

УДК 539.143.

ОЦЕНКИ ЭНЕРГИЙ 2_1^+ -, 4_1^+ -, 6_1^+ -СОСТОЯНИЙ В ЯДРАХ ЛАНТАНОИДНОЙ ГРУППЫ

© 2024 г. А. Д. Ефимов^{1, 2, *}, И. В. Коваль¹, И. Н. Изосимов³

¹ Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова.

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

³ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

* E-mail: efimov98@mail.ru

Поступила в редакцию 30.10.2023

После доработки 23.06.2024

Принята к публикации 31.07.2024

Исходя из имеющейся корреляции энергии деформации и нижней энергии возбуждений были получены оценки для энергий 2_1^+ -состояний ядер лантаноидной группы. Рассмотренная систематика отношений энергий в ротационной полосе позволила также получить оценки для 4_1^+ -и 6_1^+ -состояний данной группы ядер.

DOI: 10.31857/S0367676524110234, EDN: FJJNPQ

ВВЕДЕНИЕ

Особенность ядерных моделей в том, что с их помощью, как правило, пытаются воспроизвести известные экспериментальные данные. Отчасти это связано с тем, что в любой микроскопической теории рассматривается ограниченное число различных процессов, что приводит к понятию эффективности сил, которые естественно испытывают изменения при переходе от одного ядра к другому. В силу этого полезным может оказаться поиск систематик различных характеристик ядер и поиск возможных корреляций между ними. Примером таких систематик может служить недавно рассмотренное описание полиномами массовых поверхностей и парных энергий ряда четно-четных и нечетных деформированных ядер с массовыми числами в диапазоне от 150 до 190 [1]. Это дает возможность определения парной энергии из знания массы всего одного соседнего нечетного ядра.

Другим предметом исследования является структура сверхтяжелых ядер. Для того, чтобы осуществить расчеты структуры возбужденных состояний желательно иметь априорные энергии нижайших возбуждений. Это оказывается полезным и для будущих экспериментов. Аналогично это касается ядер лантаноидной группы, а именно для тех ядер, которые сильно удалены от дорожки β -стабильности. Ориентируясь на эти оценки можно было бы расширить область рассматриваемых изотопических цепочек по сравнению с тем, что

было сделано при исследовании четных изотопов Xe [2], Ba [3], Ce [4].

Ранее в работах [5] для тяжелых и сверхтяжелых ядер была обнаружена корреляция между энергией первого возбуждения в четно-четных ядрах и энергией деформации E_{def} , которая определяется как разность между энергией ядра при его равновесной деформированной и сферической формами

$$E_{\text{def}} = E(\beta) - E(0). \quad (1)$$

Оценки для данной энергии были взяты из [6]. Оказалось, что обнаруженная корреляция успешно аппроксимируется с помощью соотношения

$$E(2_1^+) = b_1 + b_2 e^{aE_{\text{def}}}, \quad (2)$$

что можно использовать обратно для получения оценки энергии нижайшего возбуждения до проведения эксперимента. Относительно работы [6]. Не исключено, что она дает по модулю завышенные оценки для энергий деформаций (в частности, это проявилось при расчете тяжелых ядер в работе [7]), но важно то, что полученные в едином подходе энергии деформации соотносятся с экспериментальными энергиями возбуждений. Это дает возможность получать корректные оценки для энергий нижайших 2_1^+ -состояний. Кроме того, в работе [6] представлены оценки энергии деформации практически во всем диапазоне ядер от самых легких до ядер с $Z = 100$.

В этой же области ядер также была рассмотрена систематика отношений энергий во вращательной полосе. Это позволило получить оценки энергии для 4_1^+ - и 6_1^+ -состояний, используя данные об энергиях состояний 2_1^+ [8].

Конкретно была рассмотрена систематика отношений

$$R = R_4 = \left(E(4_1^+) / E(2_1^+) \right) / (10 / 3);$$

$$R_6 = \left(E(6_1^+) / E(2_1^+) \right) / 7. \quad (3)$$

Если для классического ротационного спектра эти отношения равны единице, то для идеального вибратора с равными интервалами энергий они соответственно равны $R_4 = 0.600$ и $R_6 = 0.4286$. В наблюдаемых спектрах, но не для полумагических и близких к ним ядер, числовые значения этих отношений всегда оказываются больше.

Для ядер с известными энергиями данные отношения хорошо воспроизводятся с помощью аппроксимационных соотношений

$$R = a \exp \left[- \left(\left(E(2_1^+) - E_0 \right) / b \right)^2 \right] + c. \quad (4)$$

Еще раз подчеркнем, что мы производим параметризацию величин R_4 и R_6 по большому набору ядер в то время, как обычно производилась параметризация энергий в основной полосе состояний для каждого отдельного ядра.

Успех соответствующих аппроксимаций как относительно энергий $E(2_1^+)$, так и представленных отношений энергий для тяжелых и сверхтяжелых ядер стимулировал продолжить соответствующее рассмотрение относительно ядер лантаноидной группы, а именно, для ядер с Z от 58 до 68.

АППРОКСИМАЦИИ И РЕЗУЛЬТАТЫ

При рассмотрении ядер лантаноидной области аппроксимации были рассмотрены отдельно для числа нейтронов как с $N < 82$, так и с $N > 82$. Это приводит к несколько различным значениям параметров (табл. 1 и 2) в соотношениях (2) и (4) в зависимости от принадлежности нейтронов к той или иной оболочке. Различие параметров обусловлено уже тем, что фермионное конфигурационное пространство оболочки 82–126 больше аналогичного в оболочке 50–82.

В табл. 1 приведены параметры в уравнении (2), позволяющего по энергии деформации [6] оценить энергию первого возбуждения.

На рис. 1 и 2 приведены зависимости $E(2_1^+)$ от E_{def} для разных диапазонов числа нейтронов, не включая полумагические. Для более тяжелых ядер, что соответствует второму рисунку, реализуется большая энергия деформации и более выраженное

Таблица 1. Параметры в соотношении (2); величина a дана в МэВ^{-1} , b_1 и b_2 в МэВ

	a	b_1	b_2
$N < 82$	0.3384	0.12302	0.64714
$N > 82$	0.4236	0.07398	0.88938

плато, когда энергия нижайшего возбуждения меньше 100 кэВ.

Систематика энергий 2_1^+ -состояний, приведенная на рис. 1, 2 показывает, что рассмотренные энергии заметно меньше для ядер с $N > 82$. Кроме того и энергии деформаций для таких ядер доходят до 18 МэВ, чем и обусловлено наличие соответствующего плато на рис. 2.

Аппроксимационные кривые приемлемо воспроизводят экспериментальные энергии, что демонстрирует возможность их использования для

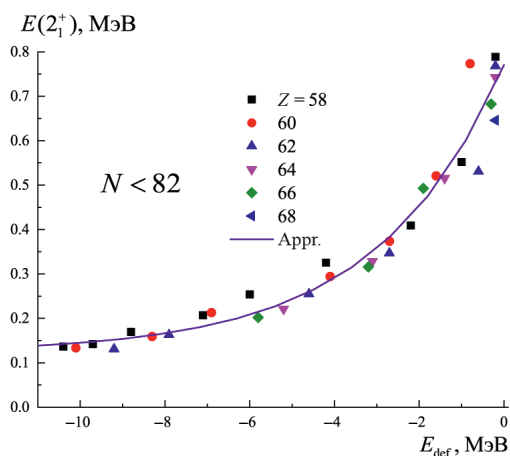


Рис. 1. Экспериментальные энергии $E(2_1^+)$ для $N < 82$ в зависимости от расчетных энергий деформации для четно-четных изотопов с Z от 58 до 68; аппр. соответствует аппроксимационной кривой.

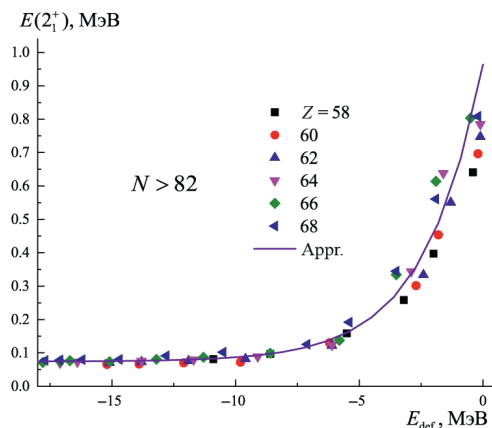


Рис. 2. То же самое, что на рис. 1, но для ядер с $N > 82$.

оценок нижайших энергий в тех ядрах, которые либо еще не синтезированы, либо энергии которых еще не известны.

В табл. 2 приведены параметры уравнения (4) для R_4 и R_6 отдельно с числами нейтронов с $N < 82$ и с $N > 82$. Соответствующие аппроксимационные кривые приведены на рис. 3, 4, 5, 6 вместе с экспериментальными значениями отношений R_4 и R_6 .

Для ядер с $N > 82$ приведены два набора параметров, аррг. 1 и аррг. 2, что отражено на указанных рисунках. Вариант аррг. 1 несколько лучше воспроизводит экспериментальные отношения, особенно для R_4 (рис. 4), но значения параметров аррг. 2 ближе к тем, что определяются для ядер с $N < 82$.

Успех аппроксимационного описания отношений R_4 и R_6 связан с тем, насколько природа этих

Таблица 2. Параметры в соотношении (4); величины E_0 и b даны в кэВ, c и a безразмерны

	E_0	b	c	a
4^+ , $N < 82$	-160	369	0.70016	0.44642
6^+ , $N < 82$	-190	372	0.55525	0.68094
4^+ , $N > 82$ (аррг. 1)	-981	780	0.5485	2.7453
4^+ , $N > 82$ (аррг. 2)	-160	317.5	0.65436	0.575
6^+ , $N > 82$ (аррг. 1)	5	168	0.55183	0.498
6^+ , $N > 82$ (аррг.2)	-190	300	0.52064	0.97901

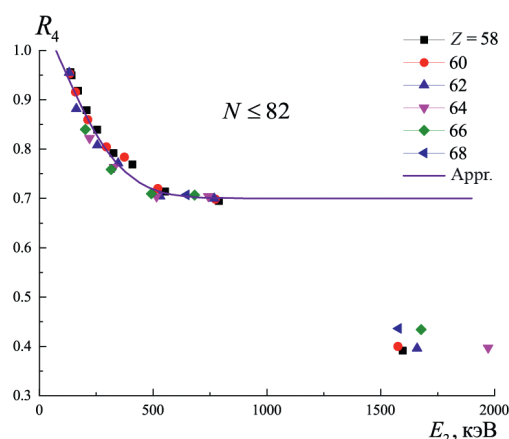


Рис. 3. Экспериментальные и аппроксимационные значения R_4 для ядер с $N \leq 82$.

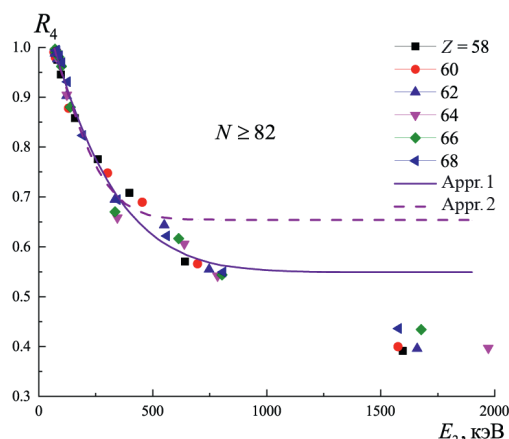


Рис. 4. То же самое, что на рис. 3, но для ядер с $N \geq 82$.

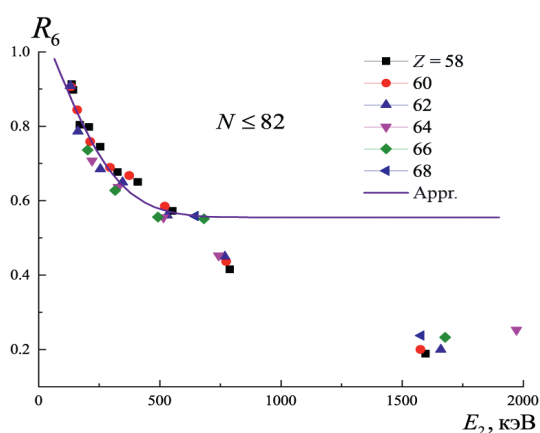


Рис. 5. Экспериментальные и аппроксимационные значения R_6 для ядер с $N \leq 82$.

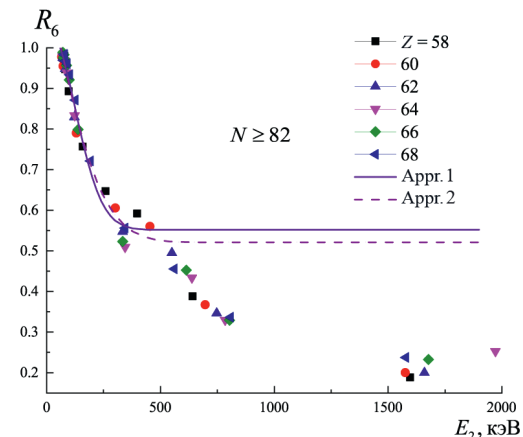


Рис. 6. То же самое, что на рис. 5, но для ядер с $N \geq 82$.

состояний исчерпывается коллективной компонентой. Для ядер с $N < 82$ в соответствии с рис. 3 R_4 вполне удовлетворительно воспроизводится до $E(2_1^+) < 750$ кэВ, т.е. для всех ядер кроме полумагических; для R_6 до 700 кэВ (рис. 5), а далее экспериментальные отношения заметно меньше аппроксимационных. Это значит, что в соответствующих ядрах, а это ядра $^{138}_{58}\text{Ce}$, $^{140}_{60}\text{Nd}$, $^{142}_{62}\text{Sm}$, $^{144}_{64}\text{Gd}$, т.е. в ядрах с числом нейтронов $N = 80$, в волновых функциях 6_1^+ -состояний важную роль играют двухквазичастичные компоненты. В то же время в 4_1^+ -состояниях для ядер с $N = 80$ коллективная компонента должна оставаться определяющей.

На рис. 4 и 6 приведены зависимости R_4 от $E(2_1^+)$ для числа нейтронов с $N \geq 82$ и две аппроксимационные кривые. Первый вариант аппроксимации лучше воспроизводит экспериментальные значения вплоть до 780 кэВ первого возбуждения, но второй соответствует параметрам аппроксимации в соотношении (4) ближе к значениям для области нейтронов с $N < 82$. Для полумагических ядер энергии 2_1^+ -состояний больше 1500 кэВ и экспериментальная величина R_4 заметно меньше аппроксимационного значения. Это свидетельствует о том, что эти ядра относительно 4_1^+ - и 6_1^+ -возбуждений не относятся к вибрационным (двух- и трех-фоонным) возбуждениям, а в значительной степени определяются двухквазичастичной компонентой. В рассмотренной массовой области для полумагических ядер R_4 находится в пределах от 0.39 до 0.44, что соответствует энергии $E(4_1^+)$ от 1.3 до 1.47 в единицах $E(2_1^+)$.

Если нижайшая энергия больше 700 кэВ, то для получения оценки для энергии 4_1^+ -состояния удобно непосредственно воспользоваться первым вариантом аппроксимации.

Относительно R_4 для ядер $^{142}_{58}\text{Ce}$, $^{144}_{60}\text{Nd}$, $^{146}_{62}\text{Sm}$, $^{148}_{64}\text{Gd}$, $^{150}_{66}\text{Dy}$, $^{152}_{68}\text{Er}$, т.е. ядер с числом нейтронов $N = 84$, в волновых функциях 4_1^+ -состояний определенную роль играют двухквазичастичные компоненты. Для 6_1^+ -состояний это справедливо еще в большей степени в соответствии с рис. 6 по тем точкам, которые заметно отклоняются от аппроксимационных кривых.

Цель данных аппроксимаций и систематик может быть двоякой. С одной стороны они могут служить критерием отсутствия заметных вкладов в 4_1^+ -, 6_1^+ -состояниях неколлективных компонент. С другой стороны с целью предсказания энергий данных состояний. Для ядер, соседствующих с полумагическими соответствующие оценки можно сделать непосредственно из графиков.

В качестве иного способа получения оценок энергий 2_1^+ -состояний используется подход, разработанный на основе феноменологического соотношения Гродзинса [9] относительно оценки произведения $E(2_1^+)$ и $B(E2; 0_1^+ \rightarrow 2_1^+)$. Недавно, в работе [10] это соотношение получило подтверждение на

основе микроскопического подхода. Наконец, в работах того же направления [11, 12], используя микроскопическую процедуру Струтинского и коллективную геометрическую модель ядра были получены предсказания энергий возбуждения состояний ядер с $Z > 100$. При этом отправленным пунктом предсказания были значения параметра деформации, а не энергия деформации. Соответствующие оценки для более легких ядер не обсуждались.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ранее была обнаружена корреляция между энергией 2_1^+ -состояний и энергией деформации E_{def} , а также систематика отношений энергий внутри ротационных полос в зависимости от $E(2_1^+)$. Это позволило [8] получить оценки для энергий нескольких первых возбуждений, а именно 2_1^+ -, 4_1^+ -, 6_1^+ -в четных тяжелых и сверхтяжелых ядрах с Z от 96 до 118.

В настоящей работе аналогичные аппроксимации были получены для лантаноидной группы ядер. Сделано это было отдельно для ядер с числом нейтронов $N < 82$ и с $N > 82$. Полученные оценки могут быть полезны для исследований ядер, сильно удаленных от дорожки β -стабильности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Власников А.К., Зиппа А.И., Михайлов В.М. // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. С. 1519; Vlasnikov A.K., Zippa A.I., Mikhajlov V.M. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2020. V. 84. P. 1309.
2. Ефимов А.Д., Михайлов В.М. // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. С. 1395; Efimov A.D., Mikhajlov V.M. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. P. 1266.
3. Ефимов А.Д., Михайлов В.М. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. С. 1244; Efimov A.D., Mikhajlov V.M. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. P. 1136.
4. Ефимов А.Д. // ЯФ. 2020. Т. 83. С. 380; Efimov A.D. // Phys. Atom. Nucl. 2020. V. 83. P. 651.
5. Efimov A.D., Izosimov I.N. // Phys. Part. Nucl. Lett. 2021. V. 18. P. 658.
6. Hilaire S., Girod M. // Eur. Phys. J. A. 2007. V. 33. P. 237.
7. Pomorski K., Nerlo-Pomorska B., Bartel J., Schmitt C. // Phys. Rev. C. 2018. V. 97. 034319.
8. Ефимов А.Д., Изосимов И.Н. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2023. Т. 78. 2310604; Efimov A.D., Izosimov I.N. // Moscow Univ. Phys. Bull. 2023. V. 78. P. 121.
9. Grodzins L. // Phys. Lett. 1962. V. 105. P. 88.
10. Jolos R.V., Kolganova E.A. // Phys. Lett. B. 2021. V. 820. 136581.
11. Shirikova N.Yu., Sushkov A.V., Malov L.A. et al. // Phys. Rev. C. 2022. V. 105. 024309.
12. Shirikova N.Yu., Sushkov A.V., Malov L.A. et al. // PEPAN. 2022. V. 53. P. 1138.

**Estimates of the energies of 2_1^+ -, 4_1^+ - and 6_1^+ -states
in the lanthanide group nuclei****A. D. Efimov^{1, 2, *}, I. V. Koval¹, I. N. Izosimov³**¹ *Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, 198035, Russia,*² *The Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences
(for short, Ioffe Institute, St. Petersburg, 194021, Russia,*³ *Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 141980, Russia,*** e-mail: efimov98@mail.ru*

Based on the existing correlation between the deformation energy and the lowest excitation energy, estimates were obtained for the energies of the 2_1^+ -states of lanthanide group nuclei. The considered systematics of energy relations in the rotational band also made it possible to obtain estimates for the 4_1^+ - and 6_1^+ -states of this group of nuclei.