

## БЕТА-РАСПАД $^{95}\text{Tc}$ НА ВОЗБУЖДЕННЫЕ СОСТОЯНИЯ $^{95}\text{Mo}$

И.Н. Вишнеvский, Г.Б. Крыгин<sup>1</sup>, А.А. Куртева, В.Е. Митрошин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский институт ядерной физики

<sup>2</sup> Харьковский государственный университет

На основе динамической коллективной модели рассчитаны значения энергии, спины, четности, среднеквадратичные зарядовые радиусы, магнитные дипольные и электрические квадрупольные моменты основного и возбужденных состояний  $^{95}\text{Mo}$ , а также вероятности электромагнитных переходов между ними. Описан  $\beta^+$ -распад  $^{95}\text{Tc} \rightarrow ^{95}\text{Mo}$ . Результаты расчетов удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, приведенными в Nuclear Data Sheets и Evaluated Nuclear Structure Data File.

Развитая в 80-е годы динамическая коллективная модель (ДКМ) [1] оказалась весьма плодотворной для объяснения структуры и свойств ядер. Она позволяет единообразно описывать сферические, переходные и деформированные ядра.

Вычисление вероятностей  $\beta$ -переходов на конкретные состояния ядер является сложной задачей. В работе [2] было уделено внимание решению этой проблемы. В рамках ДКМ получены выражения для приведенных матричных элементов гамильтониана слабого взаимодействия для  $\beta$ -распада U-типа ( $\beta^-$ -распад нечетно-нейтронных ядер и  $\beta^+$ -распад нечетно-протонных ядер) и V-типа ( $\beta^-$ -распад нечетно-протонных ядер и  $\beta^+$ -распад нечетно-нейтронных ядер). Учтено 12 классов диаграмм, отражающих влияние на вероятности  $\beta$ -переходов вакуумных флуктуаций и различных эффектов некоммутативности одноквазичастичных и коллективных мод. В работах других авторов учитывается только прямой  $\beta$ -распад [3 - 7].

Полученные выражения использованы при расчете  $\beta$ -распада  $^{111,113,115}\text{Sb}$  [2],  $^{99}\text{Rh}$  [8] (U-типа),  $^{97}\text{Ru}$  [9],  $^{95}\text{Ru}$  [10],  $^{99}\text{Tc}$  [11] (V-типа). Проведенные расчеты позволили получить интересную информацию о структуре ядер.

В настоящей работе продолжен этот цикл исследований. В первом разделе обсуждаются свойства возбужденных состояний  $^{95}\text{Mo}$ , а во втором - анализируются вероятности  $\beta$ -переходов для  $\beta$ -распада  $^{95}\text{Tc} \rightarrow ^{95}\text{Mo}$ . Проводится сравнение рассчитанных и экспериментальных значений.

### Возбужденные состояния $^{95}\text{Mo}$

В рамках ДКМ рассчитаны энергии, спины, четности, среднеквадратичные зарядовые радиусы, магнитные дипольные и электрические квадрупольные моменты основного и возбужденных состояний  $^{95}\text{Mo}$ , а также вероятности электромагнитных переходов между ними.

На рис. 1 представлена часть схемы уровней  $^{95}\text{Mo}$ . Сравнение проведено с экспериментальными данными из работы [12], Nuclear Data Sheets [13] и Evaluated Nuclear Structure Data File (ENSDF). Необходимо отметить, что в [12] основание полосы отрицательной четности имеет энергию 1332 кэВ, что противоречит всем предшествующим экспериментальным данным и лежит ниже, чем соответствующий уровень  $^{97}\text{Mo}$ , поэтому для полосы состояний отрицательной четности нами использованы экспериментальные данные из [13].

В результате проведенных расчетов установлено наличие у  $^{95}\text{Mo}$  трех вибрационных полос, образованных главным образом взаимодействием нечетного нейтрона в состояниях  $d_{5/2}$ ,  $g_{7/2}$  и  $h_{11/2}$  с ираст-полосой четно-четного остова, причем полоса состояний отрицательной четности является дублетной. В экспериментальных исследованиях дублетность этой полосы пока не подтверждена, но в схеме уровней  $^{97}\text{Mo}$  выше уровня  $15/2^-$  расположен уровень со спином  $13/2^-$ ,  $15/2^-$ , что может служить косвенным подтверждением дублетности полосы в  $^{95}\text{Mo}$ . В ДКМ использовано представление, в котором компонентные составы волновых функций, принадлежащих одной полосе, оказываются примерно одинаковыми. Этому критерию удовлетворяют все члены указанных полос.

Расстояния между уровнями полос сопоставимы с соответствующими расстояниями между уровнями ираст-полосы четно-четного остова. Рассчитанные значения энергии и вероятности внутривибрационных E2-переходов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Рассчитанные энергии и вероятности возбуждения уровней вибрационных полос  $^{95}\text{Mo}$

$E_i$ , кэВ	$I_i$	$E_f$ , кэВ	$I_f$	$B(E2)$ , $e^2\text{б}^2$
0	$5/2^+$	832	$9/2^+$	0.0986
832	$9/2^+$	1696	$13/2^+$	0.1522
1696	$13/2^+$	2595	$17/2^+$	0.2009
879	$7/2^+$	1489	$11/2^+$	0.1137
1489	$11/2^+$	2176	$15/2^+$	0.1680
2176	$15/2^+$	2938	$19/2^+$	0.2137
1929	$11/2^-$	2805	$15/2^-$	0.0773
2805	$15/2^-$	3679	$19/2^-$	0.1352
3679	$19/2^-$	4593	$23/2^-$	0.1870
1929	$11/2^-$	2857	$13/2^-$	0.0369
2857	$13/2^-$	3567	$17/2^-$	0.1083
3567	$17/2^-$	4389	$21/2^-$	0.1676

В табл. 2 представлено сравнение имеющихся экспериментальных и рассчитанных нами вероятностей M1- и E2-переходов. В таблице указаны экспериментальные значения энергии, вероятности разрядки приведены в одночастичных единицах.

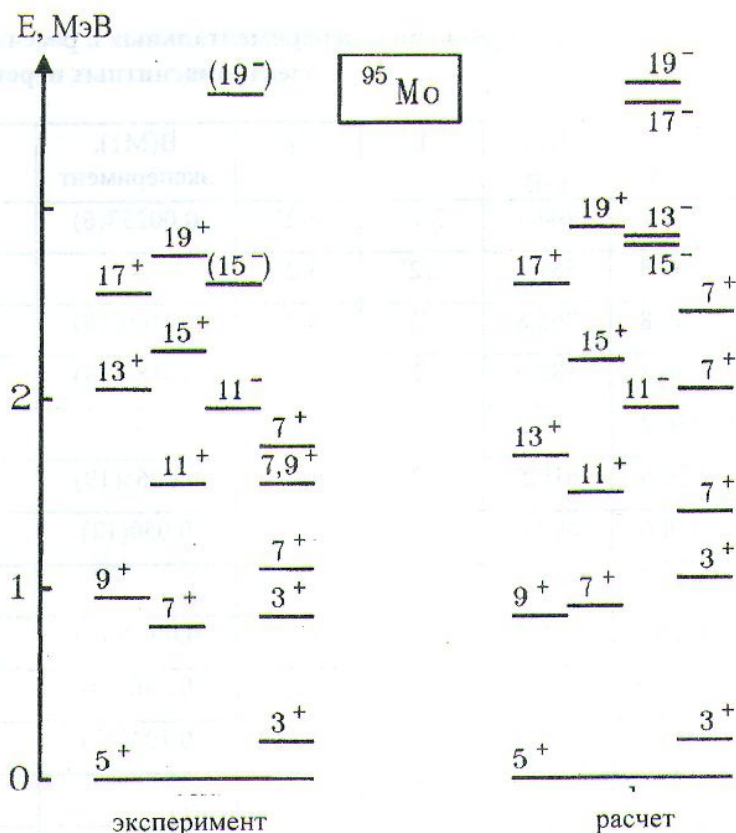


Рис. 1. Часть схемы уровней для  $^{95}\text{Mo}$  (значения спинов удвоены для удобства изображения).

Таблица 2. Сравнение экспериментальных и рассчитанных вероятностей электромагнитных переходов

$E_{ур.}$ , кэВ	$E_{γ}$ , кэВ	$I_i$	$I_f$	$B(M1)$ , эксперимент	$B(M1)$ , расчет	$B(E2)$ , эксперимент	$B(E2)$ , расчет
204.1	204.1	$3/2^+$	$5/2^+$	0.00233(6)	0.0037	21.5(11)	12.87
765.8	561.6	$7/2^+$	$3/2^+$	-	-	0.0120(20)	6.58
765.8	765.8	$7/2^+$	$5/2^+$	0.0109(18)	0.0055	0.96(24)	3.75
786.2	582.0	$1/2^+$	$3/2^+$	0.0187(13)	0.415	3.9(15)	6.36
786.2	786.2	$1/2^+$	$5/2^+$	-	-	23.3(5)	28.23
820.6	616.5	$3/2^+$	$3/2^+$	0.0065(19)	0.019	68(16)	6.48
820.6	820.6	$3/2^+$	$5/2^+$	0.050(12)	0.0085	0.35(9)	0.17
947.7	947.7	$9/2^+$	$5/2^+$	-	-	12.3(6)	22.97
1039.3	218.7	$1/2^+$	$3/2^+$	0.0062(15)	0.008	69(17)	3.73
1039.3	253.0	$1/2^+$	$1/2^+$	0.086(19)	0.0084	-	-
1039.3	835.1	$1/2^+$	$3/2^+$	0.104(23)	0.0335	0.22(22)	0.85
1039.3	1039.3	$1/2^+$	$5/2^+$	-	-	5.4(12)	1.05
1056.8	1056.8	$5/2^+$	$5/2^+$	0.014	0.027	6(5)	7.69
1073.7	125.8	$7/2^+$	$9/2^+$	0.25(11)	0.0155		0.19
1073.7	869.6	$7/2^+$	$3/2^+$	-	-	8(3)	1.36
1073.7	1073.7	$7/2^+$	$5/2^+$	0.024(8)	0.0256	10.7(8)	10.51

В таблице приведены экспериментальные значения  $B(E2)$  из работы [13]. В работе [14] для перехода  $E_{\gamma} = 786$  кэВ приведено экспериментальное значение  $B(E2) = 23.3(5)$ , а в работе [15] для перехода  $E_{\gamma} = 1056$  кэВ приведено значение  $B(E2) = 6(5)$ , которые лучше согласуются с экспериментальными данными.

В табл. 3 приведено сравнение экспериментальных и рассчитанных магнитных моментов для основного и первого возбужденного состояний, для которых имеются экспериментальные данные, а также рассчитанные значения квадрупольных моментов и среднеквадратичных зарядовых радиусов. Завышенное значение рассчитанного магнитного момента для основного состояния обусловлено тем, что в наших расчетах не учитываются паулевские поправки, которые для компонент волновых функций с  $l+1/2$  ориентацией спина всегда значительны.

Таблица 3. Магнитные и квадрупольные моменты, среднеквадратичные зарядовые радиусы для  $^{95}\text{Mo}$ 

$E$ , кэВ	$I^{\pi}$	$\mu_{\text{эксп.}}$ , я.м.	$\mu_{\text{рас.}}$ , я.м.	$Q_{\text{рас.}}$ , б	$\langle r^2 \rangle_{\text{рас.}}$ , фм <sup>2</sup>
0	$5/2^+$	-0.91	-1.28	-0.26	17.6
204	$3/2^+$	-0.40	-0.52	-0.03	17.6

В табл. 4 приведены рассчитанные энергии, спины, четности, магнитные и квадрупольные моменты некоторых состояний  $^{95}\text{Mo}$ , для которых нет экспериментальных данных.

Таблица 4. Рассчитанные магнитные и квадрупольные моменты для некоторых состояний  $^{95}\text{Mo}$

Е, кэВ	$I^\pi$	$\mu$ , я.м.	$Q$ , б
276	$1/2_1^+$	0.15	0.0
832	$9/2_1^+$	-0.73	-0.25
879	$7/2_1^+$	0.46	-0.40
1049	$3/2_2^+$	0.37	-0.10
1402	$7/2_2^+$	-0.44	-0.28
1489	$11/2_1^+$	0.82	-0.34
1696	$13/2_1^+$	-0.63	-0.27
1929	$11/2_1^-$	-1.32	-0.66
2054	$7/2_3^+$	0.38	-0.19
2176	$15/2_1^+$	1.02	-0.32
2450	$7/2_4^+$	0.43	0.09
2595	$17/2_1^+$	-0.59	-0.29
2805	$15/2_1^-$	-0.70	-0.53
2857	$13/2_1^-$	-0.71	-0.59
2938	$19/2_1^+$	1.16	-0.32
3567	$17/2_1^-$	-0.20	-0.54
3679	$19/2_1^-$	-0.30	-0.48
4389	$21/2_1^-$	0.13	-0.50
4593	$23/2_1^-$	-0.1	-0.46

### Бета-распад $^{95}\text{Tc} \rightarrow ^{95}\text{Mo}$

При расчете  $\beta^+$ -распада нечетно-протонного ядра  $^{95}\text{Tc}$  (U-типа) на возбужденные состояния  $^{95}\text{Mo}$  использованы выражения, полученные в [2]. Рассмотрены фермиевские и гамов-теллеровские переходы с почти одноквaziчастичного основного состояния  $^{95}\text{Tc}$ , волновая функция которого содержит значительную примесь одночастичного состояния  $g_{9/2}$ . Проведено сравнение с экспериментальными данными из [16], [13] и ENSDF. Результаты представлены в табл. 5.

Таблица 5. Значения  $\log(ft)$  для  $\beta$ -распада  $^{95}\text{Tc} \rightarrow ^{95}\text{Mo}$

$I^\pi$	$7/2_1^+$	$9/2_1^+$	$7/2_2^+$	$11/2_1^+$	$7/2_3^+$	$7/2_4^+$
Е <sub>экс.</sub> , кэВ	765.8	947.7	1073.7	1540.8	1551.7	1645.1
$\log(ft)$ , эксперимент	4.95	6.52	5.94	6.7	5.48	6.8
$\log(ft)$ , расчет	4.93	7.95	5.77	8.1	5.35	6.5

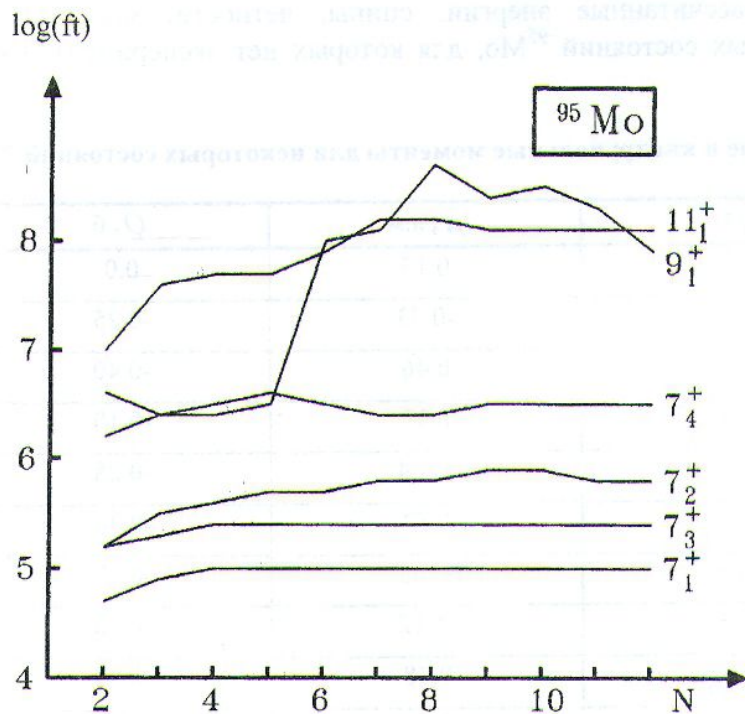


Рис. 2. Зависимости  $\log(ft)$  от количества учитываемых диаграмм (значения спинов удвоены).

На рис. 2 представлены зависимости  $\log(ft)$  от количества учитываемых диаграмм согласно рис. 3 работы [2] для бета-распада  $^{95}\text{Tc} \rightarrow ^{95}\text{Mo}$ . В целом поведение этих зависимостей типично для  $\beta^+$ -распада нечетно-протонного ядра. Для разрешенных переходов на состояния со спином  $7/2^+$ , волновые функции которых содержат значительные примеси одночастичного состояния  $g_{7/2}$ , происходит в основном прямой  $\beta$ -распад, а остальные диаграммы не дают значительного вклада в конечные значения  $\log(ft)$ . Переход с почти одночастичного основного состояния  $^{95}\text{Tc}$  на состояние со спином  $9/2^+$

$^{95}\text{Mo}$ , волновая функция которого имеет значительную примесь  $[2d_{5/2} \otimes 2_1^+]$ , является запрещенным переходом. Первый класс диаграмм снимает запрет до значения  $\log(ft) = 6.6$ , а линейные и квадратичные по амплитудам фононов диаграммы дают существенный вклад в конечное значение  $\log(ft)$ . Необходимо отметить, что для переходов на состояния со спинами  $9/2^+$  и  $11/2^+$  рассчитанные вероятности значительно отличаются от экспериментальных. С подобной ситуацией мы сталкивались при изучении  $\beta$ -распада  $^{111,113,115}\text{Sb}$ , когда для перехода на состояние  $5/2_3^+$   $^{111}\text{Sn}$  рассчитанное значение  $\log(ft)$  тоже было значительно больше экспериментального, а для двух соседних ядер согласие было вполне удовлетворительным (см. рис. 5 и табл. 6 в [2]). Поэтому мы предполагаем, что для рассматриваемого случая экспериментальные значения  $\log(ft)$  для переходов на состояния со спинами  $9/2^+$  и  $11/2^+$  измерены с большой погрешностью.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крыгин Г.Б., Митрошин В.Е. // ЭЧАЯ. - 1985. - Т. 16. - С. 927 - 965.
2. Вишневецкий И.Н., Крыгин Г.Б., Куртева А.А. и др. Вероятности бета-переходов и структура ядер // ЯФ. - 1994. - Т. 57, № 1. - С. 17 - 33.
3. Toivanen J., Suhonen J. // Phys. Rev. C. - 1998. - Vol. 57, No. 3. - P. 1237 - 1245.
4. Homma H., Bender E., Hirsch M. et al. // Phys. Rev. C. - 1996. - Vol. 54, No. 6. - P. 2972 - 2985.
5. Weissman L., Andreyev A., Bruyneel B. et al. // Phys. Rev. C. - 1999. - Vol. 59, No. 4. - P. 2004 - 2008.
6. Lhersonneau G., Suhonen J., Dendooven P. et al. // Phys. Rev. C. - 1998. - Vol. 57, No. 6. - P. 2974 - 2990.
7. Suhonen J., Civitarese O. // Nucl. Phys. A. - 1995. - Vol. 584. - P. 449 - 466.
8. Бета-распад  $^{99}\text{Rh} \rightarrow ^{99}\text{Ru}$  / И.Н. Вишневецкий, Г.Б. Крыгин, А.А. Куртева, В.Е. Митрошин // Тез. докл. Междунар. 48-го совещ. по ядерной спектроскопии и структуре ядра. - М.: Наука, 1998. - С. 87.
9. Бета-распад  $^{97}\text{Ru} \rightarrow ^{97}\text{Tc}$  / И.Н. Вишневецкий, Г.Б. Крыгин, А.А. Куртева, В.Е. Митрошин // Изв. РАН. Сер. физ. - 1998. - Т. 62, № 5. - С. 893 - 895.

10. Бета-распад  $^{95}\text{Ru} \rightarrow ^{95}\text{Tc}$  / И.Н. Вишнеvский, Г.Б. Крыгин, А.А. Куртева, В.Е. Митрошин // Сб. докл. конф. НЦ "ИЯИ" НАНУ, Киев, 26 - 30 янв. 1998 г. - Киев, 1998. - С. 48 - 50.
11. Бета-распад  $^{99}\text{Tc} \rightarrow ^{99}\text{Ru}$  / И.Н. Вишнеvский, Г.Б. Крыгин, А.А. Куртева, В.Е. Митрошин // Тез. докл. Междунар. 48-го совещ. по ядерной спектроскопии и структуре ядра. - М.: Наука, 1998. - С. 86.
12. *Kharraja B., Ghugre S.S., Garg U. et al.* // Phys. Rev. C. - 1998. - Vol. 57, No. 6. - P. 2903 - 2911.
13. *Tuli J.K.* // Nuclear Data Sheets. - 1993. - Vol. 68, No. 3. - P. 689.
14. Берлович Э.Е., Василенко С.С., Новиков Ю.Н. Времена жизни возбужденных состояний атомных ядер. - Л.: Наука, 1972. - 231 с.
15. *Tuli J.K.* // Nuclear Data Sheets. - 1983. - Vol. 38, No. 1. - P. 52.
16. *Meyer R.A., Marsh K.V., Brenner D.S. et al.* // Phys. Rev. C. - 1977. - Vol. 16, No. 1. - P. 417 - 426.

### БЕТА-РОЗПАД $^{95}\text{Tc}$ НА ЗБУДЖЕНІ СТАНІ $^{95}\text{Mo}$

**І.М. Вишнеvський, Г.Б. Кригін, Г.П. Куртева, В.Е. Мітрошин**

На основі динамічної колективної моделі розраховано значення енергії, спіни, парності, середньоквадратичні зарядові радіуси, магнітні дипольні й електричні квадрупольні моменти основного та збуджених станів  $^{95}\text{Mo}$ , а також імовірності електромагнітних переходів між ними. Описано  $\beta^+$ -розпад  $^{95}\text{Tc} \rightarrow ^{95}\text{Mo}$ . Результати розрахунків задовільно узгоджуються з експериментальними даними, наведеними в Nuclear Data Sheets і Evaluated Nuclear Structure Data File.

### BETA-DECAY OF $^{95}\text{Tc}$ TO EXCITATION STATES OF $^{95}\text{Mo}$

**I.N. Vishnevsky, G.B. Krygin, A.A. Kurteva, V.E. Mitroshin**

The energies, spins, parities, magnetic dipole and electric quadrupole moments of the ground and excited states of  $^{95}\text{Mo}$  as well as the probabilities of electromagnetic transitions between them have been calculated in the framework of the dynamic collective model. The  $\beta^+$ -decay  $^{95}\text{Tc} \rightarrow ^{95}\text{Mo}$  have been described. The calculation values are in a good agreement with the experimental data from Nuclear Data Sheets and Evaluated Nuclear Structure Data File.