

ИЗОМЕРНЫЕ ОТНОШЕНИЯ ПРОДУКТОВ ФОТОЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ НА ЕСТЕСТВЕННОЙ СМЕСИ ИЗОТОПОВ СЕРЕБРА

© 2015 г. С. С. Белышев¹⁾, Б. С. Ишханов^{1),2)},
А. А. Кузнецов²⁾*, А. А. Мартынов¹⁾, К. А. Стопани²⁾

Поступила в редакцию 30.03.2015 г.

Активационным методом исследуются фотоядерные реакции на естественной смеси изотопов серебра при энергии электронов ускорителя 55 МэВ. Получены выходы фотоядерных реакций с вылетом до четырех нейтронов. Получены изомерные отношения ^{104}Ag и ^{106}Ag . Полученные изомерные отношения сравниваются с результатами других работ и расчетами по каскадно-испарительной модели.

DOI: 10.7868/S0044002715100037

1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение изомерных состояний атомных ядер позволяет получить информацию о природе возбужденных состояний атомных ядер [1–6]. Явление изомерии атомных ядер связано с большой разницей в спинах или деформации изомерного состояния относительно основного состояния атомного ядра. Вероятность заселения изомера в результате фотоядерных реакций зависит от энергии реакции, орбитального момента вылетевших частиц, момента и четности конечного состояния. Орбитальный момент вылетевших частиц зависит как от их энергии, так и от структуры оболочек в возбужденном ядре. С изомерными состояниями обычно связана система вышележащих уровней с похожей структурой. Поэтому вероятность заселения изомерного состояния зависит также от вероятностей каскадных переходов на него с вышележащих состояний.

Возбужденные состояния ядер часто изучаются во взаимодействиях с пучками реальных фотонов. Использование γ -квантов в качестве пробных частиц имеет ряд преимуществ: возможность изучать ядерные реакции, начиная с порога реакции, при фотопоглощении спектр передаваемых ядру угловых моментов ограничен. Так, для фотопоглощения тяжелых ядер характерно поглощение в основном дипольных γ -квантов.

Измерение выходов фотоядерных реакций и изомерных отношений на изотопах Ag в диапазоне

энергий от 18 до 84 МэВ на пучках тормозного излучения ранее было выполнено в работах [7–16]. В работе [9] проводилось измерение изомерных отношений ^{104}Ag и ^{106}Ag на естественной смеси изотопов при энергиях 45–55 МэВ с тормозной мишенью из вольфрама толщиной 0.1 мм. В работе [16] было измерено изомерное отношение изотопа ^{106}Ag при энергии 50 МэВ. В работах [10, 11] были измерены изомерные отношения изотопа ^{104}Ag при энергиях 33–38.5 МэВ с тормозной мишенью из тантала толщиной 1.05 мм. Отдельно было измерено изомерное отношение в реакции вылета пяти нейтронов на мишени из серебра, обогащенного изотопом ^{109}Ag при энергии 84 МэВ [10]. В работе [8] были измерены изомерные отношения для реакции $^{107}\text{Ag}(\gamma, n)^{106}\text{Ag}$ при энергиях от 14 до 24 МэВ с тормозной мишенью из вольфрама толщиной 0.3 мм. Измерения в этой же области энергий проводились в работах [12] (20 и 30 МэВ), [13] (18 МэВ) и [14] (30 МэВ). При анализе результатов, полученных в вышеперечисленных работах, необходимо учитывать, что они были выполнены на тормозных мишенях из различных материалов и разной толщины. В результате этого тормозные спектры различались, что сказывалось на выходах фотоядерных реакций.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для измерения выходов продуктов фотоядерных реакций на изотопах Ag использовался метод наведенной активности [17, 18]. Эксперимент проводился на пучке тормозных γ -квантов разрезного микротрона РМ-55 НИИЯФ МГУ [19]. Мишень из фольги естественной смеси изотопов серебра (51.839% изотопа ^{107}Ag и 48.161% изотопа ^{109}Ag)

¹⁾Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Россия.

²⁾Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия.

*E-mail: kuznets@depni.sinp.msu.ru

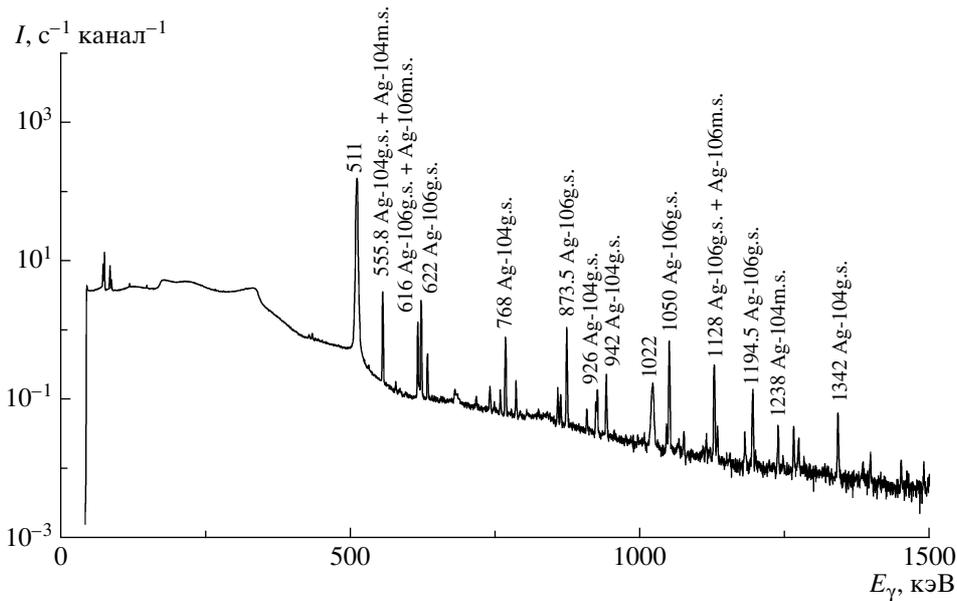


Рис. 1. Спектр γ -квантов $I(E_\gamma)$ от облученного образца Ag, измеренный HPGe-спектрометром через 4 мин после облучения. Время измерения — 2 часа. Надписи над пиками — энергии γ -линий в кэВ и соответствующие им радиоизотопы серебра.

массой 0.1826 г и поверхностной плотностью 0.028 ± 0.001 г/см² облучалась в течение 10 мин пучком γ -квантов тормозного спектра электронов ускорителя с энергией 55 МэВ. Средний ток пучка электронов в процессе облучения составлял 60.4 нА. Для генерации тормозного пучка γ -квантов использовалась мишень из вольфрама толщиной 2.1 мм, которая полностью перекрывала пучок. Вплотную к тормозной мишени располагался монитор из меди — пластинка 40×40 мм поверхностной плотностью 0.321 ± 0.009 г/см². Вплотную к монитору располагалась исследуемая мишень из серебра. Спектр тормозных фотонов рассчитывался по программе GEANT4 [20].

Спектры остаточной активности облученной мишени из Ag измерялись с помощью детектора из сверхчистого германия с эффективностью 30%. Энергетическое разрешение детектора составляло 0.9 кэВ для энергии γ -квантов 122 кэВ и 1.9 кэВ для энергии γ -квантов 1.33 МэВ. Эффективность детектора определялась с помощью калиброванных источников ¹³³Ba, ¹³⁷Cs, ⁶⁰Co, ²⁴¹Am, ¹⁵²Eu и модели детектора, рассчитанной по GEANT4 [20]. Измерение γ -спектров остаточной активности начиналось через 3 мин после окончания облучения. Общая продолжительность измерения γ -спектров наведенной активности мишени составила 30 сут.

3. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

На основе анализа γ -спектров остаточной активности и изменения интенсивности пиков полного поглощения γ -квантов идентифицировались

изотопы, образующиеся в результате фотоядерных реакций, и рассчитывались их выходы. На рис. 1 показан один из измеренных спектров γ -квантов распада радиоизотопов, образовавшихся в облученной мишени Ag.

При энергии облучения 55 МэВ возможны фотоядерные реакции с вылетом до пяти нейтронов. При этом образуются изотопы серебра с массовыми числами от 102 до 108. В табл. 1 представлены реакции, приводящие к образованию данных изотопов, и характеристики основного и изомерного состояний изотопов серебра. В первом столбце перечислены радиоизотопы серебра, образующиеся в мишени из естественной смеси изотопов Ag при облучении тормозным спектром γ -квантов с верхней границей 55 МэВ. Во втором столбце перечислены основные реакции, приводящие к образованию данного изотопа. В третьем и четвертом столбцах приведены спины J , четности P и периоды полураспада $T_{1/2}$ соответственно для основного и изомерного состояний. Большинство изомерных состояний имеют канал радиационного распада в основное состояние. Приведена доля этого канала p в общем числе распадов изомерного состояния.

Наблюдаемые пики в спектре образующихся в фотоядерных реакциях с вылетом нуклонов радионуклидов были идентифицированы и сопоставлены с известными γ -линиями конечных ядер. Исходя из цели нашей работы были определены выходы изотопов ¹⁰⁶Ag и ¹⁰⁴Ag в изомерных и основных состояниях. В табл. 2 перечислены энергии наиболее интенсивных γ -линий от распада радиоизо-

Таблица 1. Фотонейтронные реакции при облучении естественной смеси изотопов серебра тормозным излучением с верхней границей спектра 55 МэВ (E_{thr} — порог исследуемой фотоядерной реакции, $J_{g.s}^P, J_{m.s}^P$ — спин и четность основного и изомерного состояний изотопа, $T_{1/2}^{g.s}, T_{1/2}^{m.s}$ — период полураспада основного и изомерного состояний изотопа, $E_{\gamma}^{m.s}$ — энергия изомерного состояния над основным)

Изотоп	Реакция, порог E_{thr} , МэВ	$J_{g.s}^P, T_{1/2}^{g.s}$	$J_{m.s}^P, T_{1/2}^{m.s}$	$E_{\gamma}^{m.s}$, кэВ	Доля изомерного γ -распада p , %
^{108}Ag	$^{109}\text{Ag}(\gamma, n)^{108}\text{Ag}$, 9.19	1^+ , 2.382 мин	6^+ , 438 лет	109.5	8.7
^{106}Ag	$^{107}\text{Ag}(\gamma, n)^{106}\text{Ag}$, 9.54 $^{109}\text{Ag}(\gamma, 3n)^{106}\text{Ag}$, 26.0	1^+ , 23.96 мин	6^+ , 8.28 сут	89.7	0
^{105}Ag	$^{107}\text{Ag}(\gamma, 2n)^{105}\text{Ag}$, 17.48 $^{109}\text{Ag}(\gamma, 4n)^{105}\text{Ag}$, 33.95	$1/2^-$, 41.29 сут	$7/2^+$, 7.23 мин	25.5	99.66
^{104}Ag	$^{107}\text{Ag}(\gamma, 3n)^{104}\text{Ag}$, 27.51 $^{109}\text{Ag}(\gamma, 5n)^{104}\text{Ag}$, 43.98	5^+ , 69.2 мин	2^+ , 33.5 мин	6.9	<0.07
^{103}Ag	$^{107}\text{Ag}(\gamma, 4n)^{103}\text{Ag}$, 35.90 $^{109}\text{Ag}(\gamma, 6n)^{103}\text{Ag}$, 52.37	$7/2^+$, 65.7 мин	$1/2^-$, 5.7 с	134.5	100
^{102}Ag	$^{107}\text{Ag}(\gamma, 5n)^{102}\text{Ag}$, 46.50	5^+ , 12.9 мин	2^+ , 7.7 мин	9.4	49

топов ^{106}Ag и ^{104}Ag , образовавшихся в мишени. По этим линиям идентифицировались фотоядерные реакции, приводившие к образованию соответствующего радиоизотопа, и определялся их выход.

Результатом экспериментов с тормозным γ -излучением является выход фотоядерной реакции $Y(E_e)$, т.е. свертка сечения фотоядерной реакции $\sigma(E_{\gamma})$ с плотностью распределения числа тормозных фотонов с энергией E_{γ} на один электрон пучка ускорителя $\phi(E_{\gamma}, E_e)$:

$$Y(E_e) = \int_{E_{\text{thr}}}^{E_e} \phi(E_{\gamma}, E_e) \sigma(E_{\gamma}) dE_{\gamma}, \quad (1)$$

где E_e — кинетическая энергия электронов, падающих на радиатор; E_{γ} — энергия тормозных γ -

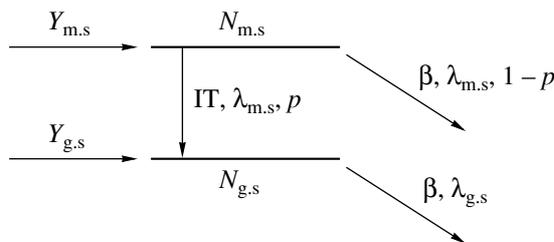


Рис. 2. Схема образования и распада основного и изомерного состояний.

квантов, испущенных из радиатора; E_{thr} — порог исследуемой фотоядерной реакции.

Образующиеся в результате фотоядерных реакций изотопы серебра β -радиоактивны и приводят к появлению соответствующих изотопов палладия, в большинстве случаев в возбужденном состоянии (^{108}Ag также имеет канал β -распада в кадмий), которые, в свою очередь, распадаются с испусканием каскада γ -квантов.

На рис. 2 показана общая схема образования и распада основного и изомерного состояний радиоактивных изотопов в результате фотоядерной реакции. Изомерное состояние образуется как непосредственно в результате фотоядерной реакции, так и после каскада γ -распадов с испусканием преимущественно электрических дипольных $E1$, электрических квадрупольных $E2$ или магнитных дипольных $M1$ γ -квантов за время $10^{-9} - 10^{-17}$ с. Распад изомерного состояния может происходить либо с вылетом γ -квантов на основное состояние изотопа, либо в результате β -распада на возбужденные состояния дочернего ядра.

Образование основных состояний исследуемых изотопов может происходить непосредственно в результате фотоядерных реакций и за счет накопления при γ -распаде изомерных состояний, образованных в результате фотоядерной реакции. Поэтому в расчетах выхода реакции с образованием

Таблица 2. Выходы изомерных и основных состояний ^{106}Ag и ^{104}Ag на естественной смеси изотопов серебра, полученные в настоящей работе (E_γ — энергия γ -квантов, по которым проводилась идентификация радиоизотопа, I_γ — квантовый выход γ -квантов, $Y_{\text{отн}}$ — выход радиоизотопа)

Изотоп	E_γ , кэВ	I_γ , %	$Y_{\text{отн}}$	
$^{106g.s}\text{Ag}$	616	0.142	217 ± 11	
	622	0.316	232 ± 10	
	873.5	0.199	215 ± 6	
	1050.5	0.167	210 ± 8	
	1128	0.0721	232 ± 10	
	1194.5	0.0398	191 ± 17	
	1562	0.0172	236 ± 14	
	1797	0.0082	211 ± 25	
	$^{106m.s}\text{Ag}$	222	6.6	2.75 ± 0.14
		229	2.1	2.80 ± 0.17
391		3.68	2.68 ± 0.25	
406		13.4	2.92 ± 0.10	
429.5		13.2	2.83 ± 0.10	
451		28.2	2.90 ± 0.08	
601		1.61	3.11 ± 0.25	
616		21.6	2.82 ± 0.09	
703		4.47	2.97 ± 0.15	
717		28.9	3.02 ± 0.09	
748.5		20.6	2.88 ± 0.10	
793		5.9	3.05 ± 0.19	
848		2.8	2.9 ± 0.7	
1046		29.6	2.91 ± 0.11	
1128		11.8	2.99 ± 0.15	
1199		11.2	3.01 ± 0.16	
1223		7.0	2.78 ± 0.19	
1527.5		16.3	2.97 ± 0.26	
1572		6.6	2.75 ± 0.24	
1839		2.0	3.3 ± 0.6	
804 + 808	12.4	3.03 ± 0.19		
$^{104g.s}\text{Ag}$	741	7.2	0.46 ± 0.08	
	759	6.4	0.53 ± 0.08	
	768	65.7	0.496 ± 0.019	
	786	9.5	0.46 ± 0.08	
	858	10.4	0.44 ± 0.07	
	863	6.9	0.41 ± 0.07	
	942	25.0	0.45 ± 0.05	
	1342	7.3	0.50 ± 0.09	
	923.5	6.9	0.43 ± 0.09	
	$^{104m.s}\text{Ag}$	1238	3.87	0.49 ± 0.05
1721		1.73	0.49 ± 0.09	
2139		1.59	0.51 ± 0.10	
2277		2.46	0.61 ± 0.08	
2729.5		1.18	0.57 ± 0.22	
3213.5		1.46	0.53 ± 0.11	
3408		1.46	0.61 ± 0.22	

основного состояния необходимо учитывать вклады распадов изомерных состояний. Для определения выходов изотопов в таких случаях необходимо решать системы дифференциальных уравнений,

описывающих последовательность радиоактивных распадов с учетом коэффициентов ветвления по различным каналам распада:

$$\begin{cases} \frac{dN_{m.s}}{dt} = -\lambda_{m.s}N_{m.s} + I(t)Y_{m.s}, \\ \frac{dN_{g.s}}{dt} = -\lambda_{g.s}N_{g.s} + p\lambda_{m.s}N_{m.s} + I(t)Y_{g.s}, \end{cases} \quad (2)$$

$\lambda_{m.s}$, $\lambda_{g.s}$ — постоянные распада изомерного и основного состояний ядра; $Y_{m.s}$ — независимый выход образования ядра в изомерном состоянии; $Y_{g.s}$ — независимый выход образования ядра в основном состоянии; $N_{m.s}$, $N_{g.s}$ — количество ядер в метастабильном и основном состояниях на момент окончания облучения; p — вероятность распада метастабильного состояния на основное; $I(t)$ — ток ускорителя во время облучения.

Решение первого уравнения системы для выхода ядер, образующихся напрямую в результате фотоядерной реакции или после каскада γ -квантов:

$$Y = \frac{S}{Ck(e^{-\lambda(t_2-t_1)} - e^{-\lambda(t_3-t_1)})}, \quad (3)$$

где S — площадь фотопика в спектрах остаточной активности, соответствующего γ -переходу при распаде конечного ядра за время измерения; t_1 — время облучения; t_2 — время начала измерения; t_3 — время окончания измерения; λ — постоянная распада; k — коэффициент, равный произведению эффективности детектора, коэффициента каскадного суммирования и квантового выхода γ -кванта при γ -переходах; C — коэффициент, учитывающий изменение тока ускорителя во время облучения, $C = \int_0^{t_1} I(t)e^{-\lambda(t-t_1)} dt$.

На рис. 3 приведена диаграмма протекания реакции $^{107}\text{Ag}(\gamma, n)^{106}\text{Ag}$, показана схема распада основного и изомерного состояний ядра ^{106}Ag . В результате поглощения $E1$ γ -квантов ядром ^{107}Ag возбуждается гигантский дипольный резонанс с моментом $1/2^+$ либо $3/2^+$. Распад гигантского дипольного резонанса с моментом $J^P = 1/2^+, 3/2^+$ в результате реакции с вылетом одного нейтрона приводит к образованию ядра ^{106}Ag в основном и возбужденных состояниях. Каскады γ -переходов из возбужденных состояний приводят к образованию изомерного либо основного состояния ^{106}Ag . В случае образования изомерного состояния выход определяется соотношением (3). Распад изомерного состояния $^{106m.s}\text{Ag}$ происходит по каналу β^+ -распада или электронного захвата. Вероятность p изомерного перехода в основное состояние равна нулю, поэтому выход образования основного состояния $^{106g.s}\text{Ag}$ в результате фотоядерной реакции также можно определить из соотношения (3).

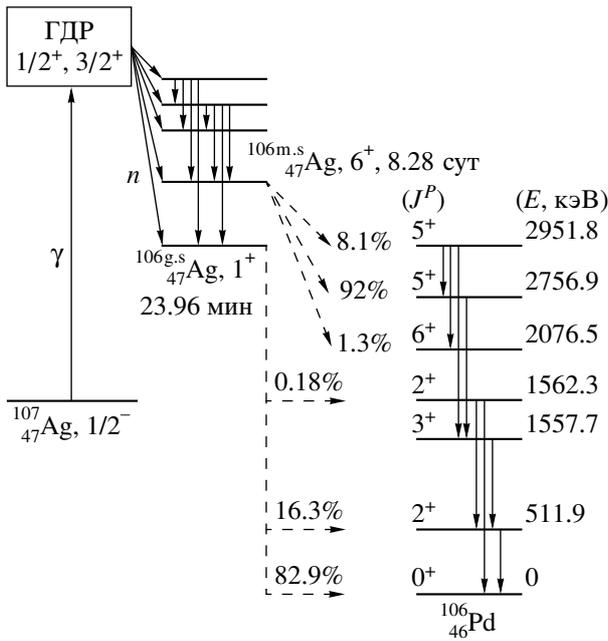


Рис. 3. Диаграмма протекания реакции $^{107}\text{Ag}(\gamma, n)^{106}\text{Ag}$. Распад основного и изомерного состояний ядра ^{106}Ag .

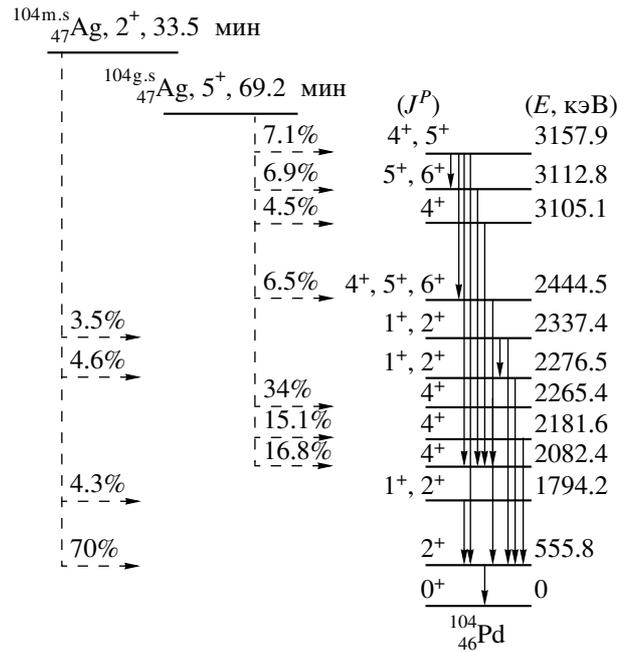


Рис. 4. Распад основного и изомерного состояний ядра ^{104}Ag .

Распад изомерного и основного состояний ^{106}Ag можно идентифицировать по нескольким γ -линиям. Наиболее интенсивная γ -линия с энергией 511.9 кэВ появляется в результате γ -перехода из первого возбужденного состояния ^{106}Pd в основное состояние. Первое возбужденное состояние ^{106}Pd образуется с вероятностью 16.3% в результате β -распада ^{106}Ag из основного состояния. Это состояние также образуется в результате каскада γ -переходов возбужденных состояний ^{106}Pd с высоким спином, образующихся в результате β -распада изомерного состояния $^{106m.s}\text{Ag}$. Кроме того, образующиеся в результате фотонейтронных реакций радиоизотопы серебра β^+ -радиоактивны, поэтому их распад также сопровождается вылетом аннигиляционных γ -квантов с энергией 511.5 кэВ. Для того чтобы более надежно разделить линии 511.9 и 511.5 кэВ, выходы образования изомерного и основного состояний ^{106}Ag определялись и по другим менее интенсивным γ -пикам. Используемые при расчете γ -линии и соответствующие относительные выходы приведены в табл. 2. На основе этих данных рассчитывались средневзвешенные значения выходов образования соответствующих состояний.

На рис. 4 показана схема распада основного и изомерного состояний изотопа ^{104}Ag . Спин и четность изомерного состояния $J^P(^{104m.s}\text{Ag}) = 2^+$, а основного — $J^P(^{104g.s}\text{Ag}) = 5^+$. На рис. 4

приведена только часть уровней конечного ядра ^{104}Pd , β -распад на которые имеет наибольшую вероятность. Изомерное состояние с вероятностью 99.93% распадается путем β^+ -распада или электронного захвата на состояния ^{104}Pd со спинами 2+. Вероятность γ -распада изомерного состояния $^{104m.s}\text{Ag}$ в основное оценивается как $<0.07\%$. Поэтому при расчете выхода образования основного состояния ядра $^{104g.s}\text{Ag}$ также можно пользоваться формулой (3). С β^+ -распадом основного состояния $^{104g.s}\text{Ag}$ связана система высоколежащих уровней в ядре ^{104}Pd со спинами 4–6. После каскадов γ -переходов между этими уровнями заселяется первое возбужденное состояние ^{104}Pd с $J^P = 2^+$ и энергией 555.8 кэВ. Это состояние заселяется также непосредственно при β -распаде изомерного состояния $^{104m.s}\text{Ag}$ и в результате каскадов γ -переходов. Поэтому выход основного и изомерного состояний ^{104}Ag определялся по другим менее интенсивным γ -линиям (табл. 2).

Изомерное отношение определялось как отношение выхода образования состояния с большим спином к состоянию с меньшим спином:

$$\text{IR}(^{106}\text{Ag}) = \frac{Y(^{106m.s}\text{Ag}^{6+})}{Y(^{106g.s}\text{Ag}^{1+})}, \quad (4)$$

$$\text{IR}(^{104}\text{Ag}) = \frac{Y(^{104g.s}\text{Ag}^{5+})}{Y(^{104m.s}\text{Ag}^{2+})}. \quad (5)$$

Полученные изомерные отношения ^{106}Ag и ^{104}Ag , а также результаты, полученные в других работах [7–16], представлены в табл. 3 и 4 соответственно.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Зависимость изомерных отношений для изотопов ^{104}Ag и ^{106}Ag от максимальной энергии тормозного спектра показана на рис. 5. Изомерные отношения $\text{IR}(^{106}\text{Ag})$ были получены в основном в результате реакции $^{\text{nat}}\text{Ag}(\gamma, xn)^{106}\text{Ag}$ на естественной смеси изотопов серебра [7–12, 16]. Порог реакции $^{109}\text{Ag}(\gamma, 3n)^{106}\text{Ag}$ равен 26 МэВ, поэтому можно сказать, что изомерные отношения $\text{IR}(^{106}\text{Ag})$ до энергии электронов ускорителя 26 МэВ получены для реакции $^{107}\text{Ag}(\gamma, n)^{106}\text{Ag}$. Изомерные отношения $\text{IR}(^{104}\text{Ag})$ получены в результате реакций $^{\text{nat}}\text{Ag}(\gamma, xn)^{104}\text{Ag}$ на мишенях из естественной смеси изотопов серебра. Порог реакции $^{109}\text{Ag}(\gamma, 5n)^{104}\text{Ag}$ составляет ≈ 44 МэВ, поэтому до этой энергии электронов ускорителя можно считать, что изотоп ^{104}Ag образуется в результате реакции $^{107}\text{Ag}(\gamma, 3n)^{106}\text{Ag}$. В табл. 4 и на рис. 5 также приведены изомерные отношения $\text{IR}(^{104}\text{Ag})$ для фотоядерной реакции $^{106}\text{Cd}(\gamma, pn)^{104}\text{Ag}$ при энергии электронов ускорителя 23.5 [21] и 55 МэВ [22]. В работе [10] при энергии 84 МэВ получено изомерное отношение $\text{IR}(^{104}\text{Ag})$ в результате реакции $^{109}\text{Ag}(\gamma, 5n)^{104}\text{Ag}$ на мишени из обогащенного ^{109}Ag .

Изомерное отношение $\text{IR}(^{106}\text{Ag})$ уменьшается в области энергий электронов ускорителя до ≈ 25 –30 МэВ, после чего начинает увеличиваться. Для выяснения причины такого поведения изомерного отношения были проведены расчеты сечений образования основного и изомерного состояний ^{104}Ag и ^{106}Ag с помощью программы TALYS [23]. В программе TALYS применяется комбинация испарительного механизма Хаузера–Фешбаха и экситонного предравновесного механизма распада составного ядра с вылетом нуклонов и γ -квантов [24]. На рис. 6 показаны сечения реакций $^{107}\text{Ag}(\gamma, n)^{106}\text{Ag}$ и $^{109}\text{Ag}(\gamma, 3n)^{106}\text{Ag}$ в зависимости от энергии γ -квантов и также смоделированная плотность распределения числа тормозных фотонов $\phi(E_\gamma, E_e)$ на один электрон ускорителя при энергии электронов ускорителя 55 МэВ для геометрии облучения в нашей работе и работе [9]. Сечение образования основного состояния в результате реакции $^{107}\text{Ag}(\gamma, n)^{106}\text{Ag}$ выше сечения образования изомерного состояния. В результате преимущественного поглощения дипольных γ -квантов ядром ^{107}Ag возбуждается гигантский дипольный резонанс с моментом $1/2^+$ либо $3/2^+$

Таблица 3. Изомерное отношение $\text{IR}(^{106}\text{Ag}) = \frac{Y(^{106\text{m.s}}\text{Ag}^{6+})}{Y(^{106\text{g.s}}\text{Ag}^{1+})}$ в результате фотоядерных реакций в зависимости от энергии электронов ускорителя E_e

E_e , МэВ	IR	Литература
$^{\text{nat}}\text{Ag}(\gamma, xn)^{106}\text{Ag}$		
14	0.026 ± 0.0017	[8]
15	0.021 ± 0.0014	[8]
16	0.016 ± 0.0011	[8]
17	0.015 ± 0.0010	[8]
18	0.014 ± 0.0009	[8]
19	0.013 ± 0.0009	[8]
20	0.012 ± 0.0008	[8]
20	0.015 ± 0.0045	[12]
21	0.011 ± 0.0007	[8]
22	0.010 ± 0.0006	[8]
23	0.011 ± 0.0007	[8]
24	0.010 ± 0.0006	[8]
30	0.010 ± 0.002	[12]
40	0.019 ± 0.002	[7]
45	0.022 ± 0.002	[7]
45	0.025 ± 0.003	[9]
50	0.023	[16]
50	0.023 ± 0.002	[7]
55	0.025 ± 0.002	[7]
55	0.0134 ± 0.0014	Настоящая работа
55	0.028 ± 0.003	[9]
60	0.025 ± 0.002	[7]
$^{107}\text{Ag}(\gamma, n)^{106}\text{Ag}$		
18	0.06 ± 0.010	[13]
30	0.044	[14]
30	0.042	[15]
34	0.08 ± 0.015	[13]

(рис. 3). При низкой энергии возбуждения составного ядра, а следовательно и низкой энергии испаряющихся нейтронов, они уносят угловой момент $l = 0, 1$. Поэтому в результате распада гигантского дипольного резонанса заселяются в основном уровни, связанные с основным состоянием. Согласно каскадно-испарительной модели

Таблица 4. Изомерное отношение $IR(^{104}\text{Ag}) = \frac{Y(^{104\text{g.s}}\text{Ag}^{5+})}{Y(^{104\text{m.s}}\text{Ag}^{2+})}$ в результате фотоядерных реакций в зависимости от энергии электронов ускорителя E_e

E_e , МэВ	IR	Литература
$^{nat}\text{Ag}(\gamma, xn)^{104}\text{Ag}$		
33	0.88 ± 0.14	[10]
34.5	1.04 ± 0.10	[10]
35	0.88 ± 0.14	[11]
36.5	1.26 ± 0.05	[10]
38.5	1.39 ± 0.08	[10]
40	1.26 ± 0.12	[7]
45	1.34 ± 0.12	[7]
45	1.45 ± 0.13	[9]
50	1.36 ± 0.12	[7]
55	1.43 ± 0.12	[7]
55	1.53 ± 0.13	[9]
55	0.95 ± 0.21	Настоящая работа
60	1.49 ± 0.12	[7]
$^{109}\text{Ag}(\gamma, 5n)^{104}\text{Ag}$		
84	1.88 ± 0.08	[10]
$^{106}\text{Cd}(\gamma, pn)^{104}\text{Ag}$		
23.5	0.096 ± 0.010	[21]
55	1.89 ± 0.49	[22]

снятие возбуждения будет происходить в основном за счет $E1$, $E2$ или $M1$ γ -переходов [1, 2]. С ростом энергии возбуждения составного ядра

растет энергия испаряющихся нейтронов, а следовательно изменяется спектр их угловых моментов, также растет энергия возбуждения дочернего ядра, и спектр доступных уровней и соответственно каскадных γ -переходов изменяется. Конкуренция этих факторов приводит к тому, что изомерное отношение в зависимости от энергии налетающих γ -квантов будет изменяться. Уменьшение изомерного отношения на изотопе ^{106}Ag , т.е. относительное уменьшение выхода изомерного состояния ^{106}Ag с $J^P = 6^+$, при увеличении энергии возбуждения составного ядра в рамках каскадно-испарительной модели можно объяснить только структурой возбужденных состояний ядра. Увеличивается число уровней, связанных с основным состоянием.

Выше порога реакции $^{109}\text{Ag}(\gamma, 3n)^{106}\text{Ag}$ изомерное отношение начинает расти. Расчеты по TALYS показывают меньшее различие в сечениях образования изомерного и основного состояний в реакции $^{109}\text{Ag}(\gamma, 3n)^{106}\text{Ag}$ по сравнению с реакцией с вылетом одного нейтрона. Это связано с тем, что нейтроны уносят большой орбитальный момент, и спектр доступных возбужденных состояний в дочернем ядре ^{106}Ag расширяется. При энергии выше 45 МэВ сечение образования изомерного состояния становится выше сечения реакции с образованием основного состояния. На рис. 7 показана зависимость отношения сечений образования основного и метастабильного состояний ^{106}Ag от энергии γ -квантов, рассчитанного по программе TALYS для различных каналов образования ^{106}Ag . Отношение суммарных сечений образования изотопа ^{106}Ag в основном и изомерном состояниях на изотопах ^{107}Ag и ^{109}Ag в результате реакций (γ, n) и $(\gamma, 3n)$ соответственно с учетом их процентного содержания в естественной смеси определяется соотношением

$$\frac{\sigma(^{106\text{m.s}}\text{Ag}^{6+})}{\sigma(^{106\text{g.s}}\text{Ag}^{1+})} = \frac{\eta(^{107}\text{Ag})\sigma(^{107}\text{Ag}(\gamma, n)^{106\text{m.s}}\text{Ag}) + \eta(^{109}\text{Ag})\sigma(^{109}\text{Ag}(\gamma, 3n)^{106\text{m.s}}\text{Ag})}{\eta(^{107}\text{Ag})\sigma(^{107}\text{Ag}(\gamma, n)^{106\text{g.s}}\text{Ag}) + \eta(^{109}\text{Ag})\sigma(^{109}\text{Ag}(\gamma, 3n)^{106\text{g.s}}\text{Ag})}, \quad (6)$$

где $\eta(^{107}\text{Ag})$ и $\eta(^{109}\text{Ag})$ — процентное содержание соответствующих изотопов в естественной смеси.

Видно, что отношения сечений ведут себя аналогично отношениям выходов при больших энергиях, важную роль в росте изомерного отношения на ^{106}Ag при энергиях выше 25 МэВ имеет реакция $^{109}\text{Ag}(\gamma, 3n)^{106}\text{Ag}$. Мы оценили вклад реакции $^{109}\text{Ag}(\gamma, 3n)^{106}\text{Ag}$ в выход образования основного

состояния ^{106}Ag в наших условиях эксперимента при энергии электронов ускорителя 55 МэВ как 2%, вклад этой реакции в выход изомерного состояния ^{106}Ag — 12.5%. При низких энергиях (до 25 МэВ) изомерное отношение теоретических сечений растет, тогда как экспериментальные выходы падают. В TALYS для расчета сечений фотоядерных реакций используется статистическая модель

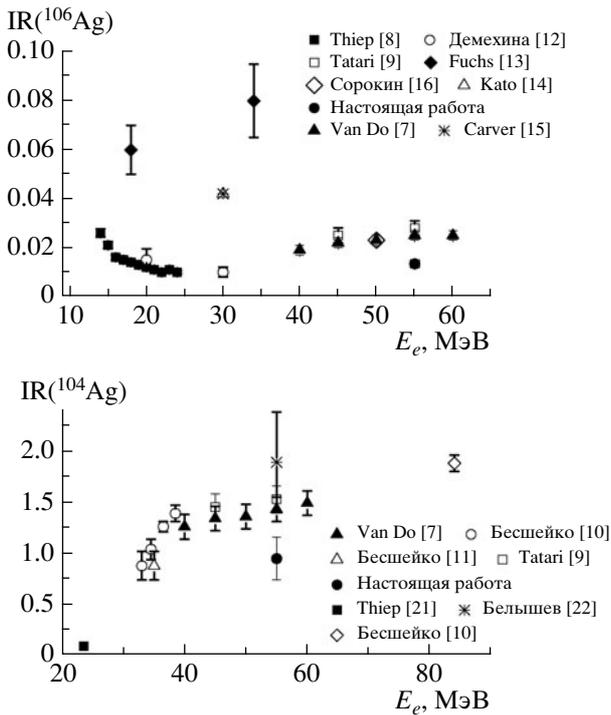


Рис. 5. Зависимость изомерных отношений $IR(^{106}\text{Ag})$ (вверху) и $IR(^{104}\text{Ag})$ (внизу) от энергии облучения.

распада составного ядра и предравновесная модель вылета нейтронов, полупрямой механизм не учитывается. Полупрямой механизм вылета нейтрона может играть большую роль [3]. В этом случае изомерные отношения будут зависеть от спектра входных состояний и не будут увеличиваться.

Зависимость изомерного отношения на изотопе ^{104}Ag от максимальной энергии тормозного спектра показана на рис. 5. Изомерное отношение

$$IR(^{104}\text{Ag}) = \frac{Y(^{104g.s}\text{Ag}^{5+})}{Y(^{104m.s}\text{Ag}^{2+})}$$

растет в области энергий электронов ускорителя до 55 МэВ. Изомерное отношение на ^{104}Ag примерно на два порядка выше, чем на ^{106}Ag . В данном случае в результате преимущественного поглощения дипольных γ -квантов ядром ^{109}Ag также возбуждается гигантский дипольный резонанс с моментом $1/2^+$ либо $3/2^+$, но изомерное состояние с энергией возбуждения $E_\gamma = 6.9$ кэВ и $J^P = 2^+$ имеет меньшую разницу в спинах с основным состоянием $J^P = 5^+$. Такая зависимость изомерного отношения (≈ 1 в районе порога реакции) обусловлена тем, что радиоизотоп ^{104}Ag образуется преимущественно вследствие вылета трех нейтронов в результате реакции $^{107}\text{Ag}(\gamma, 3n)^{104}\text{Ag}$.

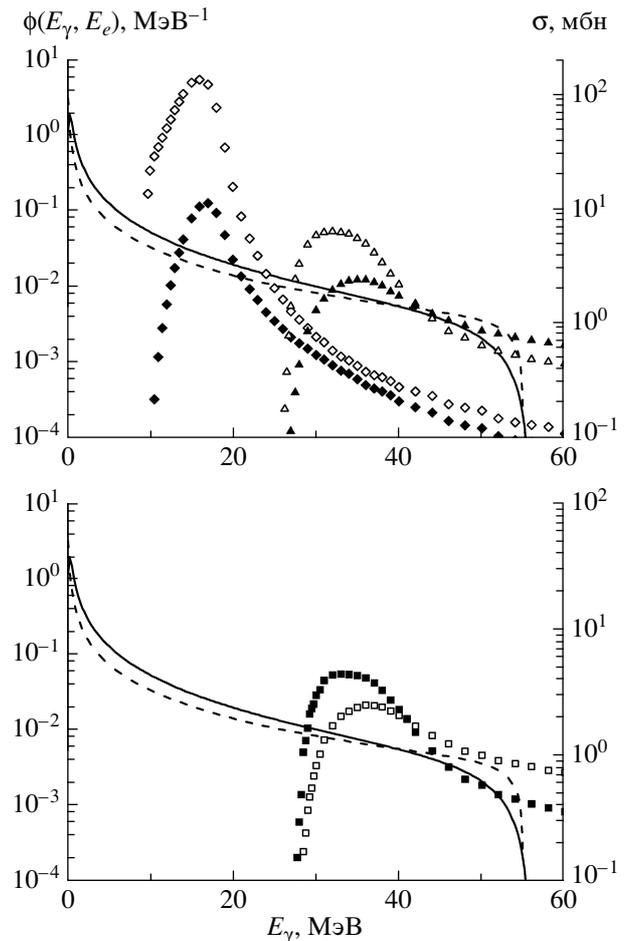


Рис. 6. Плотность распределения числа тормозных фотонов $\phi(E_\gamma, E_e)$ на один электрон ускорителя при энергии электронов ускорителя 55.5 МэВ, рассчитанная с помощью GEANT4, тормозной мишени из вольфрама толщиной 2.2 мм (сплошная кривая) и 0.1 мм (штриховая кривая). Вверху — сечение реакции $^{107}\text{Ag}(\gamma, n)^{106}\text{Ag}$, рассчитанное с помощью программы TALYS, с образованием основного состояния (\diamond) и изомерного состояния ^{106}Ag (\blacklozenge), сечение реакции $^{109}\text{Ag}(\gamma, 3n)^{106}\text{Ag}$ с образованием основного состояния (\triangle) и изомерного состояния ^{106}Ag (\blacktriangle). Внизу — сечение реакции $^{107}\text{Ag}(\gamma, 3n)^{104}\text{Ag}$, рассчитанное с помощью программы TALYS, с образованием основного состояния (\square) и изомерного состояния ^{104}Ag (\blacksquare).

Порог реакции $^{109}\text{Ag}(\gamma, 5n)^{104}\text{Ag}$ составляет ≈ 44 МэВ, поэтому выход этой реакции при облучении тормозным спектром с верхней границей $E_e = 55$ МэВ значительно меньше, чем выход реакции $^{107}\text{Ag}(\gamma, 3n)^{104}\text{Ag}$. Рост изомерного отношения показывает роль энергии возбуждения составного ядра в образовании изомерного состояния. Значение, полученное нами, ниже других экспериментальных данных как в случае ^{104}Ag , так и в случае ^{106}Ag . Это объясняется тем,

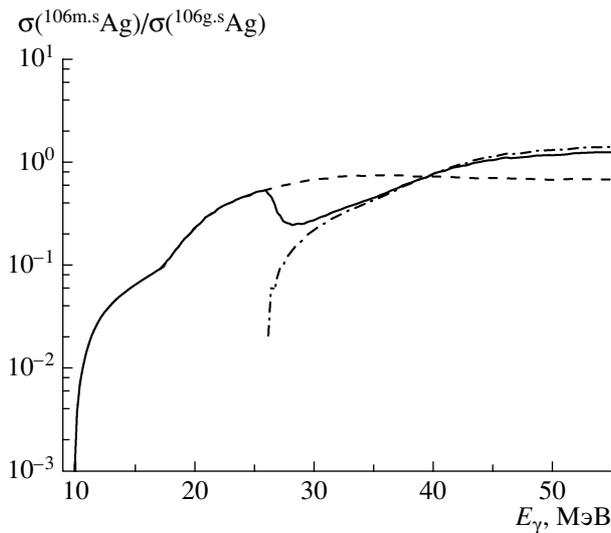


Рис. 7. Зависимость отношения сечений образования изомерного к основному состоянию ^{106}Ag от энергии γ -квантов, рассчитанного по программе TALYS. Кривые: сплошная — отношение сечений основного и изомерного состояний в результате реакции $^{107}\text{Ag}(\gamma, n)^{106}\text{Ag}$, штрихпунктирная — $^{109}\text{Ag}(\gamma, 3n)^{106}\text{Ag}$, штриховая — отношение суммарных сечений на изотопах ^{107}Ag и ^{109}Ag с учетом их процентного содержания в естественной смеси.

что в нашем эксперименте в качестве тормозной мишени использовался вольфрам толщиной 2.2 мм, тогда как, например, в работах [7, 9] использовалась тормозная вольфрамовая мишень толщиной 0.1 мм. Спектр тормозных фотонов, рассчитанный с помощью программы GEANT4, для этих условий эксперимента представлен на рис. 6. Видно, что для тонкой тормозной мишени тормозной спектр более жесткий и средняя энергия возбуждения ядра будет выше.

При энергии 55 МэВ в наших условиях эксперимента изомерное отношение $\text{IR}(^{106}\text{Ag}) = 0.081$, рассчитанное с помощью программы TALYS, существенно выше экспериментального значения. Рассчитанное теоретическое изомерное отношение $\text{IR}(^{104}\text{Ag}) = 0.60$ отличается от экспериментального незначительно. Укажем на возможные причины расхождений в оценках.

Наблюдаемое различие экспериментального и рассчитанного значений изомерного отношения в реакции $^{107}\text{Ag}(\gamma, n)^{106}\text{Ag}$ может объясняться следующими факторами. Спин основного состояния ^{107}Ag равен $1/2^-$, а основное состояние $^{106g.s}\text{Ag}$ имеет $J^P = 1^+$, в то время как спин и четность изомерного состояния $J^P = 6^+$. Энергия изомерного состояния в $^{106m.s}\text{Ag}$ лишь на $E = 80$ кэВ выше основного состояния, поэтому можно предположить, что на изомерное отношение влияет роль

прямых и полупрямых реакций выбивания нейтрона с кинетической энергией, близкой к максимальной, что приводит к преимущественному образованию ^{106}Ag в основном состоянии. Объяснить полученную разницу изомерных отношений можно, предположив примерно 5%-ный вклад прямых и полупрямых процессов при данной средней энергии возбуждения.

Расхождение также можно объяснить наличием дополнительной силы $E1$ - и $M1$ -переходов относительно переходов большей мультипольности в ^{106}Ag в диапазоне энергий 4–9 МэВ, что также будет приводить к преимущественному возбуждению основного состояния. Такое преобладание может быть связано с наличием, например, пигми-резонанса $E1$ в данной области энергий. Окончательный вывод об источнике отличий от статистической модели можно будет сделать с помощью дополнительной экспериментальной и теоретической информации о структуре уровней ^{106}Ag в этой области энергии.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью γ -активационной методики получены изомерные отношения образования ^{106}Ag и ^{104}Ag в результате фотоядерных реакций $^{\text{nat}}\text{Ag}(\gamma, xn)^{106}\text{Ag}$ и $^{\text{nat}}\text{Ag}(\gamma, xn)^{104}\text{Ag}$ соответственно. Использовалось тормозное излучение с верхней границей 55 МэВ. Из сравнения с результатами других работ полученная зависимость изомерных отношений от верхней границы тормозного спектра объясняется разницей в спинах основного и изомерного состояний и средней энергией возбуждения составного ядра. Выполнено сравнение экспериментальных данных с расчетами по каскадно-испарительной модели.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-02-05839.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. R. Huizenga and R. Vandenbosch, Phys. Rev. **120**, 1305 (1960).
2. R. Vandenbosch and J. R. Huizenga, Phys. Rev. **120**, 1313 (1960).
3. H. Bartsch, K. Huber, U. Kneissl, and H. Krieger, Nucl. Phys. A **256**, 243 (1976).
4. Ю. П. Гангрский, А. П. Тончев, Н. П. Балабанов, ЭЧАЯ **27**, 1043 (1996) [Phys. Part. Nucl. **27**, 428 (1996)].
5. В. М. Мазур, ЭЧАЯ **31**, 385 (2000) [Phys. Part. Nucl. **31**, 188 (2000)].
6. S. A. Karamian, ЯФ **76**, 1522 (2013) [Phys. Atom. Nucl. **76**, 1437 (2013)].
7. N. Van Do *et al.*, Nucl. Instrum. Methods B **342**, 188 (2015).

8. T. D. Thier *et al.*, J. Radioanal. Nucl. Chem. **299**, 477 (2014).
9. M. Tatari *et al.*, J. Radioanal. Nucl. Chem. **300**, 269 (2014).
10. О. А. Бесшейко, А. Н. Водин, Л. А. Голинка-Бесшейко и др., Изв. РАН. Сер. физ. **75**, 997 (2011) [Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. **75**, 941 (2011)].
11. О. А. Бесшейко, А. Н. Водин, Л. А. Голинка-Бесшейко и др., Изв. РАН. Сер. физ. **73**, 1556 (2009) [Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. **73**, 1461 (2009)].
12. Н. А. Демехина, А. С. Данагулян, Г. С. Карапетян, ЯФ **65**, 390 (2002) [Phys. Atom. Nucl. **65**, 365 (2002)].
13. H. Fuchs, R. Kosiek, and U. Meyer-Berkhout, Z. Phys. **166**, 590 (1962).
14. T. Kato, J. Rad. Chem. **16**, 307 (1973).
15. J. H. Carver, G. E. Coote, and T. R. Sherwood, Nucl. Phys. **37**, 449 (1962).
16. A. A. Sorokin and V. N. Ponomarev, in *Summaries of Report of XXVI Conference on Nuclear Spectroscopy and Structure, Baku, USSR, 3–6, Febr. 1976*, p. 449.
17. С. С. Бельшев, К. А. Стопани, А. А. Кузнецов и др., Вестн. МГУ. Сер. 3, Физика, астрономия, № 4, 42 (2011) [Moscow Univ. Phys. Bull. **66**, 363 (2011)].
18. S. S. Belyshev, A. N. Ermakov, B. S. Ishkhanov, *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A **745**, 133 (2014).
19. A. I. Karev, A. N. Lebedev, V. G. Raevsky, *et al.*, in *Proceedings of XXII Russian Particle Accelerator Conference, RuPAC-2010, Protvino, Russia, 2010*, p. 316.
20. S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako, *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A **506**, 250 (2003).
21. Т. Д. Тьер и др., Письма в ЭЧАЯ **6**, 209 (2009) [Phys. Part. Nucl. Lett. **6**, 126 (2009)].
22. С. С. Бельшев, Б. С. Ишханов, А. А. Кузнецов и др., ЯФ **77**, 856 (2014) [Phys. Atom. Nucl. **77**, 809 (2014)].
23. R. Capote, M. Herman, P. Obložinský, *et al.*, Nucl. Data Sheets **110**, 3107 (2009).
24. C. K. Cline and M. Blann, Nucl. Phys. A **172**, 225 (1971).

ISOMERIC YIELD RATIOS FOR PHOTONUCLEAR REACTIONS OF NATURAL SILVER

S. S. Belyshev, B. S. Ishkhanov, A. A. Kuznetsov, A. A. Martynov, K. A. Stopani

The photon activation technique is used to study the photodisintegration of isotopes of natural silver with end-point energy 55 MeV. Yields of photoneutron reactions with up to 4 outgoing neutrons and isomeric yield ratios for ^{106}Ag and ^{104}Ag are obtained. The experimental results are compared with the theoretical calculations using the cascade-evaporation model.