k}\{l/k\}\right). \tag{4}$$

Решения уравнения (2), являющиеся ПФ гиббсовских состояний удовлетворяют условию нормировки:

$$L(0) = 1. \tag{5}$$

Если частицы занимают ограниченную область $\Lambda \subset Z^d$ решетки, то уравнение Боголюбова (2) имеет единственное решение, удовлетворяющее условию (5), что свидетельствует об отсутствии фазовых переходов:

$$L_\Lambda(t) = \Xi^{-1}\sum_N \frac{z^N}{N!}\sum_{\{N\}} exp(-\beta U\{N\})\prod_{k=1}^{N}\prod_{\{k\}\subset\{N\}}(1+t_k\{k\}), \tag{6}$$

где Ξ — статистическая сумма большого канонического ансамбля. В случае бесконечной системы наличие нескольких нормированных решений уравнения Боголюбова (2), являющихся ПФ гиббсовских состояний при заданных термодинамических параметрах z, β и определенных условиях на взаимодействие (1), есть статистический критерий фазовых переходов.

Исследование уравнения Боголюбова на единственность решения и построение решений представляет собой сложную задачу. В случае бинарного взаимодействия частные случаи решения этой задачи рассмотрены в работе [4].

Автор выражает благодарность Э. А. Аринштейну за полезные обсуждения рассматриваемой проблемы.

Работа выполнена при поддержке Минобразования РФ, грант УР 01.01.002.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бэкстер Р. Точно решаемые модели в статистической механике. М., 1985. 486 с.
2. Шулепов Ю. В., Аксененко Б. В. Решеточный газ. Киев, 1981. 268 с.
3. Yang C. N., Lee T. D. Statistical theory of equations of state and phase transitions. 1. Theory of condensation // Phys. Rev. 1952. Vol. 87. P. 404-409.
4. Назин Г. И., Пилипенко В. А. Изучение фазовых переходов методом производящего функционала. Тюмень, 1987. 22 с. Деп. в ВИНИТИ № 4882-В87.

Борис Антонович БЕЗУГЛЫЙ —
доцент кафедры радиофизики
физического факультета,
кандидат физико-математических наук;
Александр Анатольевич ФЕДОРЕЦ —
ассистент кафедры радиофизики
физического факультета,
кандидат физико-математических наук

УДК 532.22

ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОИНДУЦИРОВАННОГО ТЕРМОКАПИЛЛЯРНОГО ЭФФЕКТА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА

АННОТАЦИЯ. В жидком слое на твердой подложке лазерным пучком индуцируется термокапиллярное углубление. Исследована интерференционная картина в виде концентрических колец, которая наблюдается на экране, помещенном в поперечное сечение отраженного от углубления лазерного пучка. Установлено, что эволюция диаметра отклика с начала облучения слоя лазерным импульсом или непрерывным пучком зависит от энергии импульса или мощности пучка. На основе этой зависимости предложен метод измерения и контроля энергетических параметров лазерного пучка.

In a liquid layer on a solid substrate the thermocapillary depression is induced by a laser beam. The interference fringe in the form of concentric rings on a screen placed in the cross section of reflected laser beam is studied. It was found, that the evolution of the diameter of this interference picture from the moment of irradiation by a laser pulse or continuous beam depends on the energy of pulse or power of beam. By using this dependence the method of measuring or control of energetic parameters of the laser beam is proposed.

Введение. Устойчивый интерес к термокапиллярным эффектам, индуцируемым излучением лазера, вызван их доминирующей ролью в ряде жидкостных технологий, связанных с обработкой материалов [1-3]. В большинстве работ решались теплофизические и гидродинамические задачи определения поля температур, скоростей [4-6] и профиля термокапиллярной деформации свободной поверхности жидкости [7, 8].

Менее изучен термокапиллярный отклик [7-10] — интерференционная картина в виде концентрических колец, которая наблюдается на экране, расположенном в по-