

И. Н. Вишнеvский¹, В. А. Желтоножский¹, В. А. Плюйко², А. Н. Саврасов¹,
А. Н. Горбаченко², О. И. Давидовская¹, Е. П. Ровенских²

¹ Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

² Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев

ИЗОМЕРНЫЕ ОТНОШЕНИЯ И СРЕДНИЕ УГЛОВЫЕ МОМЕНТЫ ФРАГМЕНТОВ ФОТОДЕЛЕНИЯ ²³⁵U, ²³⁷Np И ²³⁹Pu

Измерены изомерные отношения выходов фрагментов фотоделения ядер ²³⁵U, ²³⁷Np и ²³⁹Pu тормозными γ -квантами с граничной энергией 18 МэВ. Получены новые данные для выходов изомерных пар ядер ⁸⁴Br, ⁹⁰Rb, ¹³¹Te, ¹³²Sb, ¹³²I, ¹³³Te, ¹³⁴I, ¹³⁵Xe. Изомерные отношения определены с вычетом вклада заселенностей состояний исследуемых фрагментов от β -распада соответствующих изобарных ядер. Определены средние угловые моменты фрагментов деления в рамках обобщенной статистической модели Хьюзенга - Ванденбоша с использованием кода EMPIRE 3.2.

Ключевые слова: фотоделение, метод изомерных отношений, средние угловые моменты продуктов деления.

Введение

Измерение отношения выходов (R) (эффективных сечений образования) первичных ядер-осколков в высоко-спиновом состоянии (как правило, изомерном) и низко-спиновом состоянии (как правило, основном) является одним из основных методов получения информации о средних угловых моментах фрагментов деления, что позволяет уточнить динамику деления ядра [1 - 6].

Данные об изомерных отношениях продуктов деления также необходимы для решения ряда прикладных задач ядерной и радиационной физики. В частности, ядра-фрагменты вдали от линии β -стабильности часто имеют изомерные пары с периодами полураспада $T_{1/2}$, отличающимися на порядок и более. При этом данные о характеристиках состояний с $T_{1/2} > 10$ с можно изучать измеряя γ -спектры, а для состояний с $T_{1/2} \sim$ мс это сделать очень сложно. Однако с помощью данных по изомерным отношениям и γ -спектрам долгоживущего изомера можно оценить вклад в полную интенсивность γ -переходов от примеси короткоживущих изомеров, что является важным при анализе массовых распределений осколков деления.

Исследования, представленные в данной работе, являются продолжением изучения с помощью изомерных отношений средних угловых моментов осколков фотоделения, вызванного γ -квантами тормозного излучения с различными граничными энергиями ([7 - 9], и ссылки в [9]). Здесь представлены результаты исследования фотоделения нечетных трансурановых ядер ²³⁵U, ²³⁷Np и ²³⁹Pu при граничной энергии γ -облучения $E_e = 18$ МэВ. Такой выбор энергии обусловлен

тем, что в этом случае при фотоделении ожидается максимальный выход реакции (γ, nf) и такая энергия E_e ниже порога реакции ($\gamma, 2nf$) на этих ядрах.

На рис. 1 показаны схемы распада осколков деления ⁸⁴Br, ⁹⁰Rb, ¹³¹Te, ¹³²Sb, ¹³²I, ¹³³Te, ¹³⁴I, ¹³⁵Xe, для которых измерялись изомерные отношения. Видно, что во всех этих ядрах основной и изомерный уровни также заселяются за счет β -распада соответствующего материнского ядра их изобарной цепи. Очень часто значение заселенности за счет такой вторичной подпитки может на порядки превышать прямую заселенность основного и изомерного состояний ядра-фрагмента, образующегося после фотоделения и вылета мгновенных нейтронов. В данной работе изомерные отношения определены с вычетом вклада от β -распада родственных изобарных ядер в выходы исследуемых фрагментов.

Методика и экспериментальные результаты

В исследованиях изомерных отношений, выполненных ранее, часто использовалась радиохимическая методика [10 - 12]. Как отмечалось выше, при делении происходит образование осколков деления, имеющих изомерные состояния изобарных ядер, которые позже заселяют изучаемые изомеры (см. рис. 1). В этом случае при использовании радиохимического метода корректный учет вторичной подпитки состояний исследуемых изомерных пар в первичных фрагментах деления невозможен, так как в зависимости от времени проведения радиохимического выделения данного изотопа (которое очень сложно контролировать) будет изменяться и доля

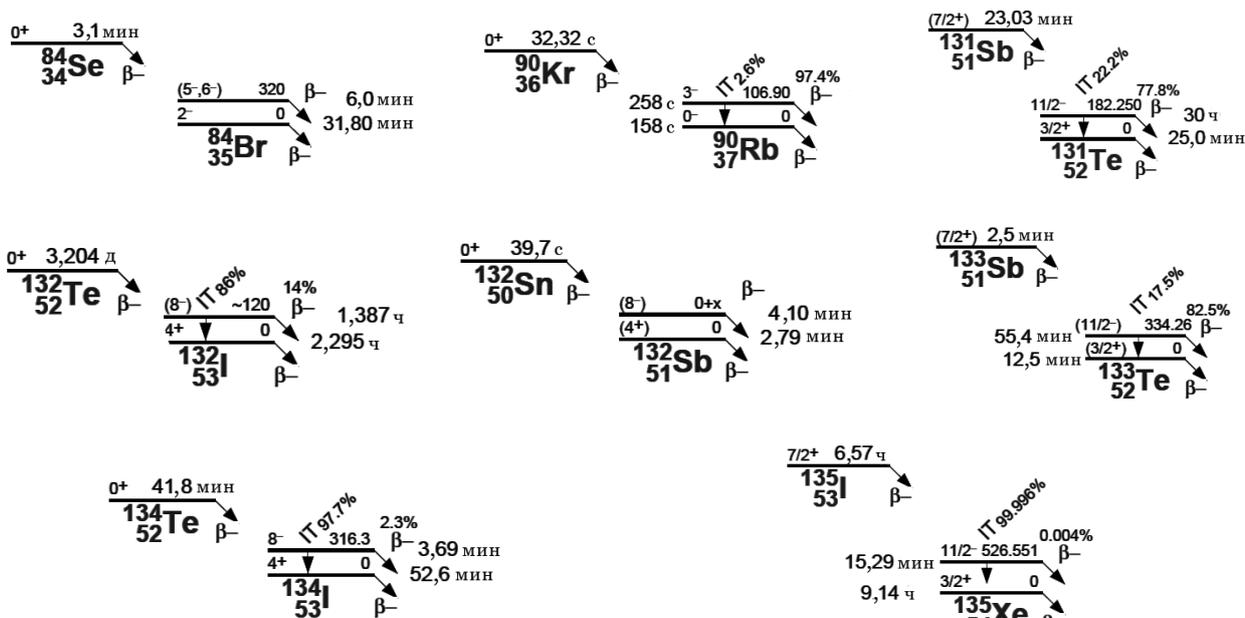


Рис. 1. Схемы распадов исследуемых ядер-фрагментов деления

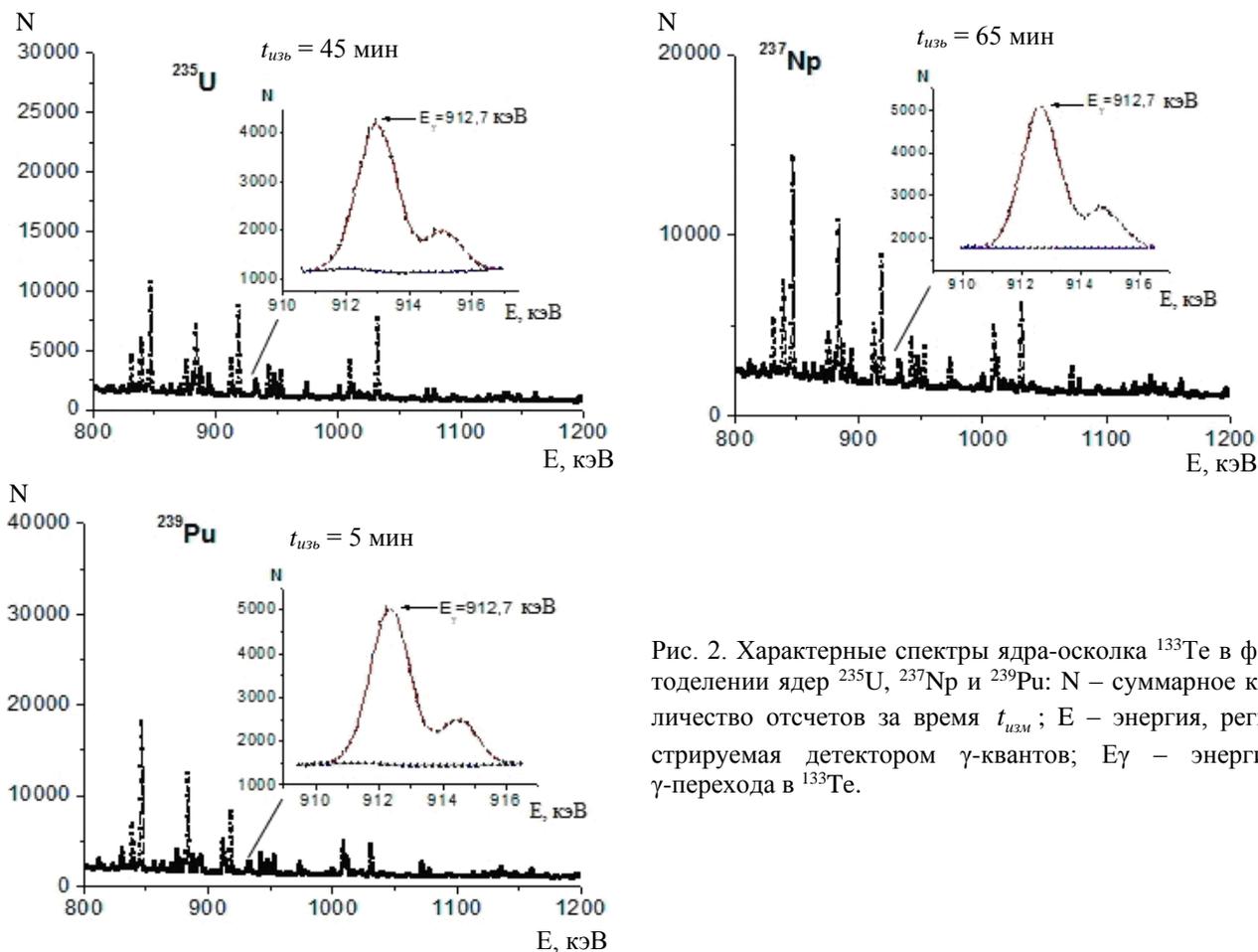


Рис. 2. Характерные спектры ядра-осколка ^{133}Te в фотоделении ядер ^{235}U , ^{237}Np и ^{239}Pu : N – суммарное количество отсчетов за время $t_{изм}$; E – энергия, регистрируемая детектором γ -квантов; E_γ – энергия γ -перехода в ^{133}Te .

заселенности их состояний от β -распада родственных изобарных ядер. Кроме того, в радиохимической методике не учитывается вторичная подпитка состояний данного ядра от его изобара во время облучения. При соизмеримых временах облучения и периодов полураспада исследуемых

ядер эта величина может значительно превышать вероятность прямого заселения состояний изомеров в первичных фрагментах деления. Поэтому в данной работе измерения γ -спектров проводились сразу после облучения, а радиохимический метод не использовался. Вклад в заселен-

ность состояний изомерной пары от распада родственного изобарного ядра исключался с помощью системы кинетических уравнений баланса заселенностей [13] с учетом известных значений периодов полураспада изобар (см. рис.1).

Для облучения использовались обогащенные изотопами мишени из U (^{235}U – 90 %, ^{238}U – 10 %), Np (^{237}Np – 100 %) и Pu (^{239}Pu – 95,5 %, ^{240}Pu – 4,5 %) массой 514, 853 и 400 мг соответственно. Мишени были упакованы в контейнеры из нержавеющей стали. Мишени облучались γ -квантами тормозного спектра электронов микротрона М-30 с максимальной энергией 18 МэВ (ИЭФ НАН Украины, Ужгород). В качестве тормозной мишени использовалась тонкая танталовая мишень, поэтому спектр тормозного излучения имел вид спектра Шиффа. Облучение проводилось в течение времени $t_{\text{обл}} = 5 - 10$ мин, а после времени охлаждения и транспортировки мишени $t_{\text{охл}} = 15 - 20$ с за облучением начинались измерения. В измерениях использовались спектрометры на базе Ge-детекторов с разрешением 2,0 кэВ для γ -линии 1330 кэВ ^{60}Co . Через каждые

60 с спектры записывались в течение всего времени измерения $t_{\text{изм}}$, которое составляло 1 - 2 ч. Для обработки спектров использовался пакет программ Winspectrum [14]. Анализ спектров проводился для различных продолжительностей пауз и времен измерений с учетом периодов полураспада изомеров и изобарного нуклида каждого осколка деления. Характерные спектры продуктов фотоделения ^{235}U , ^{237}Np и ^{239}Pu приведены на рис. 2.

Далее, используя полученные данные об интенсивностях γ -переходов и решая систему кинетических уравнений баланса заселенностей, находились экспериментальные значения изомерных отношений с вычетом вклада заселенностей от β -распада родственных изобарных ядер. Результаты приведены в табл. 1, где для сравнения представлены и значения изомерных отношений при фотоделении тормозными γ -квантами с граничной энергией 9,8 МэВ (при такой энергии деление происходит только через один канал - (γ, f)) [15].

Таблица 1. Измеренные изомерные отношения выходов ядер ^{84}Br , ^{90}Rb , ^{131}Te , ^{132}Sb , ^{132}I , ^{133}Te , ^{134}I , ^{135}Xe

Ядро	^{235}U		^{237}Np		^{239}Pu	
	18 МэВ	9,8 МэВ	18 МэВ	9,8 МэВ	18 МэВ	9,8 МэВ
^{84}Br	0,14(1)	-	0,15(1)	-	0,118(6)	-
^{90}Rb	-	-	1,2(2)	-	1,0(2)	-
^{131}Te	2,6(5)	-	1,9(3)	-	3,2(6)	0,44(5)
^{132}Sb	1,46(22)	0,58(6)	1,01(12)	-	1,48(16)	4,5(15)
^{132}I	2,2(4)	-	0,95(15)	-	0,51(6)	-
^{133}Te	4,3(3)	2,3(3)	9,0(9)	1,8(2)	5,3(3)	2,6(3)
^{134}I	0,58(9)	0,49(5)	-	2,7(2)	1,26(25)	0,96(10)
^{135}Xe	0,056(7)	0,142(14)	0,041(6)	0,18(2)	0,066(7)	0,42(4)

Примечание. В скобках указаны статистические погрешности измерений. Цифры в скобках относятся к последним значащим цифрам средних значений.

Средние угловые моменты и обсуждение результатов

Экспериментальные данные об изомерных отношениях были использованы для определения распределений $P(J)$ вероятности заселения уровней с угловым моментом J и средних угловых моментов \bar{J} первичных осколков фотоделения (в единицах \hbar):

$$\bar{J} = \sum_J J P(J) / \sum_j P(j). \quad (1)$$

Были использованы следующие выражения для распределения состояний первичных ядер-фрагментов по угловым моментам (см. [9] и ссылки):

$$P(J) = (2J + 1) \exp(-J(J + 1) / 2B^2 - \lambda J), \quad (2)$$

$$P(J) = (2J + 1) \exp(-J(J + 1) / 2(B + \mu)^2), \quad (3)$$

где B - параметр «обрезания» по спине, который вычислялся по модели ферми-газа (см. ниже). Параметры λ, μ находились подгонкой экспериментальных значений изомерных отношений выходов ядер к теоретическим.

Теоретические значения изомерных отношений выходов вычислялись с помощью предложенного нами ранее варианта статистической модели [9], который является обобщением статистической модели Хьюзена - Ванденбоша [16 - 18] без использования концепции решающего γ -перехода.

Такая обобщенная модель Хьюзенга - Ванденбоша основана на следующих положениях: 1) основные и изомерные состояния ядра заселяются γ -каскадами после вылета мгновенных нейтронов из первичного осколка фотоделения, когда термодинамическая энергия возбуждения ядра U ниже энергии отделения нейтрона S_n ; 2) так как ядро-изомер может формироваться после вылета мгновенных нейтронов с разными энергиями, то энергия возбуждения состояний

перед γ -излучением точно не определена и задается функцией распределения по энергии возбуждения φ ; 3) мгновенные нейтроны вылетают в основном с малыми орбитальными моментами такими, что распределение состояний по угловому моменту в ядре продукте перед γ -переходами незначительно отличается от $P(J)$ в первичном ядре-фрагменте. Поэтому для расчета теоретических значений изомерных отношений используется выражение

$$R = \sum_{J,\pi} \int dU \cdot \varphi(U) \cdot P(J) \cdot g_m(U, J, \pi) / \sum_{j,\pi} \int dU \cdot \varphi(U) \cdot P(j) \cdot g_g(U, j, \pi), \quad (4)$$

где $g_m(U, J, \pi)$ ($g_g(U, J, \pi)$) - вероятность заселения γ -излучением изомерного (основного) уровня из состояний с энергией возбуждения U , спином J и четностью $\pi = \pm 1$. Функция распределения по энергии возбуждения $\varphi(U)$ аппроксимирована ступенькой с ненулевым значением в интервале $\Delta U = U_{\min} \div U_{\max}$ с $U_{\min} = 0,5S_n + n\Delta_0 + E_{rot}(J)$ и $U_{\max} = S_n + n\Delta_0 + E_{rot}(J)$, где $n\Delta_0$ - энергия спаривания с $\Delta_0 = 12/\sqrt{A}$ и $n = 2, 1, 0$ для парно-парных, парно-непарных, непарно-непарных ядер соответственно. Вращательная энергия $E_{rot}(J)$ выбирается в виде $E_{rot}(J) = J(J+1)/(2F)$ с моментом инерции $F = 0,0194 A^{5/3}$ ([19], с. 96, в единицах МэВ⁻¹). Значение параметра B в выражениях (2) и (3) вычислялось по модели Ферми-газа для сферического ядра $B^2 = F \cdot T$ (в безразмерных единицах) с температурой $T = \sqrt{\bar{U}}/a$ при средней энергии возбуждения $\bar{U} = (U_{\min} + U_{\max})/2$ и параметром плотности ядерных уровней $a = A/10$ МэВ⁻¹.

Вероятности заселения $g_g(U, J, \pi)$, $g_m(U, J, \pi)$ вычислялись с помощью кода

EMPIRE 3.2 [20]. Этот код содержит и использует существующую базу данных библиотеки RIPL-3 [19] по энергиям низколежащих состояний и вероятностям γ -переходов, что позволяет обойтись без использования так называемого решающего γ -перехода метода Хьюзенга - Ванденбоша [16 - 18]. В предыдущей нашей работе [9] было показано, что расчет среднего значения углового момента осколков деления не сильно зависит от использованного при расчете вида радиационной силовой функции и плотности ядерных уровней. Поэтому при расчетах использовалось приближение модифицированного лоренциана (MLO1) для радиационной силовой функции и улучшенная обобщенная сверткевая модель (EGSM) для плотности ядерных уровней [19 - 22]. Остальные входные параметры были тоже взяты по умолчанию кода EMPIRE 3.2.

В табл. 2 приведены, в качестве примера, параметры λ , μ распределений по угловым моментам (2) и (3) осколков ⁸⁴Br, ¹³¹Te, ¹³²Sb, ¹³²I, ¹³³Te, ¹³⁴I, ¹³⁵Xe фотоделения ядра ²³⁵U. Значения были получены подгонкой методом χ^2 теоретических величин изомерных отношений к экспериментальным значениям, приведенным в табл. 1.

Таблица 2. Значения параметров распределений угловых моментов в первичных осколках фотоделения ⁸⁴Br, ¹³¹Te, ¹³²Sb, ¹³²I, ¹³³Te, ¹³⁴I, ¹³⁵Xe для ²³⁵U

Ядро	Значения параметров		
	B	λ	μ
⁸⁴ Br	5,23	0,70(2)	-3,26(4)
¹³¹ Te	6,51	0,07(4)	-1,1(5)
¹³² Sb	6,50	0,004(24)	-0,04(45)
¹³² I	6,63	-0,05(3)	1,4(8)
¹³³ Te	6,55	0,25(12)	-0,5(2)
¹³⁴ I	6,67	0,15(25)	-2,0(2)
¹³⁵ Xe	6,72	1,13(5)	-5,11(5)

Примечание. В скобках указаны погрешности, которые соответствуют погрешностям измерений из табл.1. Цифры в скобках относятся к последним значащим цифрам средних значений.

Аналогично были вычислены и параметры распределений $P(J)$ для фрагментов фотоделения ядер ^{237}Np и ^{239}Pu . После этого были вычислены средние угловые моменты \bar{J} первичных фрагментов. Для распределения вида (2) значения \bar{J} и их статистические погрешности приве-

дены в табл. 3 и на рис. 3. В табл. 3 цифрами в скобках после символов делящихся ядер указаны значения спинов компаунд-ядра, образующегося после поглощения (дипольного) тормозного излучения. Для распределения $P(J)$ вида (3) результаты близки.

Таблица 3. Значения средних угловых моментов осколков деления \bar{J} в единицах \hbar

Ядро	^{235}U (2,5; 3,5; 4,5)		^{237}Np (1,5; 2,5; 3,5)		^{239}Pu (0,5; 1,5)	
	18 МэВ	9,8 МэВ	18 МэВ	9,8 МэВ	18 МэВ	9,8 МэВ
^{84}Br	1,8(5)	-	1,9(5)	-	1,7(5)	-
^{90}Rb	-	-	2,2(6)	-	1,8(6)	-
^{131}Te	6,8(8)	-	5,8(7)	-	7,4(8)	7,4(8)
^{132}Sb	8,0(7)	5,6(5)	6,9(6)	-	8,1(6)	8,2(6)
^{132}I	9,6(9)	-	6,7(7)	-	5,2(6)	-
^{133}Te	7,6(6)	5,7(6)	10,6(7)	10,6(7)	8,4(5)	8,4(5)
^{134}I	5,6(6)	5,3(5)	-	5,6(6)	7,7(8)	7,7(8)
^{135}Xe	1,4(5)	2,0(5)	1,2(5)	1,3(5)	1,4(5)	1,5(5)

П р и м е ч а н и е. В скобках за средними значениями указаны погрешности, которые соответствуют погрешностям измерений из табл. 1. Цифры в скобках относятся к последним значащим цифрам средних значений.

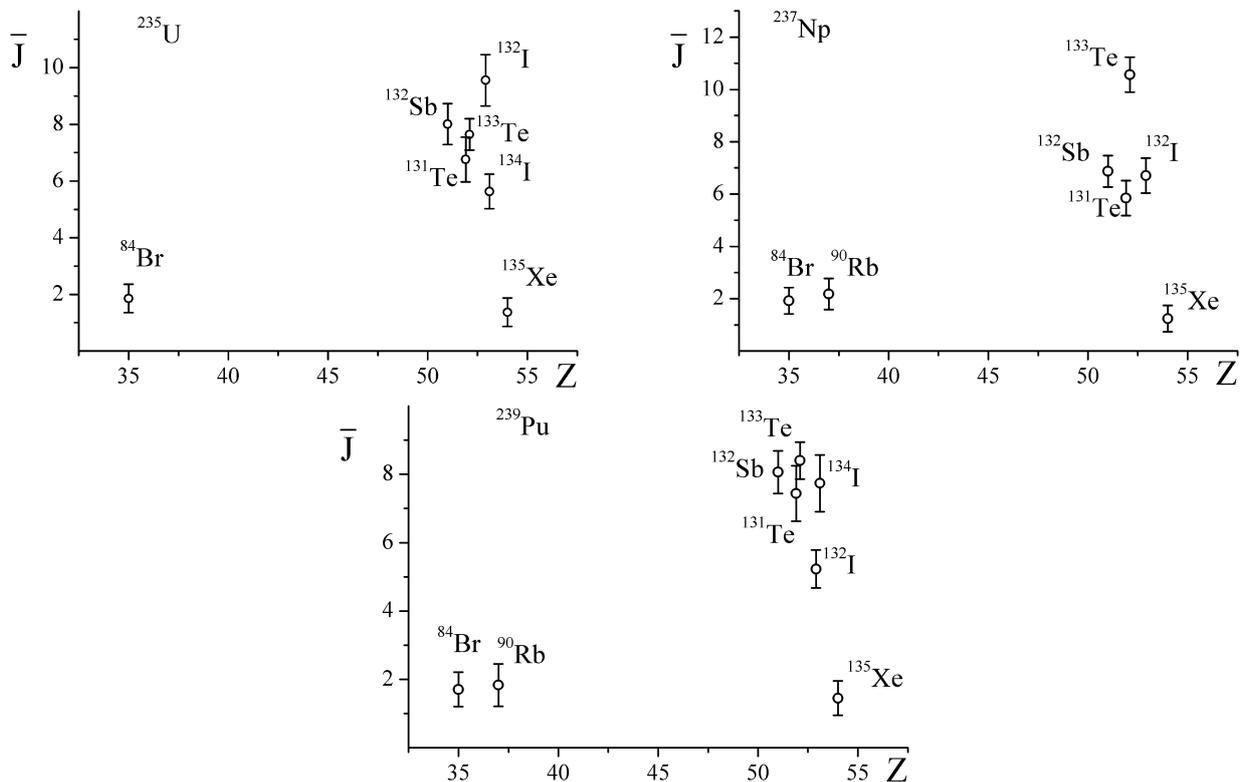


Рис. 3. Средние угловые моменты \bar{J} осколков фотоделения ядер ^{235}U , ^{237}Np и ^{239}Pu тормозным излучением с граничной энергией $E_c = 18$ МэВ в зависимости от заряда осколка.

Отметим, что надежность использования обобщенной модели Хьюзена - Ванденбоша для вычисления средних угловых моментов первичных фрагментов анализировалась в [9] (см. рис. 6). Было показано, что расчеты среднего углового момента по такой модели и статистическим подходам, которые учитывают вылет

нейтронов, близки и в рамках погрешностей согласуются между собой. Таким образом, вылет нейтронов до γ -каскадов хотя и искажает начальное распределение угловых моментов в первичных фрагментах деления, но в целом не приводит к существенному изменению среднего значения углового момента. Отметим, что средний угло-

вой момент, уносимый нейтронами, нами вычислен в квазиклассическом приближении в Приложении и его значение порядка $\sim 1\hbar$. В табл. 3 и на рис. 3 погрешность \bar{J} указана без учета искажения первичного распределения угловых моментов за счет вылета нейтронов. В соответствии с расчетами в [9] при использовании кода EMPIRE учет такого эффекта может дополнительно изменить среднее значение углового момента на $\sim 20\%$, что согласуется с результатами работ [23, 24].

В целом можно сделать вывод, что средние угловые моменты тяжелых фрагментов деления примерно в 3 раза больше, чем средние угловые моменты легких осколков деления, и они значительно отличаются от значений спинов делящихся ядер. Последнее указывает на наличие дополнительного механизма формирования углового момента в тяжелых фрагментах. Регулярным исключением является ^{135}Xe , для которого средние угловые моменты как в реакции (γ, f) , так и в реакциях $(\gamma, f) + (\gamma, pf)$ составляют величины порядка $\sim 1,5\hbar$. Это указывает на то, что в этом

фрагменте дополнительный механизм формирования углового момента, по-видимому, отсутствует.

Отметим, что значение спина $J_m = 6$ изомерного состояния для фрагмента ^{84}Br определено недостаточно надежно. Поэтому в работе было проанализировано изменение вероятностей заселения γ -квантами основного и изомерного состояний, а также величины изомерного от изменения спина изомерного состояния ^{84}Br . В приведенных ниже расчетах, кроме наиболее вероятного значения $J_m = 6$ для изомерного уровня, использовалось и значение $J_m = 8$; состояние тоже считалось нечетным.

На рис. 4 представлены зависимости от энергии возбуждения и спина начальных состояний отношений заселенностей основного (Δ_g) и изомерного (Δ_m) уровней при изменении значения изомерного уровня с $J_m^- = 6^-$ на $J_m^- = 8^-$ в осколке ^{84}Br фотоделения ^{235}U :

$$\Delta_g(U, J) = \frac{\left[\sum_{\pi} g_g(U, J, \pi; J_m = 6) - \sum_{\pi} g_g(U, J, \pi; J_m = 8) \right]}{\sum_{\pi} g_g(U, J, \pi; J_m = 6)},$$

$$\Delta_m(U, J) = \frac{\left[\sum_{\pi} g_m(U, J, \pi; J_m = 6) - \sum_{\pi} g_m(U, J, \pi; J_m = 8) \right]}{\sum_{\pi} g_m(U, J, \pi; J_m = 6)}.$$

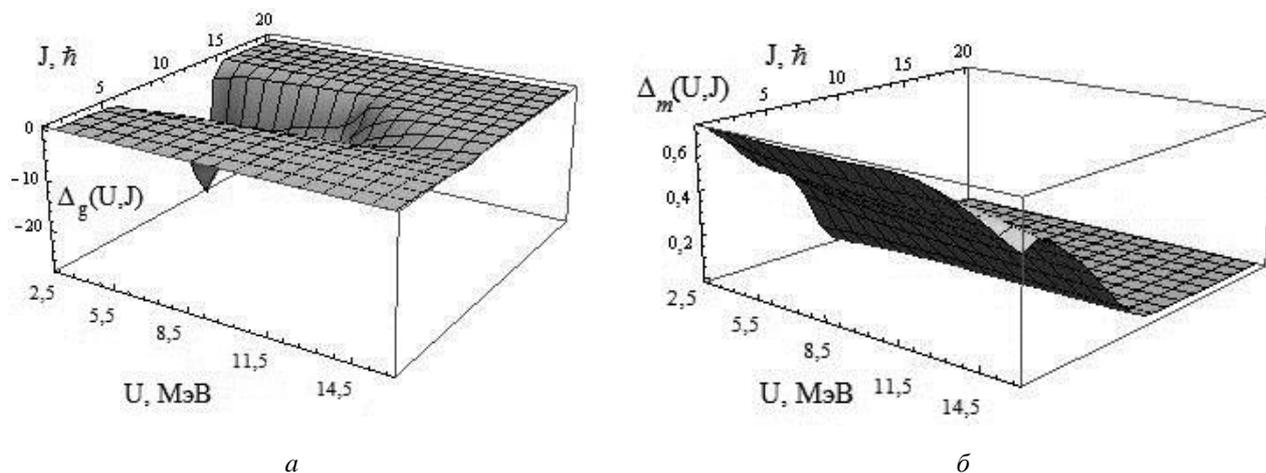


Рис. 4. Отношения заселенностей основного (Δ_g) и изомерного (Δ_m) уровней при изменении значения изомерного уровня с 6^- на 8^- в осколке ^{84}Br фотоделения ^{235}U как функции энергии возбуждения и спина начальных состояний.

Из рис. 4 видно, что изменение спина изомерного состояния на $\sim 30\%$ (с 6 на 8) может привести к изменению вероятностей заселения основного и изомерного состояний на порядок. Однако в обоих случаях для фрагмента ^{84}Br можно подогнать экспериментальное значение изомерного

отношения. При этом значения среднего углового момента меняются на $\sim 20\%$ (с $\bar{J} = 1,9$ при $J_m = 6$ до $\bar{J} = 2,3$ для $J_m = 8$) и в рамках погрешности согласуются между собой: $\bar{J} = 1,9 \pm 0,5 [J_m = 6]$; $\bar{J} = 2,3 \pm 0,5 [J_m = 8]$.

Приложение

Квазиклассическая оценка среднего углового момента, уносимого нейтронами

В квазиклассическом приближении непрерывных угловых моментов выражение для среднего углового момента ($\langle l \rangle$), который уносят нейтроны, можно записать в виде

$$\langle l \rangle = \int_0^{\varepsilon_{\max}} w(\varepsilon) \bar{l}(\varepsilon) d\varepsilon.$$

Здесь $\bar{l}(\varepsilon)$ - средний момент, который уносит нейтрон с энергией ε ; $w(\varepsilon)$ - вероятность вылета нейтронов с энергией ε в единичный интервал энергии. Эти величины можно вычислить, если известен спектр вылетающих нейтронов $n(\varepsilon)$ и вероятность их распределения по угловым моментам $p(l)$:

$$\bar{l}(\varepsilon) = \int_0^{l_{\max}(\varepsilon)} l p(l) dl, \quad w(\varepsilon) = n(\varepsilon) / \int_0^{\varepsilon_{\max}} n(\varepsilon') d\varepsilon',$$

где $l_{\max}(\varepsilon) = kR = \sqrt{2m_n \varepsilon / \hbar^2} \cdot R$ - максимальный угловой момент уносимый нейтроном из ядра радиуса $R = r_0 A_F^{1/3}$ (фм) с массовым числом A_F . Используя аппроксимацию из работы [25] $p(l) = (2l / l_{\max}^2(\varepsilon)) \cdot \Theta(l_{\max} - l)$, имеем

$$\bar{l}(\varepsilon) = (2/3) l_{\max}(\varepsilon).$$

Значения средних угловых моментов уносимых нейтронами из первичных осколков деления в единицах \hbar

Ядро-фрагмент	$\langle l \rangle$		
	²³⁵ U	²³⁷ Np	²³⁹ Pu
⁸⁴ Br	0,84	0,86	0,88
¹³¹ Te	0,98	1,00	1,02
¹³² Sb	0,98	1,00	1,02
¹³² I	0,98	1,00	1,02
¹³³ Te	0,98	1,00	1,02
¹³⁴ I	0,98	1,01	1,02
¹³⁵ Xe	0,99	1,01	1,03

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Vandenbosh R., Huizenga J.R. Nuclear Fission. - Academic Press, 1973. - 422 p.
- Wagemans C. The Nuclear Fission Process. - Ed., CRC Press, Boca Raton (EL), USA, 1995. - 475 p.
- Ahmad I., Philips W.R. Gamma rays from fission fragments // Rep. Prog. Phys. - 1995. - Vol. 58. - P. 1415 - 1463.
- Тер-Акопян Г.М., Оганесян Ю.Ц., Даниель В.А. и др. Экспериментальные методы исследования спонтанного и низкоэнергетического деления // ЭЧАЯ. - 1997. - Т. 28. - С. 1357 - 1388.
- Denisov V.Yu., Reshitko S.V. Mean angular momentum of nuclear-fission fragments // Phys. At. Nucl. - 1999. - Vol. 62. - P. 1806 - 1814.
- Mikhailov I.N., Quentin P., Briancon Ch. Angular momentum of fission fragments // Ядерная физика. - 2001. - Т. 64. - С. 1185 - 1191.
- Вишневский И.Н., Желтоножский В.А., Давидовская О.И., Саврасов А.Н. Исследование фотоделения ²³²Th и ²³⁸U // Изв. РАН. Сер. физ. - 2009. - Т. 73, № 6. - С. 782 - 785.
- Бесшейко О.А., Вишневский И.Н., Желтоножский В.А. и др. Изомерные отношения и средние угловые моменты для продуктов фотоделения ²³⁸U та ²³⁷Np // Изв. РАН. Сер. физ. - 2005. - Т. 69, № 5. - С. 658 - 662.

Аппроксимируя спектр нейтронов формулой Максвелла [26, 27] $n(\varepsilon) = const \cdot \varepsilon^{1/2} \exp(-\varepsilon/T_m)$ с эффективной температурой $T_m = \sqrt{U/a}$ в делящемся ядре с энергией возбуждения U и $a = A/8$, находим (при $\varepsilon_{\max} \gg T_m$)

$$\langle l \rangle = \frac{4}{3} \sqrt{\frac{2m_n T_m}{\hbar^2 \pi}} R.$$

Энергию возбуждения можно оценить, используя информацию о средней множественности мгновенных нейтронов $\bar{\nu}$ в реакциях фотопоглощения, как [26, 27]

$$U \cong (\bar{\nu} + 1) \langle S_n \rangle,$$

где $\langle S_n \rangle$ - средняя энергия отделения нейтронов в фрагментах; $\langle S_n \rangle \cong S_{2n} / 2$ [28] с S_{2n} для энергии отрыва пары нейтронов от делящегося ядра. Результаты расчетов $\langle l \rangle$ по этим формулам приведены в таблице. Были использованы следующие значения параметров: ²³⁵U ($S_{2n} = 12,146$ МэВ, $\bar{\nu} = 3,2$), ²³⁷Np ($S_{2n} = 12,311$ МэВ, $\bar{\nu} = 3,6$), ²³⁹Pu ($S_{2n} = 12,653$ МэВ, $\bar{\nu} = 3,8$); $r_0 = 1,2$ фм. Значения средней множественности мгновенных нейтронов примерно соответствуют $\bar{\nu}$ из библиотеки ENDF/B-VII [29] при средней энергии гамма-квантов $\langle E \rangle = 12$ МэВ.

9. *Vyshnevsky I.M., Zheltonozhskii V.O., Savrasov A.M. et al.* Isomer yield ratios of ^{133}Te , ^{134}I , ^{135}Xe in photo-fission of ^{235}U with 17 MeV bremsstrahlung // *Ядерна фізика та енергетика*. - 2014. - Т. 15, № 2. - С. 111 - 118.
10. *Aumann D.C., Guckel W., Nirschl E., Zeising H.* Independent isomeric yield ratio of ^{148}Pm in fission of the moderately excited ^{236}U compound nucleus as a measure of fragment angular momentum // *Phys. Rev. C*. - 1977. - Vol. 16. - P. 254 - 265.
11. *Jacobs E., Thierens H., De Frenne D. et al.* Product yields for the photofission of ^{238}U with 12-, 15-, 20-, 30-, and 70-Mev bremsstrahlung // *Phys. Rev. C*. - 1979. - Vol. 19. - P. 422 - 432.
12. *Ford G.P., Wolfsberg K., Erdal B.R.* Independent yields of the isomers of ^{133}Xe and ^{135}Xe for neutron-induced fission of ^{233}U , ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , and $^{242}\text{Am}^m$ // *Phys. Rev. C*. - 1984. - Vol. 30. - P.195 - 213.
13. *Vishnevsky I.N., Denisov V.Yu., Zheltonozhsky V.A. et al.* Mean angular momenta of fragments from ^{232}Th fission // *Phys. At. Nucl.* - 1998. - Vol. 61. - P. 1452 - 1458.
14. *Хоменков В.П.* Исследование атомно-ядерных эффектов в процессе внутренней конверсии гамма-лучей: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. - К., 2003. - 19 с.
15. *Вишневский И.Н., Давидовская О.И., Желтоножский В.А., Саврасов А.Н.* Исследование фотоделения ^{235}U и ^{239}Pu // *Изв. РАН. Сер. физ.* - 2010. - Т. 74, № 4. - С. 538 - 541.
16. *Huizenga J.R., Vandenbosh R.* Interpretation of Isomeric Cross-Section Ratios for (n, γ) and (γ , n) Reactions // *Phys. Rev.* - 1960. - Vol. 120. - P. 1305 - 1312.
17. *Vandenbosh R., Huizenga J.R.* Isomeric Cross-Section Ratios for Reactions Producing the Isomeric Pair $\text{Hg}^{197,197m}$ // *Phys. Rev.* - 1960. - Vol. 120. - P. 1313 - 1318.
18. *Warhalek H., Vandenbosh R.* Relative cross-sections for formation of the shielded isomeric pair ^{134m}Cs and ^{134}Cs in medium energy fission // *J. Inorg. Nucl. Chem.* - 1964. - Vol. 26. - P. 669 - 676.
19. *Capote R., Herman M., Oblozinsky P. et al.* Reference input Parameter Library (RIPL3) // *Nuclear Data Sheets*. - 2009. - Vol. 110. - P. 3107 - 3214; <http://www-nds.iaea.org/RIPL-3/>.
20. *Herman M., Capote R., Carlson B.V. et al.*, EMPIRE: Nuclear Reaction Model Code System for Data Evaluation // *Nuclear Data Sheets*. - 2007. - Vol. 108. - P. 2655 - 2716; <http://www.nndc.bnl.gov/empire/>.
21. *Plujko V.A., Gorbachenko O.M., Zheltonozhskii V.O., Rovenskykh E.P.* Average Description of Dipole Gamma-Transitions in Hot Atomic Nuclei // *Nuclear Data Sheets*. - 2014. - Vol. 118. - P. 237 - 239.
22. *Plujko V.A., Gorbachenko O.M., Bondar B.M., Rovenskykh E.P.* Nuclear level density within extended superfluid model with collective state enhancement // *Nuclear Data Sheets*. - 2014. - Vol. 118. - P. 240 - 243.
23. *Sarantites D.G., Gordon G.E., Coryell Ch. D., De Frenne D. et al.* Ratios of independent yields of the isomers $\text{Te}^{131-131m}$ and $\text{Te}^{133-133m}$ in fission // *Phys. Rev.* - 1965. - Vol. 138. - P. B353 - B364.
24. *Thierens H., De Frenne D., Jacobs E. et al.* Product yields for the photofission of ^{235}U and ^{238}U with 25-Mev bremsstrahlung // *Phys. Rev. C*. - 1976. - Vol. 14. - P. 1058 - 1067.
25. *Alexander J.M., Simonoff G.N.* Excitation functions for ^{149}Tb from reactions between complex nuclei // *Phys. Rev.* - 1963. - Vol. 130. - P. 2383 - 2387.
26. *Terrell J.* Fission Neutron Spectra and Nuclear Temperatures // *Phys. Rev.* - 1959. - Vol. 113. - P. 527 - 541.
27. *Madland D.G.* Theory of neutron emission in fission // *Proc. Workshop on Nuclear Reaction Data and Nuclear Reactors*, ICTP (Trieste, Italy, 23 Feb. - 27 Mar., 1998) / Eds. P. Oblozinsky, A. Gandini. - Singapore: World Scientific, 1999. - P. 46 - 67.
28. *Schmidt K.-H., Jurado B.* Description of the fission probability with the GEF code // *JEF/DOC 1423*, OECD-NEA, Paris, 2012. 15 p. (www.khs-erzhausen.de).
29. *Chadwick M.B., Oblozinsky P., Herman M. et al.* ENDF/B-VII.0: Next Generation Evaluated Nuclear Data Library for Nuclear Science and Technology // *Nuclear Data Sheets*. - 2006. - Vol. 107. - P. 2931 - 3060.

**І. М. Вишневський¹, В. О. Желтоножський¹, В. А. Плюйко², А. М. Саврасов¹,
О. М. Горбаченко², О. І. Давидовська¹, Е. П. Ровенських²**

¹ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

² Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

ІЗОМЕРНІ ВІДНОШЕННЯ ТА СЕРЕДНІ КУТОВІ МОМЕНТИ ФРАГМЕНТІВ ФОТОПОДІЛУ ^{235}U , ^{237}Np ТА ^{239}Pu

Досліджено ізомерні відношення виходів фрагментів фотоподілу ядер ^{235}U , ^{237}Np та ^{239}Pu гальмівними γ -квантами з максимальною енергією 18 МеВ. Отримано нові дані з виходів ізомерних пар ядер ^{84}Br , ^{90}Rb , ^{131}Te , ^{132}Sb , ^{132}I , ^{133}Te , ^{134}I , ^{135}Xe . Ізомерні відношення отримано з відніманням внеску від заселення станів досліджуваних фрагментів від β -розпаду відповідних ізобарних ядер. Визначено середні кутові моменти фрагментів поділу в рамках узагальненої статистичної моделі Хьюзена - Ванденбоша з використанням коду EMPIRE 3.2.

Ключові слова: фотоподіл, метод ізомерних відношень, середні кутові моменти продуктів поділу.

I. M. Vyshnevskiy¹, V. O. Zheltonozhskiy¹, V. A. Plujko², A. M. Savrasov¹,
O. M. Gorbachenko², O. I. Davydovska¹, E. P. Rovenskykh²

¹ Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

² Taras Shevchenko National University, Kyiv

ISOMERIC YIELD RATIOS AND MEAN ANGULAR MOMENTA OF PHOTOFISSION FRAGMENTS OF ²³⁵U, ²³⁷Np AND ²³⁹Pu

Isomeric yield ratios for the fragments of photofission ²³⁵U, ²³⁷Np and ²³⁹Pu by bremsstrahlung with end-point energy of 18 MeV are measured. New data for isomeric yield ratios of the fragments ⁸⁴Se, ⁹⁰Br, ¹³¹Te, ¹³²Sb, ¹³²I, ¹³³Te, ¹³⁴I, ¹³⁵Xe are determined. The contributions to the isomeric yield ratios from β -decay of the nuclei of parent isobaric chain were removed. Mean angular momenta of studied nuclei are estimated within the framework of an extended Huizenga - Vandenbosh statistical model with using EMPIRE 3.2 code.

Keywords: photofission, isomeric ratios method, average angular momenta of fission products.

REFERENCES

1. Vandenbosh R., Huizenga J.R. Nuclear Fission. - Academic Press, 1973. - 422 p.
2. Wagemans C. The Nuclear Fission Process. - Ed., CRC Press, Boca Raton (EL), USA, 1995. - 475 p.
3. Ahmad I., Philips W.R. Gamma rays from fission fragments // Rep. Prog. Phys. - 1995. - Vol. 58. - P. 1415 - 1463.
4. Ter-Akopyan G.M., Oganesyanyan Yu.Ts. Daniel' V.A. et al. // EChAYa. - 1997. - Vol. 28. - P. 1357 - 1388. (Rus)
5. Denisov V.Yu., Reshitko S.V. Mean angular momentum of nuclear-fission fragments // Phys. At. Nucl. - 1999. - Vol. 62. - P. 1806 - 1814.
6. Mikhailov I.N., Quentin P., Briancon Ch. Angular momentum of fission fragments // Ядерная физика. - 2001. - Т. 64. - С. 1185 - 1191.
7. Vishnevskij I.N., Zheltonozhskij V.A., Davidovskaya O.I., Savrasov A.N. // Izv. RAN. Ser. fiz. - 2009. - Vol. 73, No. 6. - P. 782 - 785. (Rus)
8. Besshejko O.A., Vishnevskij I.N., Zheltonozhskij V.A. et al. // Izv. RAN. Ser. fiz. - 2005. - Vol. 69, No. 5. - P. 658 - 662. (Rus)
9. Vyshnevskiy I.M., Zheltonozhskii V.O., Savrasov A.M. et al. Isomer yield ratios of ¹³³Te, ¹³⁴I, ¹³⁵Xe in photofission of ²³⁵U with 17 MeV bremsstrahlung // Ядерная физика та енергетика. - 2014. - Т. 15, № 2. - С. 111 - 118.
10. Aumann D.C., Guckel W., Nirschl E., Zeising H. Independent isomeric yield ratio of ¹⁴⁸Pm in fission of the moderately excited ²³⁶U compound nucleus as a measure of fragment angular momentum // Phys. Rev. C. - 1977. - Vol. 16. - P. 254 - 265.
11. Jacobs E., Thierens H., De Frenne D. et al. Product yields for the photofission of ²³⁸U with 12-, 15-, 20-, 30-, and 70-MeV bremsstrahlung // Phys. Rev. C. - 1979. - Vol. 19. - P. 422 - 432.
12. Ford G.P., Wolfsberg K., Erdal B.R. Independent yields of the isomers of ¹³³Xe and ¹³⁵Xe for neutron-induced fission of ²³³U, ²³⁵U, ²³⁸U, ²³⁹Pu, and ²⁴²Am^m // Phys. Rev. C. - 1984. - Vol. 30. - P. 195 - 213.
13. Vishnevskiy I.N., Denisov V.Yu., Zheltonozhskiy V.A. et al. Mean angular momenta of fragments from ²³²Th fission // Phys. At. Nucl. - 1998. - Vol. 61. - P. 1452 - 1458.
14. Khomenkov V.P. Atomic-nuclear effects research in the process of internal conversion of gamma rays: Thesis Ph. D. abstract. - Kyiv., 2003. - 19 p. (Rus)
15. Vishnevskij I.N., Davidovskaya O.I., Zheltonozhskij V.A., Savrasov A.N. // Izv. RAN. Ser. fiz. - 2010. - Vol. 74, No. 4. - P. 538 - 541. (Rus)
16. Huizenga J.R., Vandenbosh R. Interpretation of Isomeric Cross-Section Ratios for (n, γ) and (γ , n) Reactions // Phys. Rev. - 1960. - Vol. 120. - P. 1305 - 1312.
17. Vandenbosh R., Huizenga J.R. Isomeric Cross-Section Ratios for Reactions Producing the Isomeric Pair Hg^{197,197m} // Phys. Rev. - 1960. - Vol. 120. - P. 1313 - 1318.
18. Warhalek H., Vandenbosh R. Relative cross-sections for formation of the shielded isomeric pair ^{134m}Cs and ¹³⁴Cs in medium energy fission // J. Inorg. Nucl. Chem. - 1964. - Vol. 26. - P. 669 - 676.
19. Capote R., Herman M., Oblozinsky P. et al. Reference input Parameter Library (RIPL3) // Nuclear Data Sheets. - 2009. - Vol. 110. - P. 3107 - 3214; <http://www-nds.iaea.org/RIPL-3/>.
20. Herman M., Capote R., Carlson B.V. et al., EMPIRE: Nuclear Reaction Model Code System for Data Evaluation // Nuclear Data Sheets. - 2007. - Vol. 108. - P. 2655 - 2716; <http://www.nndc.bnl.gov/empire/>.
21. Plujko V.A., Gorbachenko O.M., Zheltonozhskii V.O., Rovenskykh E.P. Average Description of Dipole Gamma-Transitions in Hot Atomic Nuclei // Nuclear Data Sheets. - 2014. - Vol. 118. - P. 237 - 239.
22. Plujko V.A., Gorbachenko O.M., Bondar B.M., Rovenskykh E.P. Nuclear level density within extended superfluid model with collective state enhancement // Nuclear Data Sheets. - 2014. - Vol. 118. - P. 240 - 243.
23. Sarantites D.G., Gordon G.E., Coryell Ch. D., De

- Frenne D. et al.* Ratios of independent yields of the isomers $\text{Te}^{131-131\text{m}}$ and $\text{Te}^{133-133\text{m}}$ in fission // *Phys. Rev.* - 1965. - Vol. 138. - P. B353 - B364.
24. *Thierens H., De Frenne D., Jacobs E. et al.* Product yields for the photofission of ^{235}U and ^{238}U with 25-Mev bremsstrahlung // *Phys. Rev. C.* - 1976. - Vol. 14. - P. 1058 - 1067.
25. *Alexander J.M., Simonoff G.N.* Excitation functions for ^{149}Tb from reactions between complex nuclei // *Phys. Rev.* - 1963. - Vol. 130. - P. 2383 - 2387.
26. *Terrell J.* Fission Neutron Spectra and Nuclear Temperatures // *Phys. Rev.* - 1959. - Vol. 113. - P. 527 - 541.
27. *Madland D.G.* Theory of neutron emission in fission // *Proc. Workshop on Nuclear Reaction Data and Nuclear Reactors, ICTP (Trieste, Italy, 23 Feb. - 27 Mar., 1998)* / Eds. P. Oblozinsky, A. Gandini. - Singapore: World Scientific, 1999. - P. 46 - 67.
28. *Schmidt K.-H., Jurado B.* Description of the fission probability with the GEF code // *JEF/DOC 1423, OECD-NEA, Paris, 2012.* 15 p. (www.khs-erzhausen.de).
29. *Chadwick M.B., Oblozinsky P., Herman M. et al.* ENDF/B-VII.0: Next Generation Evaluated Nuclear Data Library for Nuclear Science and Technology // *Nuclear Data Sheets.* - 2006. - Vol. 107. - P. 2931 - 3060.

Надійшла 22.01.2015

Received 22.01.2015