

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

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

ИССЛЕДОВАНИЕ ФРАГМЕНТОВ ФОТОДЕЛЕНИЯ ^{233}U И ^{241}Am

Измерены изомерные отношения выходов ядер ^{90}Rb , ^{133}Te , ^{134}I и ^{135}Xe , образованных в результате фотоделения ^{233}U тормозными γ -квантами с граничной энергией 10,5 и 17 МэВ и ^{241}Am γ -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 γ -квантов относительно выделенных направлений; изучение угловых распределений фрагментов деления; исследование множественности γ -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 σ_h/σ_l , где σ_h , σ_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 σ_h/σ_l получена в (n , f)-делении [1]. Что касается фотоделения, то, например, изучались изомерные отношения выходов и средние угловые моменты J осколков для ^{232}Th , $^{235,238}\text{U}$ [2 - 9]. С трансурановых нуклидов данным методом исследовалось фотоделение ^{237}Np , ^{239}Pu и ^{241}Am [10 - 12]. Фотоделение ^{241}Am проводилось γ -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 γ -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}U для реакций $(\gamma, f) + (\gamma, \eta f)$, ^{241}Am в области ниже порога реакции $(\gamma, \eta f)$ 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}Am и ^{233}U . Облучение мишени с ^{233}U проводилось γ -квантами тормозного спектра электронов микротрона М-30 с энергией 17 и 10,5 МэВ, а мишени с ^{241}Am – тормозными γ -квантами от электронов с энергией 9,8 МэВ. Граничные энергии тормозных γ -квантов 9,8 и 10,5 МэВ выбраны с целью исключения как (γ , n)-канала, который открывается при $E_{\text{тр}} > 11$ МэВ, так и (γ , 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 γ -линии 1332 кэВ ^{60}Co . Для обработки спектров применялся пакет программ Winspectrum [14]. При описании серии γ -пиков, которые на-

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

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

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

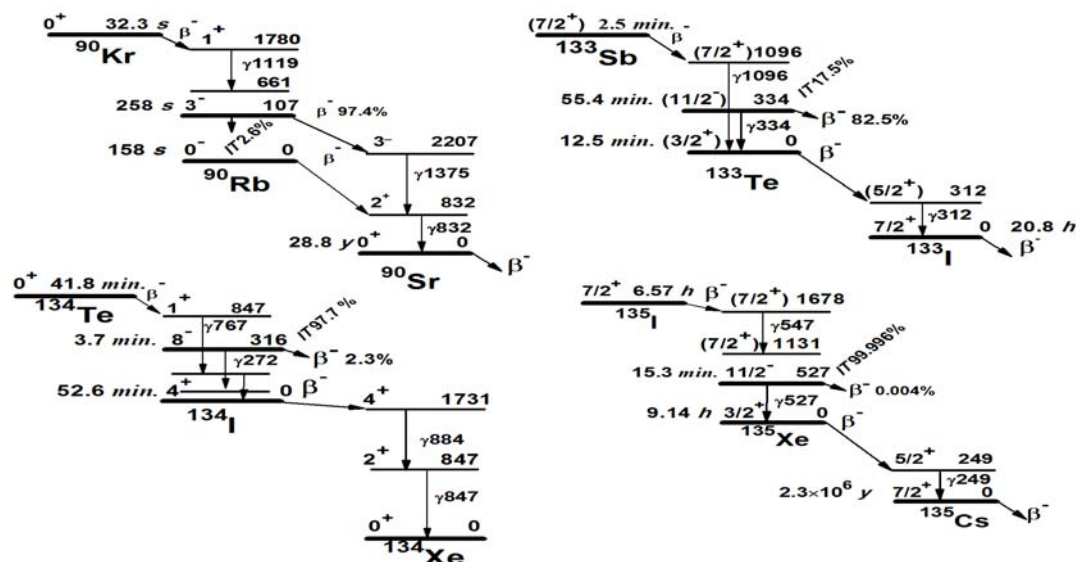


Рис. 1. Фрагменты схем распада исследуемых изомерных пар.

Таблица 1. Спектроскопические характеристики ядер

Нуклид	$T_{1/2}$	J^π	E^* , кэВ	E , кэВ	f , %
^{90}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}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}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}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 γ -квантов, которые сопровождают распад нуклидов и их квантовые выходы соответственно.

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

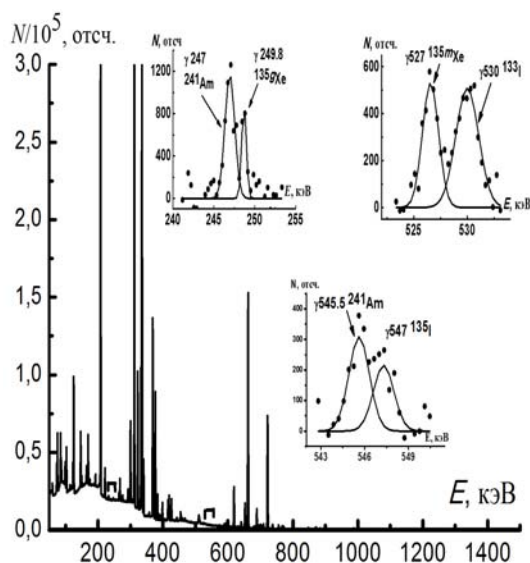


Рис. 2. Фрагменты спектра фотоделения ^{241}Am .

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

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

дов. Это обстоятельство усложняло γ -спектр и его анализ.

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

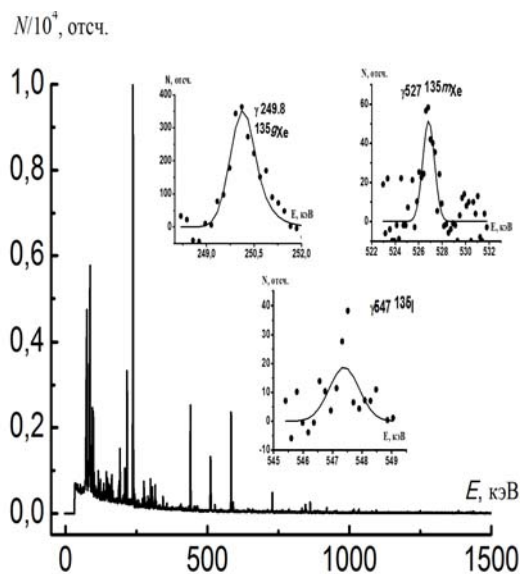


Рис. 3. Фрагменты спектра фотоделения ^{233}U ($E_{\text{гр}} = 17$ МэВ).

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

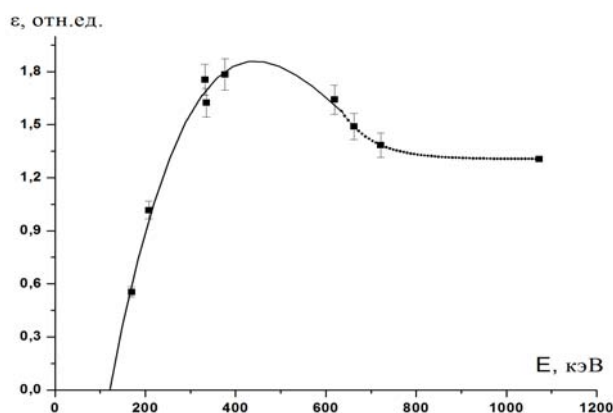


Рис. 4. Зависимость эффективности регистрации γ -квантов от энергии для ^{241}Am .

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

мишени составляла несколько микрограмм и поэтому для отдельных γ -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}U		^{241}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

γ -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 γ -квантами; a – параметр плотности уровней ядра.

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

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

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}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}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}Xe , ^{137}Xe и ^{138}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}Xe $E^* = 24,9$ МэВ; для пары $A_1 = 137$, $A_2 = 96$ энергия возбуждения ^{137}Xe $E^* = 25,1$ МэВ и для пары $A_1 = 138$, $A_2 = 95$ энергия возбуждения ^{138}Xe $E^* = 25,2$ МэВ;

для ^{135}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, γ) , $(f, n\gamma)$, $(f, 2n\gamma)$, и $(f, 3n\gamma)$. Экспериментальные значения отношений заселенностей метастабильного и основного состояний ^{135}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}Xe при $E^* = 24,9$ МэВ, ^{137}Xe при $E^* = 25,1$ МэВ и для ^{138}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}Xe суммируются четыре пары значений J_{α} и $P(J_{\alpha})$, взятые из четырех вышеупомянутых зависимостей, при которых теоретические значения ИОВ для ^{135}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}U тормозными γ -квантами с граничной энергией 9,6 МэВ [11], ^{237}Np γ -квантами с граничной энергией 9,8 и 17 МэВ и ^{241}Am γ -квантами с граничной энергией 17 МэВ [12]. С учетом погрешности измерений не наблюдается значительных изменений в \bar{J} для легкого осколка ^{90}Rb как из четных по Z делящих систем, так и из нечетных. Мы отмечаем уменьшение \bar{J} для ^{135}Xe при уменьшении величины максималь-

ной энергии тормозных γ -квантов при облучении ядер ^{233}U , ^{237}Np и ^{241}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}Np , ^{240}Am и четно-четных нуклидах ^{232}U . Возможно, это указывает на большую роль нечетно-нечетных и чет-

но-четных эффектов в делящихся системах с образованием ^{135}Xe . В то же время совершенно иное поведение величин \bar{J} для ядер ^{133}Te и ^{134}I , хотя число нейтронов в них $N = 81$, как и для ^{135}Xe . В пределах погрешности измерений величины \bar{J} слабо зависят как от изменения N и Z в делящихся системах, так и от энергии тормозных γ -квантов. Возможно, что в этом случае большую роль играет то, что легкий осколок деления, который вылетает вместе с ^{133}Te или ^{134}I , находится по Z в граничной области вблизи $Z = 40$. Величина Z для ^{135}Xe находится ниже полумагического значения $Z = 40$ за исключением ^{241}Am , а для ^{133}Te и ^{134}I – выше, за исключением ^{233}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}U и ^{241}Am тормозными γ -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 γ -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}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}Th и ^{238}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}U and ^{238}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}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}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}I in the photofission of ^{235}U and ^{238}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}U и ^{237}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}U и ^{237}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}U и ^{239}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}Np и ^{241}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}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}Te , ^{134}I , ^{135}Xe in photofission of ^{235}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}U , ^{236}U , ^{238}U , and ^{232}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}U І ^{241}Am

Виміряно ізомерні відношення виходів ізомерних пар ядер ^{90}Rb , ^{133}Te , ^{134}I і ^{135}Xe , утворених у результаті фотоподілу ^{233}U гальмівними γ -квантами з величиною граничної енергії 10,5 і 17 МеВ і ^{241}Am γ -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}U AND ^{241}Am PHOTOFISSION FRAGMENTS

Isomeric yield ratios of ^{90}Rb , ^{133}Te , ^{134}I and ^{135}Xe fission fragments have been measured. Fragments have been created in photofission of ^{233}U nuclei by bremsstrahlung photons with end-point energy near 10.5 and 17 MeV and of ^{241}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}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}U and ^{238}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}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}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}I in the photofission of ^{235}U and ^{238}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}U and ^{237}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}Te , ^{134}I , ^{135}Xe in photofission of ^{235}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}U , ^{236}U , ^{238}U , and ^{232}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