УДК 539.17.01

КЛАСТЕРИЗАЦИЯ И ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОСКОПИЧЕСКИ РАЗДЕЛЕННЫХ СОСТОЯНИЙ В РАСЧЕТАХ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ ДЕЛЕНИЯ

© 2022 г. Ю. В. Иванский¹, А. В. Унжакова^{1, *}

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет", Санкт-Петербург, Россия

**E-mail: a.unzhakova@spbu.ru* Поступила в редакцию 18.04.2022 г. После доработки 13.05.2022 г. Принята к публикации 23.05.2022 г.

Недавние эксперименты существенно расширили наши знания о кластерных эффектах в процессе деления тяжелых ядер. В последние годы описанию кластеризации в ядерных системах посвящено много новых теоретических исследований на основе расчетов поверхностей потенциальной энергии в рамках модели среднего поля с использованием различных реалистических многомерных потенциалов или в самосогласованных моделях. До сих пор остается открытым вопрос об адекватном описании процесса изменения кластерной структуры внутри делящейся системы в точках сингулярности поверхностей потенциальной энергии. Предложена теоретическая микроскопическая модель кластеризации и перекластеризации нуклонов для предразрывных конфигураций делящейся ядерной системы.

DOI: 10.31857/S0367676522090095

введение

В последние десятилетия влияние кластеризации на структуру тяжелых деформированных ядер в связи с проявлением мультимодальности в процессе их деления многократно изучалось в рамках различных теоретических подходов [1–4]. Теоретическая группа, работающая в Дубне, успешно развивает и применяет для объяснения экспериментальных данных модель, в которой информация о двух различных кластерах внутри сложной ядерной системы закладываются изначально [5, 6]. В рамках такого подхода сильно деформированное ядро описывается как эволюция двойной ядерной системы по релевантным коллективным координатам.

В лаборатории имени Флерова работает международная группа, изучающая кластерные эффекты в делении тяжелых ядер экспериментально. Ими были открыты несколько новых мод деления на два, три и четыре осколка. Также были получены свидетельства возможной перекластеризации внутри делящейся системы [7–10].

Именно для теоретического описания экспериментальных результатов этой группы мы использовали метод оболочечной поправки Струтинского с реалистичным ядерным потенциалом и впервые описали кластеризацию ядерной материи при деформации, причем никакой информации о том, какие кластеры в системе должны возникнуть, в модели оболочечной поправки в принципе не существует [11]. Рассчитанные методом Струтинского равновесные формы деформированного тяжелого ядра могут быть затем отдельно численно проанализированы с кластерной точки зрения [12].

В наших расчетах для последовательного и полного теоретического изучения возможности формирования кластерных структур в процессе деформации и деления тяжелых ядер были проведены расчеты методом оболочечной поправки Струтинского с реалистичным ядерным потенциалом, сохраняющем толщину поверхностного слоя постоянной при экстремально больших удлинениях вплоть до образования и разрыва шейки [13]. Причем ни один параметр потенциала для описания всей мультимодальной структуры и различных кластерных конфигураций в этих расчетах не изменялся. Именно увеличение размерности пространства параметров деформации в наших расчетах потенциальной энергии тяжелых ядер в процессе деления позволило впервые выделить редкие кластерные структуры, образующиеся внутри делящейся тяжелой ядерной системы.

КЛАСТЕРИЗАЦИЯ В ПРОЦЕССЕ ДЕЛЕНИЯ

Представление о делительной моде или возможном для ядра пути к делению в многомерном пространстве параметров деформации связано с выявлением в рельефе поверхности потенциальной энергии долин, разделенных хребтами. Ядро, спускаясь с барьера деления, выбирает один из потенциальных путей, причем на какие два осколка оно разделится, зависит от того, по какой долине шел спуск. Генезис формы ядра, соответствующий каждой из долин, оказывается связанным с формирующимися внутри системы магическими оболочками будущих осколков деления.

Численные расчеты показали, что в реалистическом потенциале с постоянной толщиной поверхностного слоя образуется и некоторое время сохраняется существенная структура так называемых больших оболочек. Наиболее ярко она проявляется в некоторых определенных частях поверхности потенциальной энергии, эти устойчивые кластерные структуры будущих осколков деления Струтинским были названы промежуточными состояниями в делении ядер.

Теоретическое описание процесса деления, осуществленное в пространстве деформаций достаточно высокой размерности, позволило существенно уточнить представление об этом сложном процессе и проанализировать причину возникновения различных мод деления. Но в отличие от трехмерных поверхностей потенциальной энергии, в сложной топологии поверхностей потенциальной энергии высокой размерности появляются точки сингулярностей и разрывы на пути ядерной системы к делению вдоль всех основных долин.

В точках сингулярностей состояние сложной системы изменяется скачком вместе с наблюдаемым резким изменением расчетной формы ядра в локальном минимуме потенциальной энергии. Аналогичные результаты показывают и самосогласованные подходы, где наблюдаются переходы между различными перекрывающимися поверхностями и получаются многочисленные области поверхностей с разрывами [1, 14].

Возникновение областей сингулярности на многомерных поверхностях потенциальной энергии не связано с качеством применяемой процедуры поиска локальных минимумов, а являются отражением изменения внутренней микроскопической структуры делящейся системы с деформацией. Закономерность существования таких областей подтверждается их независимым возникновением в расчетах многих теоретических групп, использующих различные модели среднего поля и реалистического ядерного потенциала, в том числе и в самосогласованных расчетах [1, 14, 15]. Таким образом, поведение сложной системы в этих областях может быть адекватно описано только за рамками моделей среднего поля.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Поведение делящегося ядра в модели жидкой капли описывается в терминах равновесной динамики или среднего поля. Жидкокапельная модель объясняет многие черты деления ядра, но процесс образования кластерных структур требует теоретического описания, выходящего за рамки классических подходов. Возникающая неоднородность распределения нуклонов в фазовом пространстве приводит к появлению оболочечной поправки, отвечающей изменению формы ядра. Она соответствует отклонению реальной плотности уровней от усредненной, рассчитанной для равномерного распределения нуклонов в фазовом пространстве. Существование оболочечных минимумов при деформациях, превышающих равновесную, отвечает за появление спонтанно делящихся изомеров. Таким образом установлена связь оболочечной поправки с флуктуациями в пространственном распределении нуклонов.

Короткодействующий характер ядерных сил приводит, как правило, к сферической форме ядер. Деформации ядер определяется квадрупольной компонентой эффективных межнуклонных сил притяжения и сил спаривания. Для случая бесконечной ядерной материи энергия связи одного нуклона определяется его взаимодействием с ближайшими соседями. В этом случае энергия связи нуклонов пропорциональна их числу А. Нуклоны, расположенные на поверхности ядра, имеют меньшее число связей, чем внутренние, поэтому полная энергия связи уменьшается на величину, пропорциональную поверхности ядра $\sim A^{2/3}$, но для моделирования формирования кластеров внутри делящейся ядерной системы этот член в энергии связи учитывать не нужно, так как у только начинающего образовываться магического ядерного кластера поверхности нет. Плотность ядерной материи постоянна и не может уменьшиться ниже плотности насыщения даже при очень тонкой шейке. Явление насыщения и короткодействие ядерных сил объясняются их обменным характером. Так как ядерное взаимодействие короткодействующее, реалистичный потенциал должен повторять по форме распределение материи в ядре. Нуклоны в ядре ведут себя как делокализованные и независимые.

Установлена связь между эволюцией кластерной структуры внутри системы и ее макроскопическими свойствами, но детальный механизм и условия образования кластеров внутри ядра еще не описан. Его описание требует возвращения к жидкокапельным аспектам ядерной материи и введения в рассмотрение типичного расстояния между нуклонами.

Для двухмерного случая уже существуют подходы к образованию кластеров, например [16—18]. Мы предлагаем аналогичную трехмерную модель.

Пусть вектор $x \in \mathbb{R}^m$ представляет набор характеристик частицы $i \in N$. Соседние частицы в рассматриваемом объеме взаимодействуют между собой. Связи между соседними частицами могут быть представлены графом $G = \{N, E, C\}$ с множеством вершин N, обозначающим частицы $i \in N$; множеством ребер $E = \{(i, j): i, j \in N\}$, состоящим из пар (i, j), обозначающих взаимодействие между частицами i и j, соответствующим связям в графе G; и матрицей связности C, образованной элементами c_{ij} , равными 1 в случае, если частицы i и j связаны, и $c_{ij} = 0$ в противном случае.

Расхождение в характеристиках между частицами в делящейся системе можно определить как значение лапласовского потенциала [19] графа G:

$$\Phi_G = \frac{1}{2} \sum c_{ij} \left(x_j - x_i \right)^2,$$

где N_i — множество соседних частиц частицы *i*. Введем внешнее возмущение z_i , воздействующее на частицу x_i . Динамика системы частиц задается следующей системой N уравнений в дискретном времени (также можно сформулировать динамику в непрерывном времени):

$$x_{i}^{t+1} = x_{i}^{t} + z_{i}^{t} + \gamma \sum c_{ij}^{t} \left(x_{j}^{t} - x_{i}^{t} \right) =$$

= $x_{i}^{t} + z_{i}^{t} + \gamma \left(\sum c_{ij}^{t} x_{j}^{t} \right) - \gamma d^{i} \left(C^{t} \right) x_{i}^{t}, \quad i \in N,$ (1)

где $d_i(C) = \sum_{j=1}^n c_{ij}$ – сумма *i*-й строки матрицы *C*. Обозначим $D(C) = \text{diag}\{d_i(C)\}$ соответствующую диагональную матрицу.

Согласно модели (1) состояние *i*-й частицы x_i^{t+1} в момент времени t+1 равно ее состоянию в предыдущий момент времени x_i^t плюс влияние внешнего возмущения z_i^t плюс влияние взаимодействия с соседними частицами $j \in N_i^t$. Чем больше разница в состояниях между соседними частицами, тем больше влияние взаимодействия между частицами.

Вектор x_i обозначает состояние частицы *i* и характеризует различные параметры частицы, не влияющие друг на друга. Чтобы применить одну и ту же динамику к *m* различным параметрам по отдельности, вводится произведение Кронекера (обозначаемое \otimes) при переходе к матричной форме записи уравнения динамики системы.

Модель (1) может быть записана в матричной форме. Введем R^{mn} — значные векторы X u Z путем конкатенации соответствующих векторов x_i^t и z_i^t . Динамика системы может быть записана в виде

$$X^{t+1} = X^{t} + \gamma \left(C^{t} \otimes I_{k} \right) X^{t} - \gamma \left(D \left(C^{t} \right) \otimes I_{m} \right) X^{t} + Z^{t},$$

где $C^t \otimes I_m$ — произведение Кронекера, которое является блочной матрицей размера $nm \times nm$:

$$C^{t} \otimes I_{m} = \begin{bmatrix} c_{11}^{t}I_{m} & L & c_{1n}^{t}I_{m} \\ M & O & M \\ c_{n1}^{t}I_{m} & L & c_{nn}^{t}I_{m} \end{bmatrix}$$

Предлагаемая модель описывает эволюцию ядерной системы, состоящей из взаимосвязанных взаимодействующих элементов — частиц, в которых связь имеется только между соседними частицами.

Система с заданной динамикой демонстрирует тенденцию к образованию кластеров и рекластеризации в процессе эволюции своего состояния.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая в работе модель делает принципиально возможными динамические микроскопические расчеты наблюдаемого процесса кластеризации в процессе деления тяжелой ядерной системы. Такая многочастичная модель требует еще задания нуклон-нуклонного взаимодействия, подходящего для этого нового класса моделей. Особенностью разрабатываемой модели является управляющая роль флуктуаций ядерной плотности в процессе образования кластера внутри сложной системы.

Часть работ была выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-19-00516).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Zdeb A., Warda M., Robledo L. // Phys. Rev. C. 2021. V. 104. Art. No. 014610.
- Bender M., Bernard R., Bertsch G. et al. // J. Phys. G. 2020. V. 47. No. 11. Art. No. 113002.
- Nasirov A., Von Oertzen W., Tashkhodjaev R. // Pramana. 2015. V. 85. No. 2. P. 367.
- Santhosh K., Jose T. // Pramana. 2021. V. 95. No. 4. P. 1.
- Rogov I., Adamian G., Antonenko N. // Phys. Rev. C. 2021. V. 104. Art. No. 034618.
- 6. *Pasca H., Andreev A., Adamian G., Antonenko N. //* Phys. Rev. C. 2021. V. 104. Art. No. 014604.
- Pyatkov Y., Kamanin D., Alexandrov A. et al. // Phys. Rev. C. 2017. V. 96. Art. No. 064606.
- Pyatkov Y., Kamanin D. // J. Phys. Conf. Ser. 2019. V. 1390. No. 1. Art. No. 012011.

- 9. *Von Oertzen W., Nasirov A. //* EPJ A. 2020. V. 96. No. 6. Art. No. 064606.
- Strekalovsky A., Kamanin D., Alexandrov A. // Proc. Int. Symp. Exotic Nuclei. (Petrozavodsk, 2020). P. 455.
- 11. Jolos R.V., Palchikov Y.V., Pashkevich V.V., Unzhakova A.V. // Il Nuovo Cimento A. 1997. V. 110. No. 9. P. 941.
- 12. Pyatkov Y.V., Pashkevich V.V., Trzaska W.Y. et al. // Phys. Atom. Nucl. 2004. V. 67. No. 9. P. 1726.
- 13. Unzhakova A.V., Pashkevich V.V., Pyatkov Y.V. // Int. J. Mod. Phys. E. 2010. V. 19. No. 4. P. 718.
- Staszczak A., Baran A., Dobaczewski J., Nazarewicz W. // Phys. Rev. C. 2009. V. 80. Art. No. 014309.

- Dubray N., Regnier D. // Comput. Phys. Commun. 2012. V. 183. No. 10. P. 2035.
- 16. Unzhakova A., Granichin O. et al. // Proc. Smart Nano-Materials (Paris, 2018). P. 78.
- Nazmitdinov R. // Phys. Part. Nucl. Lett. 2019. V. 16. No. 3. P. 159.
- Amelin K., Amelina N., Granichin O. et al. // Proc. 2019 IEEE Conf. Control Technol. Appl. CCTA. (Hong Kong, 2019). P. 355.
- Saber R.O., Murray R.M. // Proc. Amer. Control Conf. 2003. P. 951.

Clustering and microscopically separated states formation in fission potential energy calculations

Yu. V. Ivanskiy^a, A. V. Unzhakova^{a, *}

^a Saint-Petersburg State University, St Petersburg, 199034 Russia *e-mail: a.unzhakova@spbu.ru

Recent experiments have significantly expanded our knowledge of cluster effects in the fission of heavy nuclei. In recent years, many new theoretical studies have been devoted to the description of clustering in nuclear systems based on the calculation of potential energy surfaces within the framework of the mean field model using various realistic multidimensional potentials or in self-consistent models. The question of an adequate description of the process of changing the cluster structure inside a fissile system at singularity points of potential energy surfaces remains open. We proposed a theoretical microscopic model of nucleon clustering and re-clustering for pre-scission configurations of a fissile nuclear system.