

## ОЦЕНКА ОРБИТАЛЬНЫХ МОМЕНТОВ ФРАГМЕНТОВ ДВОЙНОГО ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР

*С. Г. Кадменский<sup>1</sup>, Л. В. Титова, Д. Е. Любашевский, А. А. Писклюков*

Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

Показано, что механизм появления больших значений относительных орбитальных моментов фрагментов  $L$  спонтанного деления ядер связан с квантовыми поперечными wriggling-колебаниями делящегося ядра в точке его разрыва. В основе указанного механизма лежит представление, что делящееся ядро остается холодным вплоть до точки его разрыва на фрагменты деления. В рамках рассмотренного механизма впервые получена аналитическая формула для оценки среднего значения орбитального момента и углового распределения фрагментов деления. Полученные результаты вносят важный вклад в понимание процесса деления ядер, а также имеют важное прикладное значение в задачах о тепловыделении в ядерных реакторах, возникающих при прохождении мгновенных гамма-квантов, испускаемых фрагментами деления.

It is shown that the mechanism for the appearance of large values of the relative orbital fragments moments  $L$  of spontaneous nuclear fission is associated with quantum transverse wriggling oscillations of the fissile nucleus at its scission point. This mechanism is based on the idea that the fissile nucleus remains cold up to its scission point into fission fragments. Within the framework of the considered mechanism, an analytical formula was obtained for the first time to estimate the average value of the orbital momentum and the angular distribution of fission fragments. The obtained results make an important contribution to the understanding of the process of nuclear fission and also have important applications in problems of heat release in nuclear reactors arising from the passage of instantaneous gamma rays emitted by fission fragments.

PACS: 24.75.+i; 27.90.+b; 25.85.Ca

### ВВЕДЕНИЕ

Проблема описания орбитальных моментов фрагментов деления (ФД) ядер является актуальной и предполагает использование квантовой теории деления. В основе указанной теории лежат три базовых представления, основанных на холодности делящегося ядра, учете поперечных нулевых колебаний ядра, находящегося в предразрывной конфигурации, и каскадно-испарительной модели. Квантовая теория деления позволяет успешно описать угловые распределения ФД ядер. Результаты настоящего исследования дадут новый взгляд на понимание динамики деления ядер и позволят значительно улучшить точность делительных моделей.

---

<sup>1</sup>E-mail: kadmensky@phys.vsu.ru

В рамках подхода работы [1] было построено угловое распределение ФД  $T_{MK}^J(\Omega)$  в случае спонтанного деления ядер, где  $\Omega$  — телесный угол. Указанное угловое распределение задает направление вылета ФД в лабораторной системе координат (л. с. к.), где  $M$  — проекция спина  $J$  на ось  $Z$  л. с. к., а  $K$  — аналогичная проекция на ось симметрии ядра  $Z'$ . Причем каждому переходному делительному состоянию, введенному О. Бором в работе [1], соответствует свой набор квантовых чисел, включающий спин  $J$  и его проекции  $M$  и  $K$ . В общем случае, используя методы [2–5], можно выразить  $T_{MK}^J(\Omega)$  через нормированное угловое распределение  $T(\Omega')$  ФД во внутренней системе координат (в. с. к.), которое имеет вид

$$T_{MK}^J(\Omega) = \frac{2J+1}{16\pi^2} \int d\omega \left[ |D_{MK}^J(\omega)|^2 + |D_{M-K}^J(\omega)|^2 \right] T(\Omega'), \quad (1)$$

где  $D_{MK}^J(\omega)$  —  $D$ -функция Вигнера, а  $\omega = (\alpha, \beta, \gamma)$  — углы Эйлера, которые дают ориентацию оси симметрии делящегося ядра по отношению к осям л. с. к.

Широко распространенным подходом для описания угловых распределений ФД является гипотеза О. Бора [1], согласно которой ФД испускаются строго вдоль или против направления оси симметрии  $Z'$  делящегося ядра. Тогда угловое распределение в в. с. к.  $T(\Omega')$  [2–5] можно представить в виде размазанной дельта-функции, а угловое распределение ФД  $T_{MK}^J(\Omega)$  в л. с. к. будет зависеть от распределения направлений оси симметрии делящегося ядра, и, согласно формуле (1), задается  $D$ -функциями Вигнера  $D_{M\pm K}^J$  ( $\alpha = \varphi$ ,  $\beta = \theta$ ,  $\gamma = 0$ ).

Рассмотренная выше гипотеза О. Бора носит приближенный характер, поскольку согласно соотношению неопределенностей квантовой механики неопределенность между относительным орбитальным моментом  $\Delta L$  и углом вылета  $\Delta\theta'$  [5]  $\Delta L \Delta\theta' \sim 1$ . Следовательно, при направлениях вылета вдоль или против оси симметрии ядра неопределенность угла вылета  $\Delta\theta' = 0$ , а также возникает полная неопределенность  $\Delta L = \infty$  в значениях относительных орбитальных моментов  $L$ . Поскольку экспериментально такая ситуация наблюдаться не может, то угловое распределение ФД [4, 5], нормированное на единицу, следует представить в виде

$$T(\Omega') = \left( \frac{1}{4} \right) |\psi_L Y_{L0}(\Omega') (1 + \pi\pi_1\pi_2(-1)^L)|^2, \quad (2)$$

где  $\pi$  и  $\pi_1, \pi_2$  — четности родительского ядра, легкого и тяжелого ФД соответственно, а  $\psi_L$  — нормированная на единицу волновая функция, зависящая от орбитального момента ФД.

Целью настоящей работы является получение оценок средних значений орбитального момента, определяющего угловые распределения ФД, в рамках квантовой теории деления [2–5] с учетом основной роли нулевых wriggling-колебаний делящегося ядра в окрестности его точки разрыва [6, 7].

### ОЦЕНКА СРЕДНЕГО ЗНАЧЕНИЯ ОРБИТАЛЬНОГО МОМЕНТА ФРАГМЕНТОВ ДЕЛЕНИЯ ПРИ УЧЕТЕ WRIGGLING-КОЛЕБАНИЙ

В рамках квантовой теории деления [2] построим волновую функцию при учете поперечных колебаний делящегося ядра в окрестности его точки разрыва. В [8] показано, что функции плотности вероятности нулевых поперечных wriggling-колебаний

$P(J_{w_x}), P(J_{w_y})$  в импульсном представлении имеют вид

$$P(J_{w_x}, J_{w_y}) = P(J_{w_x})P(J_{w_y}) = \frac{1}{\pi C_w} \exp \left[ -\frac{(J_{w_x}^2 + J_{w_y}^2)}{C_w} \right], \quad (3)$$

где величина  $C_w = I_w \hbar \omega_w$  задается произведением момента инерции  $I_w$  делящегося ядра на энергию  $\hbar \omega_w$  wriggling-колебаний.

Учитывая двумерный характер wriggling-колебаний, сделаем переход от спинов  $J_{w_x}$  и  $J_{w_y}$  указанных колебаний к орбитальному моменту  $L$  ФД. Для этого перейдем в полярную систему координат, учитывая якобиан перехода, и после интегрирования по углу  $\varphi_L$  получим распределение по орбитальному моменту  $L$ :

$$P(L) = \int_0^\pi \frac{L}{\pi I_w \hbar \omega_w} \exp \left[ -\frac{L^2}{I_w \hbar \omega_w} \right] d\varphi_L = \frac{2L}{I_w \hbar \omega_w} \exp \left[ -\frac{L^2}{I_w \hbar \omega_w} \right]. \quad (4)$$

Затем, используя определение среднего значения, получим явный вид  $\bar{L}$ :

$$\bar{L} = \int_0^\infty \frac{2L^2}{I_w \hbar \omega_w} \exp \left[ -\frac{L^2}{I_w \hbar \omega_w} \right] dL = \frac{\sqrt{I_w \hbar \omega_w \pi}}{2}. \quad (5)$$

На основе формулы (5) рассчитаны средние значения орбитального момента  $\bar{L}$ , которые представлены на рис. 1, и составляют значения порядка 10 в единицах  $\hbar$ .

К сожалению, прямого сравнения теоретического предсказания, получаемого из формулы (4), с экспериментальными данными провести не удалось, так как не удалось найти работы с экспериментальными распределениями орбитальных моментов фрагментов деления. Поэтому верификация предлагаемого в работе подхода проведена путем сопоставления его с теоретическим подходом группы А. Булгака [9, 10], который базируется на нестационарной теории функционала плотности (TDDFT) и проведении обобщения на случай сверхтекучих систем [11], а также учитывает продольные

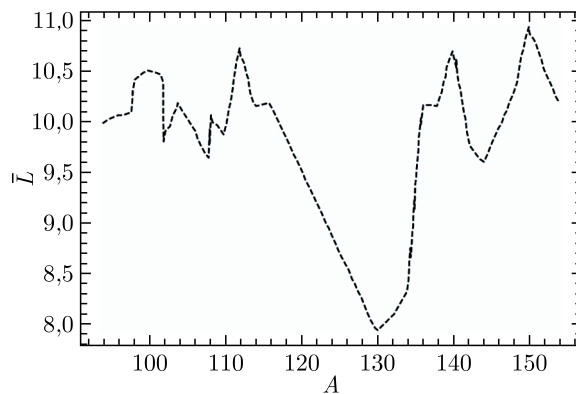


Рис. 1. Зависимость среднего значения орбитального момента ядер от массового числа

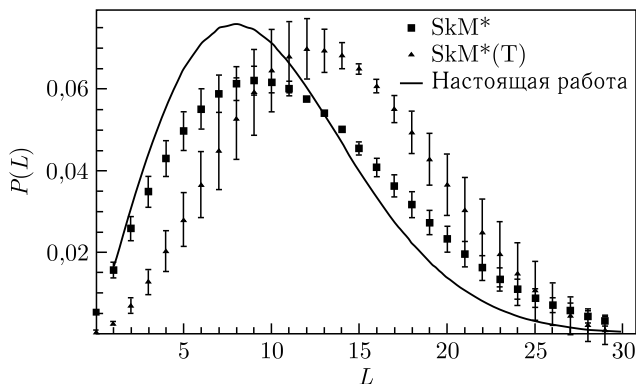


Рис. 2. Сравнение распределения орбитального момента фрагментов двойного деления ядер, рассчитанного по формуле (4) (сплошная линия), с аналогичными значениями, полученными в работе [10], с учетом функционала плотности ядерной материи (NEDF), SkM в случае ядра  $^{252}\text{Cf}$

и поперечные собственные колебания делящегося ядра. Поэтому подход указанной группы является более общим, чем микроскопический, представленный в работе [12], в основе которого лежит феноменологическая модель FREYA, где явно рассматривались только моды bending- и wriggling-колебаний.

Как видно из рис. 2, распределение углового момента, рассчитанное по (5), разумно согласуется с теоретическим расчетом работы [10], выполненным с учетом функционала плотности ядерной материи (NEDF) SkM для ядра  $^{252}\text{Cf}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что ведущую роль в формировании угловых распределений и относительных орбитальных моментов в спонтанном делении ядер играют нулевые wriggling-колебания. В рамках рассмотренного механизма впервые удалось получить аналитическую формулу для оценки среднего значения орбитального момента, определяющего угловое распределение ФД. Средние значения орбитальных моментов, генерируемые данным механизмом, хорошо согласуются с данными других подходов [10]. Получено разумное согласие распределения углового момента  $L$ , рассчитанного по формуле (4), с теоретическим подходом [10]. Для спонтанно делящегося ядра  $^{252}\text{Cf}$  полученное согласие указывает на важность учета квантовых эффектов при анализе деления ядер.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bohr A., Mottelson B. Nuclear Structure. V. 2. New York: Benjamin Press, 1974.
2. Kadmensky S. G. // Phys. Atom. Nucl. 2002. V. 65. P. 1390.
3. Kadmensky S. G., Rodionova L. V. // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2004. V. 68. P. 68.
4. Kadmensky S. G., Rodionova L. V. // Phys. Atom. Nucl. 2003. V. 66. P. 1219.

5. *Kadmensky S.G., Rodionova L.V.* // Phys. Atom. Nucl. 2005. V. 68. P. 1433.
6. *Bunakov V.E., Kadmensky S.G., Lyubashevsky D.E.* // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2015. V. 79. P. 304.
7. *Bunakov V.E., Kadmensky S.G., Lyubashevsky D.E.* // Phys. Atom. Nucl. 2016. V. 79. P. 304.
8. *Nix J.R., Swiatecki W.J.* // Nucl. Phys. A. 1965. V. 71. P. 1.
9. *Bulgac A.* // Phys. Rev. C. 2022. P. 106. 014624.
10. *Bulgac A., Abdurrahman I., Godbey K., Stetcu I.* // Phys. Rev. Lett. 2022. V. 128. 022501.
11. *Bulgac A., Abdurrahman I., Jin S., Godbey K., Schunck N., Stetcu I.* // Phys. Rev. Lett. 2021. V. 126. 142502.
12. *Randrup J., Vogt R.* // Phys. Rev. Lett. 2021. V. 127. 062502.

Получено 29 мая 2024 г.