

И. Н. Вишнеvский, В. А. Желтоножский, А. Н. Саврасов, Е. П. Ровенских

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

ИССЛЕДОВАНИЕ ФРАГМЕНТОВ ФОТОДЕЛЕНИЯ  $^{233}\text{U}$  И  $^{241}\text{Am}$ 

Измерены изомерные отношения выходов ядер  $^{90}\text{Rb}$ ,  $^{133}\text{Te}$ ,  $^{134}\text{I}$  и  $^{135}\text{Xe}$ , образованных в результате фотоделения  $^{233}\text{U}$  тормозными  $\gamma$ -квантами с граничной энергией 10,5 и 17 МэВ и  $^{241}\text{Am}$   $\gamma$ -квантами с граничной энергией 9,8 МэВ. Изомерные отношения вычислялись с учетом вклада от распада изобарных ядер в выходы исследуемых изотопов. Определены средние угловые моменты исследуемых фрагментов деления в рамках статистической модели распада.

*Ключевые слова:* фотоделение, изомерные отношения выходов, активационная методика, расчеты в TALYS.

## Введение

Известно, что при низкоэнергетическом и спонтанном делении осколки, которые создаются, имеют угловые моменты, величины которых значительно превышают угловой момент делящегося ядра. В рамках жидкокапельной модели деления создание больших угловых моментов объясняется возбуждением мод, таких как «изгиб» и «кручение», во время спуска ядра из седловой точки к точке разрыва. К тому же некоторый дополнительный угловой момент может возникать за счет кулоновского отталкивания фрагментов сразу после деления.

Поэтому исследование продуктов деления может предоставить полезную информацию о конфигурации ядерной системы возле точки разрыва и привести к лучшему пониманию процессов деления. Среди серии методов, изучающих фрагменты деления можно выделить следующие: исследование угловых зависимостей  $\gamma$ -квантов относительно выделенных направлений; изучение угловых распределений фрагментов деления; исследование множественности  $\gamma$ -квантов; использование информации об относительном заселении уровней ротационной полосы; использование изомерных отношений для исследования как угловых моментов высоковозбужденных состояний, так и для изучения структуры ядра и характеристик уровней в широком диапазоне энергий возбуждения.

Данные о средних угловых моментах осколков деления представляют большой научный интерес, так как до сих пор отсутствует ясное понимание одновременного существования двух каналов деления: ассиметричного и симметричного. Для создания теоретических моделей необходима экспериментальная информация о динамике деления. Одним из параметров, характеризующих эту динамику, являются средние угловые моменты продуктов деления. Из этих

данных извлекается информация о свойствах делящихся ядер при переходе от седловой точки до точки разрыва.

Метод изомерных отношений – наиболее распространенный метод получения информации о средних угловых моментах фрагментов деления. Он базируется на измерении изомерных отношений  $\sigma_h/\sigma_l$ , где  $\sigma_h$ ,  $\sigma_l$  – сечения образования высоко- и низкоспиновых состояний одного и того же фрагмента деления. Такие состояния образуются, например, в ядрах, близких к магическим с  $A \sim 90$ ,  $Z \sim 40$ ,  $N \sim 50$  и  $A \sim 132$ ,  $Z \sim 50$ ,  $N \sim 82$ . В этих ядрах образуются изомерные и основные состояния за счет подболочек, различающихся значительно по квантовым числам ( $p_{1/2}$ ;  $g_{9/2}$ ) – для  $Z$ ,  $N \sim 50$ ;  $s_{1/2}$ ;  $d_{3/2}$ ;  $h_{11/2}$  – вблизи  $N = 82$ .

Следует отметить, что основная информация о величинах  $\sigma_h/\sigma_l$  получена в ( $n$ ,  $f$ )-делении [1]. Что касается фотоделения, то, например, изучались изомерные отношения выходов и средние угловые моменты  $J$  осколков для  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235,238}\text{U}$  [2 - 9]. С трансурановых нуклидов данным методом исследовалось фотоделение  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Am}$  [10 - 12]. Фотоделение  $^{241}\text{Am}$  проводилось  $\gamma$ -квантами тормозного спектра электронов с граничной энергией  $E_{\text{гр}} = 17$  МэВ.

В то же время изучение низкоэнергетического фотоделения тяжелых ядер имеет следующие преимущества перед делением другими частицами: взаимодействие  $\gamma$ -квантов с веществом полностью электромагнитное и в ядро вносится угловой момент  $1\hbar$ . Исходя из вышеизложенного, целью данной работы было исследование изомерных отношений и средних угловых моментов при фотоделении ядер  $^{233}\text{U}$  для реакций  $(\gamma, f) + (\gamma, pf)$ ,  $^{241}\text{Am}$  в области ниже порога реакции  $(\gamma, pf)$  и анализ влияния изменения числа нейтронов в делящихся системах.

## Методика и экспериментальные результаты

В исследованиях использовалась активационная методика, детали которой можно найти в

работах [11, 13]. Для измерений использовались мишени из урана и америция, обогащенные  $^{241}\text{Am}$  и  $^{233}\text{U}$ . Облучение мишени с  $^{233}\text{U}$  проводилось  $\gamma$ -квантами тормозного спектра электронов микротрона М-30 с энергией 17 и 10,5 МэВ, а мишени с  $^{241}\text{Am}$  – тормозными  $\gamma$ -квантами от электронов с энергией 9,8 МэВ. Граничные энергии тормозных  $\gamma$ -квантов 9,8 и 10,5 МэВ выбраны с целью исключения как ( $\gamma$ ,  $n$ )-канала, который открывается при  $E_{\text{гр}} > 11$  МэВ, так и ( $\gamma$ ,  $n$ )-реакции на материалах контейнеров, в которых находились облучаемые изотопы. Облучение проводилось в течение 5 - 10 мин и через 15 - 20 с начинались измерения на Ge-спектрометрах. Через каждые 60 с спектры записывались в течение всего времени измерения (как правило, оно составляло 5 - 6 ч).

В экспериментах использовались спектрометры на базе Ge-детекторов с разрешением 1,8 кэВ для  $\gamma$ -линии 1332 кэВ  $^{60}\text{Co}$ . Для обработки спектров применялся пакет программ Winspectrum [14]. При описании серии  $\gamma$ -пиков, которые на-

кладывались между собой, их площади определялись путем вписывания эталонной линии в  $\gamma$ -линии серии. Для задания формы эталонной линии использовалась одиночная линия из данного  $\gamma$ -спектра с большой интенсивностью и величина энергии, близкой к энергии накладываются серии, описанной сплайнами.

Анализ спектров проводили, выбирая различные продолжительности пауз и времен измерений. Были надежно выделены  $\gamma$ -переходы изучавшихся ядер.

На рис. 1 указаны фрагменты схем распада исследуемых изомерных пар с выделенными  $\gamma$ -переходами, которые использовались для идентификации распада как подпитывающих материнских ядер, так и основных и изомерных состояний  $^{90}\text{Rb}$ ,  $^{133}\text{Te}$ ,  $^{134}\text{I}$ ,  $^{135}\text{Xe}$ . Характеристики ядер приведены в табл. 1. Экспериментальные значения изомерных отношений выходов (ИОВ) вычислялись с учетом вклада от  $\beta$ -распада изобарных ядер в выходы исследуемых изомерных пар (см. рис. 1).

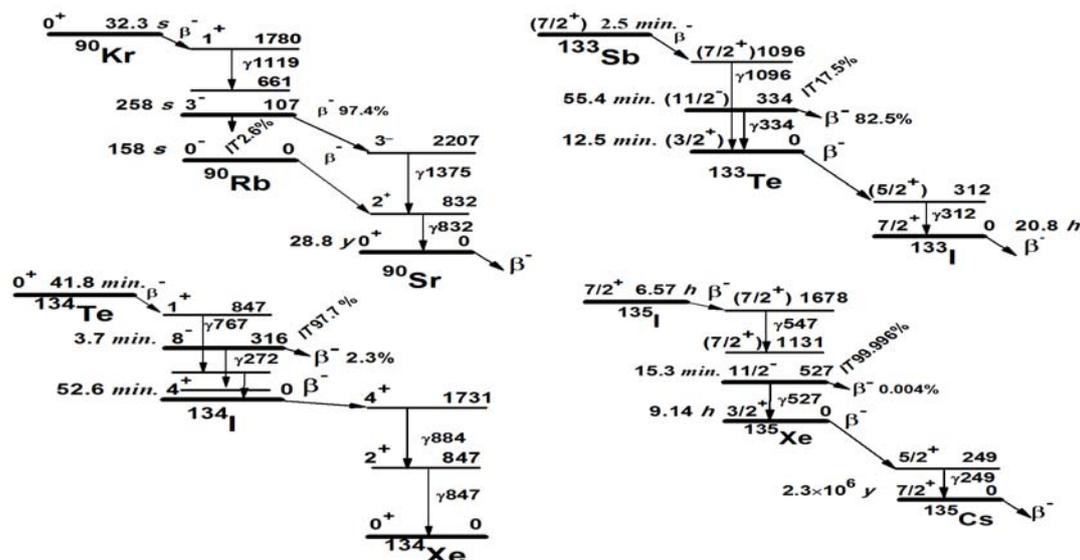


Рис. 1. Фрагменты схем распада исследуемых изомерных пар.

Таблица 1. Спектроскопические характеристики ядер

Нуклид	$T_{1/2}$	$J^\pi$	$E^*$ , кэВ	$E$ , кэВ	$f$ , %
$^{90}\text{Kr}$	32,3 с	$0^+$	-	1119	39
$^{90\text{m}}\text{Rb}$	258 с	$3^-$	107	1375	17
$^{90\text{g}}\text{Rb}$	158 с	$0^-$	-	832	28
$^{133}\text{Sb}$	2,5 мин	$7/2^+$	-	1096	43
$^{133\text{m}}\text{Te}$	55,4 мин	$11/2^-$	334	334	7
$^{133\text{g}}\text{Te}$	12,5 мин	$3/2^+$	-	312	17
$^{134}\text{Te}$	41,8 мин	$0^+$	-	767	29
$^{134\text{m}}\text{I}$	3,7 мин	$8^-$	316	272	79
$^{134\text{g}}\text{I}$	52,6 мин	$4^+$	-	884	54
$^{135}\text{I}$	6,6 ч	$7/2^+$	-	547	7
$^{135\text{m}}\text{Xe}$	15,3 мин	$11/2^-$	527	527	80
$^{135\text{g}}\text{Xe}$	9,1 ч	$3/2^+$	-	249	90

П р и м е ч а н и е.  $E^*$ - величина энергии изомерного состояния;  $E$  и  $f$  – энергии  $\gamma$ -квантов, которые сопровождают распад нуклидов и их квантовые выходы соответственно.

Стоит отметить, что образец  $^{241}\text{Am}$  имел значительную массу и поэтому большое количество  $\gamma$ -переходов низкой интенсивности, которые сопровождают  $\alpha$ -распад имели площади пиков, сравнимые с нужными нам площадями переходов.

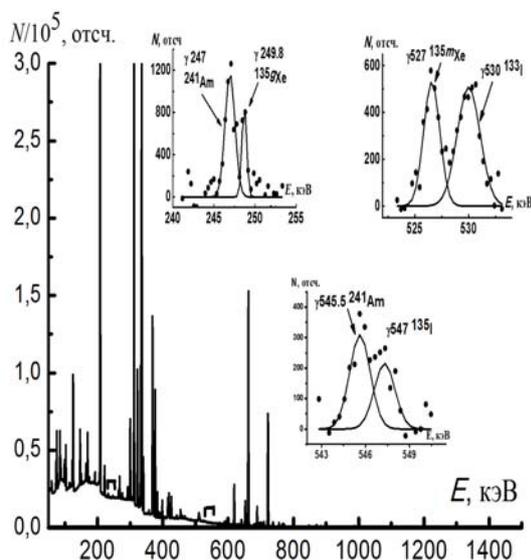


Рис. 2. Фрагменты спектра фотоделения  $^{241}\text{Am}$ .

На рис. 2 и 3 показаны общие  $\gamma$ -спектры и выделенные  $\gamma$ -линии, которые сопровождают распад  $^{135}\text{I}$  (547 кэВ),  $^{135m}\text{Xe}$  (527 кэВ) и  $^{135g}\text{Xe}$  (249,8 кэВ) при фотоделении  $^{241}\text{Am}$  (см. рис. 2) и  $^{233}\text{U}$  (см. рис. 3). Видно, что в случае фотоделения  $^{241}\text{Am}$  рядом с линией 249,8 кэВ присутствует  $\gamma$ -переход с энергией 247 кэВ, который сопровождает распад самого  $^{241}\text{Am}$  и благодаря хорошему разрешению неплохо отделяется от  $\gamma$ -линии с энергией 249,8 кэВ. После облучения  $^{241}\text{Am}$  подобная ситуация возникает при определении распада  $^{135}\text{I}$  по  $\gamma$ -линии с энергией 547 кэВ. В этом случае близкорасположенным является  $\gamma$ -переход с энергией 545,5 кэВ, который сопровождает распад  $^{241}\text{Am}$  (см. рис. 2). В то же время при фотоделении  $^{233}\text{U}$  подобных проблем не существует, хотя в случае идентификации распада  $^{135}\text{I}$  по линии с  $E = 547$  кэВ и  $^{135m}\text{Xe}$  (527 кэВ) статистическая точность довольно низкая (см. рис. 3). Для пары  $^{90m,g}\text{Rb}$  (см. рис. 1) при идентификации распада  $^{90g}\text{Rb}$  (832 кэВ) необходимо учесть подпитку за счет распада  $^{90m}\text{Rb}$  (1375 кэВ). Для этого из суммарной площади пика  $\gamma$ -перехода с энергией 832 кэВ вычиталась площадь, которая соответствует распаду  $^{90m}\text{Rb}$ . Она была определена методом пропорций из площади пика  $\gamma$ -кванта с энергией 1375 кэВ, который соответствует только распаду  $^{90m}\text{Rb}$ .

Отметим, что активность  $^{241}\text{Am}$  составила  $1,1 \cdot 10^{11}$  Бк, следовательно для снижения мертвого времени спектрометрического тракта приходи-

дов. Это обстоятельство усложняло  $\gamma$ -спектр и его анализ.

Характерные фрагменты  $\gamma$ -спектров продуктов фотоделения  $^{241}\text{Am}$  и  $^{233}\text{U}$  приведены на рис. 2 и 3.

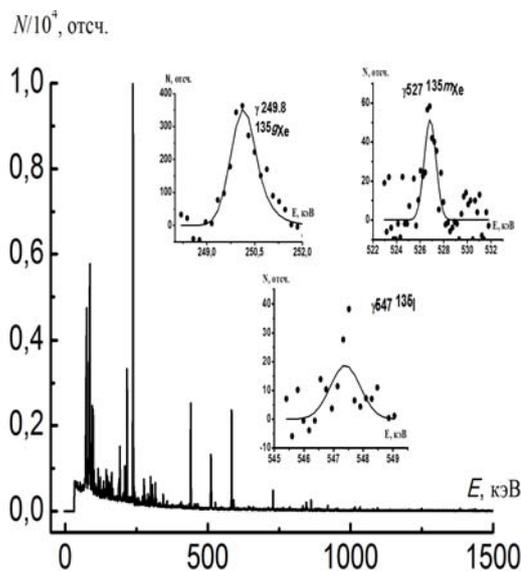


Рис. 3. Фрагменты спектра фотоделения  $^{233}\text{U}$  ( $E_{\text{гр}} = 17$  МэВ).

лось использовать фильтры, частично уменьшающие интенсивность  $\gamma$ -переходов в низкоэнергетической области. Из-за этого мы не могли использовать внешние источники для калибровки спектрометров по эффективности регистрации  $\gamma$ -квантов. Для калибровки спектрометров по эффективности регистрации использовались, в частности, как собственные  $\gamma$ -переходы после  $\alpha$ -распада  $^{241}\text{Am}$ , так и  $\gamma$ -переходы из распада осколков деления, в частности  $^{138}\text{Cs}$ . Это несколько ухудшило качество кривой эффективности регистрации  $\gamma$ -квантов. В области до 400 кэВ, параметры калибровочной кривой определялись с погрешностью до 10 %, а выше - 5 % (рис. 4).

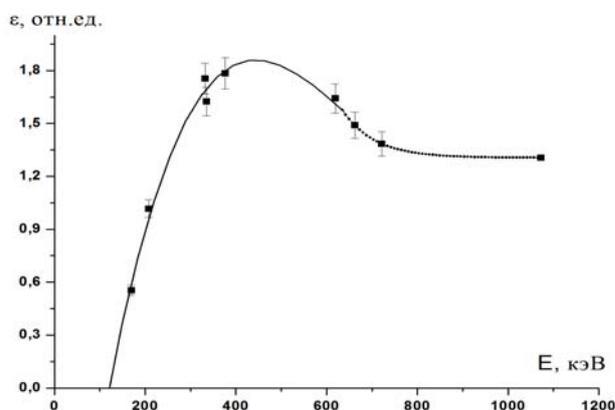


Рис. 4. Зависимость эффективности регистрации  $\gamma$ -квантов от энергии для  $^{241}\text{Am}$ .

При измерении изомерных отношений для  $^{233}\text{U}$  эта проблема отсутствовала, однако масса

мишени составляла несколько микрограмм и поэтому для отдельных  $\gamma$ -переходов статистическая точность была довольно низкая.

Полученные значения изомерных отношений выходов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Изомерные отношения выходов

$E_{гр}$ , МэВ	10,5 МэВ	17 МэВ	9,8 МэВ
Нуклид	$^{233}\text{U}$		$^{241}\text{Am}$
Изомерная пара	$Y_m/Y_g$		
$^{90m,g}\text{Rb}$	0,9(3)	0,7(3)	1,1(3)
$^{133m,g}\text{Te}$	3,2(8)	3,2(9)	1,6(2)
$^{134m,g}\text{I}$	1,33(14)	1,8(5)	3,0(5)
$^{135m,g}\text{Xe}$	0,14(2)	0,38(4)	0,18(1)

### Обсуждение

Для расчета средних угловых моментов осколков деления по экспериментально определенным значениям ИОВ применялся программный пакет TALYS 1.4 [15]. При этом используется статистический механизм, основанный на теории Хаузера - Фешбаха, в котором учитывается конкуренция каналов вылета нейтронов и легких частиц, деление ядра, рассматриваются полные

$\gamma$ -каскады во всех остаточных ядрах. Это позволяет анализировать ядерно-физические характеристики не только конечных фрагментов деления после вылета нейтронов, но и осколков, образующихся сразу после процесса деления (до вылета из них всех нейтронов).

Для получения однозначного соответствия между средним угловым моментом  $\bar{J}$  первичного ядра-фрагмента и изомерным отношением ядра-осколка после вылета всех мгновенных нейтронов необходимо иметь информацию о суммарной энергии возбуждения первичных фрагментов деления; распределении этой энергии между фрагментами; функции распределения заселенности состояний с заданным значением квантового числа  $J$ , которое определяет квадрат полного углового момента  $\hbar^2 J(J+1)$  первичного ядра-фрагмента в изучаемом канале деления и относительный выход осколков из первичных фрагментов изобарной цепи, из которых после вылета мгновенных нейтронов образуется исследуемое ядро в основном и изомерном состояниях.

Расчет суммарной энергии возбуждения  $\langle E_{tot}^* \rangle$  проводим согласно [9, 10]:

$$\langle E_{tot}^* \rangle = a \cdot T_m^2,$$

$$T_m = \frac{2}{3} \cdot \frac{\bar{v}_p}{a} + \left[ \left( \frac{2}{3} \cdot \frac{\bar{v}_p}{a} \right)^2 + \frac{(\bar{v}_p \cdot \langle S_n \rangle + \langle E_\gamma^{tot} \rangle)}{a} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где  $a = \frac{A}{7}$ ,  $\langle S_n \rangle = \langle E_\gamma^{tot} \rangle = 7,4$  МэВ;  $\bar{v}_p$  – средняя множественность по нейтронам;  $T_m$  – температура делящегося ядра;  $\langle S_n \rangle$  – средняя энергия отделения нейтрона для осколков деления;  $\langle E_\gamma^{tot} \rangle$  – средняя общая энергия, уносимая мгновенными  $\gamma$ -квантами;  $a$  – параметр плотности уровней ядра.

Значение  $\bar{v}_p$  рассчитывалось для  $^{233}\text{U}$  и  $^{241}\text{Am}$  по формуле [17]

$$\bar{v}_p = 1,862 + 0,123 \cdot E_{cp}. \quad (2)$$

В случае распада с образованием компаунд-ядра можно считать, что осколки находятся в термодинамическом равновесии и имеют одинаковую температуру  $T_i$ , как и температуру  $T_m$ .

Используя соотношение (1), получим, что энергии возбуждения  $\langle E_i^* \rangle = a \cdot T_i^2$  фрагментов деления распределяются пропорционально их массам:

$$\langle E_1^* \rangle / \langle E_2^* \rangle = A_1 / A_2,$$

$$\langle E_1^* \rangle + \langle E_2^* \rangle = \langle E_{tot}^* \rangle, \quad (3)$$

где  $\langle E_1^* \rangle$ ,  $\langle E_2^* \rangle$ ,  $A_1$ ,  $A_2$  – энергии возбуждения и массовые числа фрагментов деления.

Распределение угловых моментов использовалось в качестве входного параметра и определяло значения изомерных отношений выходов. При этом во входном файле TALYS задавались значения энергии возбуждения фрагмента деления, а заселенность состояния с данным значением углового момента  $J$  считалась постоянной. При этом предполагалось, что заселяются состояния с одним  $J$ . Последовательно перебирались значения от 0,5 до 15,5 для нечетных ядер и от 1 до 16 для четно-четных и нечетно-нечетных ядер с шагом 1 в обоих случаях. Максимальное значение  $J$  определялось значением ИОВ. Для расчета ИОВ использован упрощенный статистический подход, который рассмотрим на примере  $^{135m,g}\text{Xe}$  при фотоделении  $^{233}\text{U}$  при  $E_{гр} = 17$  МэВ [11]:

согласно формуле (2)  $\bar{\nu}_p = 3,953$  и суммарная энергия возбуждения  $\langle E_{tot}^* \rangle = 42,6$  МэВ из формулы (1). Из формулы (3) для пары  $A_1 = 135$ ,  $A_2 = 98$  энергия возбуждения  $^{135}\text{Xe}$   $E^* = 24,7$  МэВ. Но при  $\bar{\nu}_p = 3,953$  ядро  $^{135m,g}\text{Xe}$  с большой вероятностью может образоваться также из  $^{136}\text{Xe}$ ,  $^{137}\text{Xe}$  и  $^{138}\text{Xe}$  после испарения из этих изотопов одного, двух и трех нейтронов соответственно. Поэтому расчет энергии возбуждения проводится также и для изотопов  $^{136-138}\text{Xe}$ . Согласно формуле (3) для пары  $A_1 = 136$ ,  $A_2 = 97$  энергия возбуждения  $^{136}\text{Xe}$   $E^* = 24,9$  МэВ; для пары  $A_1 = 137$ ,  $A_2 = 96$  энергия возбуждения  $^{137}\text{Xe}$   $E^* = 25,1$  МэВ и для пары  $A_1 = 138$ ,  $A_2 = 95$  энергия возбуждения  $^{138}\text{Xe}$   $E^* = 25,2$  МэВ;

для  $^{135}\text{Xe}$  при  $E^* = 24,7$  МэВ вычислялись заселенности основного и изомерного состояний и далее по программе TALYS 1.4 моделировалась зависимость изомерных отношений выходов для  $^{135m,g}\text{Xe}$  от углового момента  $J$ , начальных состояний и вероятности заселенности  $P(J)$ . В результате моделирования также рассчитывалась вероятность заселения  $P(J)$  для определенных значений ИОВ. Из построенной зависимости определялся угловой момент  $J$  и вероятность заселения  $P(J)$ , при которых теоретическое значение изомерного отношения выходов совпадало с экспериментальным. В данном эксперименте ИОВ с наибольшей вероятностью формируется в результате реакций  $(f, \gamma)$ ,  $(f, n\gamma)$ ,  $(f, 2n\gamma)$ , и  $(f, 3n\gamma)$ . Экспериментальные значения отношений заселенностей метастабильного и основного состояний  $^{135}\text{Xe}$  для каждой пары из упомянутых реакций точно не известны. Однако если считать, что

при делении выход ядер-фрагментов изобарной цепи примерно одинаков, а заселенности изомерного и основного состояний формируются распадом состояний в узкой области энергий вблизи энергии отделения нейтрона и отношение заселенности слабо зависит от энергии возбуждения [16], то отношения заселенностей из упомянутых реакций можно считать одинаковыми. Поэтому здесь и ниже в качестве экспериментальных значений ИОВ для разных каналов их формирования используются значения из табл. 2; аналогичные значения  $J$  и  $P(J)$  находились также для  $^{136}\text{Xe}$  при  $E^* = 24,9$  МэВ,  $^{137}\text{Xe}$  при  $E^* = 25,1$  МэВ и для  $^{138}\text{Xe}$  при  $E^* = 25,2$  МэВ:  $J = J_\alpha$ ,  $P(J_\alpha) \equiv P_\alpha$ ,  $\alpha = 136, 137, 138$ ;

после этого определялся средний угловой момент данного фрагмента деления:

$$\bar{J} = \frac{\sum_{\alpha} J_{\alpha} P(J_{\alpha})}{\sum_{\alpha} P(J_{\alpha})}, \quad \alpha = 136 \div 138, \quad \Delta\alpha = 1, \quad (4)$$

т.е в формуле (4) для расчета среднего углового момента для  $^{135}\text{Xe}$  суммируются четыре пары значений  $J_{\alpha}$  и  $P(J_{\alpha})$ , взятые из четырех вышеупомянутых зависимостей, при которых теоретические значения ИОВ для  $^{135}\text{Xe}$  совпадают с экспериментальными.

Подобные расчеты проводились для других фрагментов деления. Значения  $\bar{J}$ , извлеченные из экспериментальных величин ИОВ для различных осколков, приведены в табл. 3. В таблице указаны лишь статистические погрешности, соответствующие погрешностям экспериментальных значений ИОВ.

Таблица 3. Средние угловые моменты ( $\bar{J}$ )

Изомерная пара	$^{233}_{92}\text{U}$		$^{235}_{92}\text{U}$ [11]	$^{237}_{93}\text{Np}$ [12]		$^{243}_{95}\text{Am}$	
	10,5 МэВ	17 МэВ	9,6 МэВ	9,8 МэВ	17 МэВ	9,8 МэВ	17 МэВ [12]
$^{90m,g}_{37}\text{Rb}$	2,2(3)	2,0(3)	1,5(2)	1,5(3)	2,5(3)	2,5(3)	2,0(3)
$^{133m,g}_{52}\text{Te}$	6,6(8)	6,6(8)	6,5(5)	6,8(8)	6,8(18)	6,2(12)	5,1(12)
$^{134m,g}_{53}\text{I}$	8,2(3)	8,4(4)	6,9(1)	8,8(2)	8,7(2)	8,8(3)	8,2(2)
$^{135m,g}_{54}\text{Xe}$	2,4(1)	3,5(1)	2,4(1)	2,9(1)	4,2(1)	2,9(1)	4,5(1)

В таблице приведены величины  $\bar{J}$  для изучавшихся ядер и для сравнения приведены данные о фотоделении  $^{235}\text{U}$  тормозными  $\gamma$ -квантами с граничной энергией 9,6 МэВ [11],  $^{237}\text{Np}$   $\gamma$ -квантами с граничной энергией 9,8 и 17 МэВ и  $^{241}\text{Am}$   $\gamma$ -квантами с граничной энергией 17 МэВ [12]. С учетом погрешности измерений не наблюдается значительных изменений в  $\bar{J}$  для легкого осколка  $^{90}\text{Rb}$  как из четных по  $Z$  делящих систем, так и из нечетных. Мы отмечаем уменьшение  $\bar{J}$  для  $^{135}\text{Xe}$  при уменьшении величины максималь-

ной энергии тормозных  $\gamma$ -квантов при облучении ядер  $^{233}\text{U}$ ,  $^{237}\text{Np}$  и  $^{241}\text{Am}$ . Уменьшение энергии  $E_{\text{гр}}$  на 6,5 или 7,2 МэВ на фоне 200 МэВ, которая выделяется в процессе деления вряд ли влияет на изменение  $\bar{J}$ . Более вероятным фактором является то, что при энергии 17 МэВ доминирующим является фотоделение после вылета быстрого нейтрона ( $\gamma, n\bar{f}$ ). В этом случае доминирует фотоделение на нечетно-нечетных ядрах  $^{236}\text{Np}$ ,  $^{240}\text{Am}$  и четно-четных нуклидах  $^{232}\text{U}$ . Возможно, это указывает на большую роль нечетно-нечетных и чет-

но-четных эффектов в делящихся системах с образованием  $^{135}\text{Xe}$ . В то же время совершенно иное поведение величин  $\bar{J}$  для ядер  $^{133}\text{Te}$  и  $^{134}\text{I}$ , хотя число нейтронов в них  $N = 81$ , как и для  $^{135}\text{Xe}$ . В пределах погрешности измерений величины  $\bar{J}$  слабо зависят как от изменения  $N$  и  $Z$  в делящихся системах, так и от энергии тормозных  $\gamma$ -квантов. Возможно, что в этом случае большую роль играет то, что легкий осколок деления, который вылетает вместе с  $^{133}\text{Te}$  или  $^{134}\text{I}$ , находится по  $Z$  в граничной области вблизи  $Z = 40$ . Величина  $Z$  для  $^{135}\text{Xe}$  находится ниже полумагического значения  $Z = 40$  за исключением  $^{241}\text{Am}$ , а для  $^{133}\text{Te}$  и  $^{134}\text{I}$  – выше, за исключением  $^{233}\text{U}$ . Это приводит к изменению плотности низкоспиновых состояний с конфигурациями  $p_{3/2}$  и  $p_{1/2}$  по сравнению с высокоспиновыми состояниями, которые описываются конфигурацией  $g_{9/2}$ , что в свою очередь ведет к изменению ИОВ и  $\bar{J}$ .

Для более детальных выводов необходимо дальнейшее получение информации о фотоделении трансурановых нуклидов как выше, так и

ниже порога реакции ( $\gamma, n\bar{f}$ ) и уточнение величин  $\bar{J}$  для ядер вблизи  $^{132}\text{Sn}^{82}$ .

### Заключение

Проведены измерения изомерных отношений выходов и определены средние угловые моменты для легких и тяжелых осколков при фотоделении  $^{233}\text{U}$  и  $^{241}\text{Am}$  тормозными  $\gamma$ -квантами с граничной энергией 9,8, 10,5 и 17 МэВ. Наблюдается влияние четно-четных и нечетно-нечетных эффектов в делящихся системах.

Представляет большой интерес продолжение измерений изомерных отношений выходов фрагментов деления при энергиях тормозных  $\gamma$ -квантов в области энергий как выше, так и ниже порога реакции ( $\gamma, n\bar{f}$ ) для других трансурановых нуклидов и повышение точности определения величин  $\bar{J}$  в исследуемых ядрах.

Авторы выражают благодарность В. А. Плюйко за многочисленные обсуждения и ценные замечания.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Naik H., Dange S. P., Singh R. J. Angular momentum of fission fragments in low energy fission of actinides // Phys. Rev. - 2005. - Vol. C71. - P. 014304.
2. Бесшейко О.А., Желтоножский В.А., Каденко И.Н., Стрильчук Н.В. Измерение изомерных отношений в продуктах фотоделения  $^{232}\text{Th}$  // 36. наук. праць Ін-ту ядерних досл. - 2002. - № 2(8). - С. 46 - 50.
3. Вишневецкий И.Н., Желтоножский В.А., Давидовская О.И., Саврасов А.Н. Исследование фотоделения  $^{232}\text{Th}$  и  $^{238}\text{U}$  // Изв. РАН. Сер. физ. - 2009. - Т. 73, № 6. - С. 782 - 785.
4. Thierens H., De Frenne D., Jacobs E. et al. Product yields for the photofission of  $^{235}\text{U}$  and  $^{238}\text{U}$  with 25-MeV bremsstrahlung // Phys. Rev. - 1976. - Vol. C14, No. 3. - P. 1058 - 1067.
5. Jacobs E., Thierens H., De Frenne D. et al. Product yields for the photofission of  $^{238}\text{U}$  with 12-, 15-, 20-, 30-, and 70-MeV bremsstrahlung // Phys. Rev. - 1979. - Vol. C19, No. 2. - P. 422 - 432.
6. Jacobs E., Thierens H., De Frenne D. et al. Product yields for the photofission of  $^{235}\text{U}$  with 12-, 15-, 20-, 30-, and 70-MeV bremsstrahlung // Phys. Rev. - 1980. - Vol. C21, No. 1. - P. 237 - 245.
7. Thierens H., Proot B., De Frenne D., Jacobs E. Independent isomeric yield ratio of  $^{134}\text{I}$  in the photofission of  $^{235}\text{U}$  and  $^{238}\text{U}$  // Phys. Rev. - 1982. - Vol. C25, No. 3. - P. 1546 - 1550.
8. De Frenne D., Proot B., Thierens H. et al. Independent isomeric yield ratios and primary angular momenta in the photofission of  $^{235,238}\text{U}$  with 12 - 30-MeV bremsstrahlung // Phys. Rev. - 1984. - Vol. C29, No. 5. - P. 1777 - 1783.
9. Бесшейко О.А., Вишневецкий И.Н., Желтоножский В.А. и др. Изучение изомерных отношений на ядрах-продуктах фотоделения  $^{238}\text{U}$  и  $^{237}\text{Np}$  // 36. наук. праць Ін-ту ядерних досл. - 2004. - № 2(13). - С. 17 - 23.
10. Бесшейко О.А., Вишневецкий И.Н., Желтоножский В.А. и др. Изомерные отношения и средние угловые моменты для продуктов фотоделения  $^{238}\text{U}$  и  $^{237}\text{Np}$  // Изв. РАН. Сер. физ. - 2005. - Т. 69, № 5. - С. 658 - 662.
11. Вишневецкий И.Н., Желтоножский В.А., Давидовская О.И., Саврасов А.Н. Исследование фотоделения  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$  // Изв. РАН. Сер. физ. - 2010. - Т. 74, № 4. - С. 538 - 541.
12. Вишневецкий И.Н., Желтоножский В.А., Саврасов А.Н. Исследование фотоделения  $^{237}\text{Np}$  и  $^{241}\text{Am}$  // Изв. РАН. Сер. физ. - 2012. - Т. 76, № 8. - С. 1017 - 1020.
13. Вишневецкий И.Н., Желтоножский В.А., Решицько С.П. Измерение изомерных отношений в ядрах-продуктах деления  $^{232}\text{Th}$  // Изв. РАН. Сер. физ. - 1997. - Т. 61, № 1. - С. 102 - 105.
14. Хоменков В.П. Дослідження атомно-ядерних ефектів в процесі внутрішньої конверсії гамма-променів: Автореф. дис. ... канд. фіз.-мат. наук. - К., 2003. - 19 с.
15. Koning A.J., Hilaire S., Duijvestijn M.C. TALYS: Comprehensive Nuclear Reaction Modeling // Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology (Santa Fe, USA) // AIP Conference Proceedings. - 2004. - P. 1154 - 1159.
16. Vyshnevskiy I.M., Zheltonozhskii V.O., Savrasov A.M. et al. Isomer yield ratios of  $^{133}\text{Te}$ ,  $^{134}\text{I}$ ,  $^{135}\text{Xe}$  in photofission of  $^{235}\text{U}$  with 17 MeV bremsstrahlung // Nucl. Phys. At. Energy. - 2014. - Vol. 15, No. 2. - С. 102 - 105.
17. Caldwell J.T., Dowdy E. J., Alvarez R. et al. Experimental Determination of Photofission Neutron Multiplicities for  $^{235}\text{U}$ ,  $^{236}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ , and  $^{232}\text{Th}$  Using Monoenergetic Photons // Nuclear Science and Engineering. - 1980. - Vol. 73, No. 1. - P. 153 - 163.
18. Madland D.G. Theory of Neutron Emission in Fission // Proc. Workshop ICTP (Trieste, Italy, 23 Feb - 27 March, 1998). - Singapore: World Sci., 1999. - P. 46 - 56.

**І. М. Вишневський, В. О. Желтоножський, А. М. Саврасов, Є. П. Ровенських**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

**ДОСЛІДЖЕННЯ ФРАГМЕНТІВ ФОТОПОДІЛУ  $^{233}\text{U}$  І  $^{241}\text{Am}$**

Виміряно ізомерні відношення виходів ізомерних пар ядер  $^{90}\text{Rb}$ ,  $^{133}\text{Te}$ ,  $^{134}\text{I}$  і  $^{135}\text{Xe}$ , утворених у результаті фотоподілу  $^{233}\text{U}$  гальмівними  $\gamma$ -квантами з величиною граничної енергії 10,5 і 17 МеВ і  $^{241}\text{Am}$   $\gamma$ -квантами з величиною граничної енергії 9,8 МеВ. Ізомерні відношення розраховувались з урахуванням внеску від розпаду ізобарних ядер у виходи досліджуваних ізотопів. Визначено середні кутові моменти досліджуваних уламків поділу в рамках статистичної моделі розпаду.

*Ключові слова:* фотоподіл, ізомерні відношення виходів, активаційна методика, обчислення в TALYS.

**I. M. Vyshnevskiy, V. O. Zheltonozhskiy, A. M. Savrasov, E. P. Rovenskykh**

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

**INVESTIGATION OF  $^{233}\text{U}$  AND  $^{241}\text{Am}$  PHOTOFISSION FRAGMENTS**

Isomeric yield ratios of  $^{90}\text{Rb}$ ,  $^{133}\text{Te}$ ,  $^{134}\text{I}$  and  $^{135}\text{Xe}$  fission fragments have been measured. Fragments have been created in photofission of  $^{233}\text{U}$  nuclei by bremsstrahlung photons with end-point energy near 10.5 and 17 MeV and of  $^{241}\text{Am}$  nuclei irradiated by bremsstrahlung photons with end-point energy near 9.8 MeV. Experimental values of isomeric yield ratios have been calculated with allowing for the contribution from beta-decay of isobaric nuclei in yields of investigated isotopes. Average angular moments of investigated fission fragments have been determined using the statistical model of decay.

*Keywords:* photofission, isomeric yields ratios, activation method, TALYS calculations.

REFERENCES

1. Naik H., Dange S. P., Singh R. J. Angular momentum of fission fragments in low energy fission of actinides // *Phys. Rev.* - 2005. - Vol. C71. - P. 014304.
2. Bezsheyko O.A., Zheltonozhskiy V.A., Kadenko I.N., Strilchuk N.V. Measurement of isomeric ratios in  $^{232}\text{Th}$  photofission products // *Zb. nauk. prats' In-tu yadernykh dosl.* - 2002. - No. 2(8). - P. 46 - 50. (Rus)
3. Vyshnevskiy I.N., Zheltonozhskiy V.A., Davidovskaya O.I., Savrasov A.N. // *Izv. RAN. Ser. fiz.* - 2009. - Vol. 73, No. 6. - P. 782 - 785. (Rus)
4. Thierens H., De Frenne D., Jacobs E. et al. Product yields for the photofission of  $^{235}\text{U}$  and  $^{238}\text{U}$  with 25-MeV bremsstrahlung // *Phys. Rev.* - 1976. - Vol. C14, No. 3. - P. 1058 - 1067.
5. Jacobs E., Thierens H., De Frenne D. et al. Product yields for the photofission of  $^{238}\text{U}$  with 12-, 15-, 20-, 30-, and 70-MeV bremsstrahlung // *Phys. Rev.* - 1979. - Vol. C19, No. 2. - P. 422 - 432.
6. Jacobs E., Thierens H., De Frenne D. et al. Product yields for the photofission of  $^{235}\text{U}$  with 12-, 15-, 20-, 30-, and 70-MeV bremsstrahlung // *Phys. Rev.* - 1980. - Vol. C21, No. 1. - P. 237 - 245.
7. Thierens H., Proot B., De Frenne D., Jacobs E. Independent isomeric yield ratio of  $^{134}\text{I}$  in the photofission of  $^{235}\text{U}$  and  $^{238}\text{U}$  // *Phys. Rev.* - 1982. - Vol. C25, No. 3. - P. 1546 - 1550.
8. De Frenne D., Proot B., Thierens H. et al. Independent isomeric yield ratios and primary angular momenta in the photofission of  $^{235,238}\text{U}$  with 12 - 30-MeV bremsstrahlung // *Phys. Rev.* - 1984. - Vol. C29, No. 5. - P. 1777 - 1783.
9. Bezshyyko O.A., Vyshnevskiy I.N., Zheltonozhskiy V.A. et al. Isomeric ratio study of photofission fragments of  $^{238}\text{U}$  and  $^{237}\text{Np}$  // *Zb. nauk. prats' In-tu yadernykh dosl.* - 2004. - No. 2(13). - P. 17 - 23. (Rus)
10. Besshejko O.A., Vyshnevskiy I.N., Zheltonozhskiy V.A. et al. // *Izv. RAN. Ser. fiz.* - 2005. - Vol. 69, No. 5. - P. 658 - 662. (Rus)
11. Vyshnevskiy I.N., Zheltonozhskiy V.A., Davidovskaya O.I., Savrasov A.N. // *Izv. RAN. Ser. fiz.* - 2010. - Vol. 74, No. 4. - P. 538 - 541. (Rus)
12. Vyshnevskiy I.N., Zheltonozhskiy V.A., Savrasov A.N. // *Izv. RAN. Ser. fiz.* - 2012. - Vol. 76, No. 8. - P. 1017 - 1020. (Rus)
13. Vishnevskiy I.N., Zheltonozhskiy V.A., Reshit'ko S.P. // *Izv. RAN. Ser. fiz.* - 1997. - Vol. 61, No. 1. - P. 102 - 105. (Rus)
14. Khomenkov V.P. Research of atomic and nuclear effects in the gamma rays internal conversion: Avtoref. dys. ... kand. fiz.-mat. nauk. - K., 2003. - 19 p. (Ukr)
15. Koning A.J., Hilaire S., Duijvestijn M.C. TALYS: Comprehensive Nuclear Reaction Modeling // *Proc. Int. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology (Santa Fe, USA)* // *AIP Conference Proceedings.* - 2004. - P. 1154 - 1159.
16. Vyshnevskiy I.M., Zheltonozhskiy V.O., Savrasov A.M. et al. Isomer yield ratios of  $^{133}\text{Te}$ ,  $^{134}\text{I}$ ,  $^{135}\text{Xe}$  in photofission of  $^{235}\text{U}$  with 17 MeV bremsstrahlung // *Nucl. Phys. At. Energy.* - 2014. - Vol. 15, No. 2. - C. 102 - 105.
17. Caldwell J.T., Dowdy E. J., Alvarez R. et al. Experimental Determination of Photofission Neutron Multiplicities for  $^{235}\text{U}$ ,  $^{236}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ , and  $^{232}\text{Th}$  Using Monoenergetic Photons // *Nuclear Science and Engineering.* - 1980. - Vol. 73, No. 1. - P. 153 - 163.
18. Madland D.G. Theory of Neutron Emission in Fission // *Proc. Workshop ICTP (Trieste, Italy, 23 Feb - 27 March, 1998).* - Singapore: World Sci., 1999. - P. 46 - 56.

Надійшла 08.05.2014

Received 08.05.2014