Article



## Изомерные Состояния в Реакциях $(\gamma, n)$ и (n, 2n) на Ядре <sup>59</sup>Со

С.Р. Палванов<sup>1</sup>, Т. Ахмаджанов<sup>1</sup>, С.А. Ашуров<sup>1</sup>\*, О.Р. Тожибоев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Национальный университет Узбекистана имени М. Улугбека, Ташкент, 100174, Узбекистан.

<sup>2</sup> Институт ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан, Ташкент, 100214, Узбекистан.

palvanov1960@gmail.com (С.П.), t.akhmadjanov@nuu.uz (Т.А.), olimjon@inp.uz (О. Т)

\* Correspondence: palvanov1960@gmail.com (С.П.)

Аннотация: Методом наведенной активности измерены сечения образования изомерных состояний в реакциях ( $\gamma n$ ) и (n2n) на ядре <sup>59</sup>Со. Получены энергетические зависимости изомерного отношения выходов реакций ( $\gamma n$ ) в области энергий 1435 МэВ с шагом 1 МэВ. Результаты экспериментов сравниваются с данными других работ и расчетом TALYS-1.6.

**Ключевые слова:** ядерные реакции, изомерные отношения, тормозное излучение, радиоактивность, сечение, активность, изомер, ядро.

# Excitation of isomeric states in the reactions $(\gamma,n)$ and (n,2n) on the $^{59}{\rm Co}$ nucleus

S.R. Palvanov<sup>1</sup>, T. Akhmadjanov<sup>1</sup>, S.A. Ashurov<sup>1\*</sup>, O.R. Tojiboev<sup>2</sup>

National University of Uzbekistan named after M. Ulugbek, Tashkent, 100174, Uzbekistan.
 Institute of Nuclear Physics of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, 100214, Uzbekistan.

palvanov1960@gmail.com (S.P.), t.akhmadjanov@nuu.uz (T.A.), olimjon@inp.uz (O.T.)

#### Abstract:

The cross sections for the formation of isomeric states in the reactions  $(\gamma, n)$  and (n, 2n) on the <sup>59</sup>Co nuclei were measured using the induced activity method. The energy dependencies of the isomeric ratio of the yields of the  $(\gamma, n)$  reactions in the energy range of 1435 MeV with a step of 1 MeV were obtained. The experimental results are compared with the data from other studies and the TALYS-1.6 calculations.

**Keywords:** nuclear reactions, isomeric ratios, bremsstrahlung, radioactivity, cross section, activity, isomer, nucleus.

#### Ведение

Исследование относительной вероятности заселения изомерных состояний, образующихся в реакциях с участием фотонов и нейтронов ( $\gamma$ , Nn), ( $\gamma$ , p) и (n, 2n), позволяет получить информацию о спиновом распределении возбужденных состояний, параметрах плотности ядерных уровней, параметрах спинового ограничения статистической модели и вкладе прямых процессов в механизм реакций [1–3]. Информация об изомерных отношениях выходов реакций необходима для тестирования феноменологических подходов при описании изомерных состояний возбужденных атомных ядер и разработки оптимальных методик гамма- и нейтронно-активационного анализа, а также получения радионуклидов для ядерной медицины. Выполнение систематизированных измерений сечений фотоядерных реакций в области  $E_{\gamma} > 20$  МэВ и улучшение их точности является одной из актуальных задач экспериментальной ядерной физики.

Возбуждение изомерных состояний <sup>58m,g</sup>Со в фотоядерной реакции типа ( $\gamma$ , n) исследовано в работе [4], в которой экспериментально определены изомерные отношения выходов реакций при максимальной энергии тормозного излучения 22 МэВ. Полученные результаты

**Цитирование:** С.Р. Палванов, Т. Ахмаджанов, С.А. Ашуров, О.Р. Тожибоев. Изомерные Состояния в Реакциях ( $\gamma$ , n) и (n, 2n) на Ядре <sup>59</sup>Со. **2024**, 1, 1, 2. https://doi.org/

Полученный: 10.10.2024 Исправленный: 18.10.2024 Принято: 25.10.2024 Опубликованный: 30.10.2024

**Copyright:** © 2024 by the authors. Submitted to for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attri- bution (CC BY) license (https:// creativecommons.org/licenses/by/ 4.0/). сравниваются с ранее полученными данными. В работе [5] изомерные отношения выходов реакции  ${}^{59}$ Co( $\gamma$ , n) ${}^{58m,g}$ Co измерены в области энергий 13-25 МэВ с шагом 1 МэВ. В работе [6] было измерено сечение реакции  ${}^{59}$ Co( $\gamma$ , n) ${}^{58}$ Co при максимальной энергии тормозного излучения 15 МэВ на линейном ускорителе электронов. Полученные результаты сравнивали с данными других работ, а также с данными TENDL-2015 и JENDL/PD-2004.

Определено сечение реакции <sup>59</sup>Co( $\gamma$ , n)<sup>58m,g</sup>Co. В большинстве работ изомерные отношения определены при фиксированной энергии тормозного излучения 30 МэВ. Также проводились измерения при высоких энергиях  $E_{\gamma} > 48$  МэВ. В области энергий 26-40 МэВ такие измерения не проводились.

В настоящей работе исследованы изомерные отношения выходов и сечений реакций  ${}^{59}$ Co $(\gamma, n)^{58m,g}$ Co в области энергий 13-35 МэВ с шагом 1 МэВ. Эксперименты проводились методом наведенной активности. Также были измерены изомерные отношения и сечения реакций  ${}^{59}$ Co $(n, 2n)^{58m,g}$ Co, которые ранее были изучены очень слабо. Ранние работы выполнялись с использованием спектроскопических данных, полученных с низкими точностями.

#### Материалы и методы

Измерения на тормозном пучке проводились в области энергий 13-35 МэВ. Облучения образцов проводились вместо мониторов из меди в виде диска диаметром 15 мм. Масса образцов составляла 5-7 г. В гамма-пучке облучали образцы марки химически чистой окиси кобальта Co<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, на нейтронном генераторе — химически чистого хлорида кобальта CoCl<sub>2</sub>. Измерения наведенной гамма-активности образцов и мониторов проводились с помощью сцинтилляционного детектора NaI(Tl) диаметром Ø63×63 мм.

Идентификация заселения изомерного и основного уровней проводилась по  $\gamma$ -линии 811 кэВ. Ядерно-физические характеристики ядер-продуктов реакций ( $\gamma$ , n) и (n, 2n) на ядре <sup>59</sup>Со брались из работ [7–9] и представлены в табл. 1, где  $I^{\pi}$  – спин и чётность уровня,  $T_{1/2}$  – период полураспада ядра,  $I_{\gamma}$  – интенсивность  $\gamma$ -квантов данной энергии на распад, p – коэффициент ветвления  $\gamma$ -перехода. Схема распада приведена на рис. 1.

**Таблица 1.** Ядерно-физические характеристики ядер-продуктов реакций  $(\gamma, n)$  и (n, 2n) на <sup>59</sup>Со

**Table 1.**Nuclear-physical characteristics and angular distribution of the reaction products  $(\gamma, n)$  and (n, 2n) on <sup>59</sup>Co

Ядро-продукт	$J^{\pi}$	$T_{1/2}$	$E_{\gamma}$ , keV	$I_{\gamma}, \%$	р
<sup>58m</sup> Co	5+	9ч	24,90	0,03	1
<sup>58m</sup> Co	1+	70,8 сут	511,00	30	-
			810,60	99,44	-

Гамма спектры облученного алюминия и кобальта при En=14,1 МэВ приведены на рис. 2 и рис. 3.



**Рис. 1.** Схема распада <sup>58</sup>Со **Fig.1.** Decay Scheme of <sup>58</sup>Со



**Рис. 2.** Гамма-спектр натрия-24, облученного при *E*<sub>n</sub> = 14, 1 МэВ, время облучения 60 мин. Fig.1. Gamma spectrum of sodium-24 irradiated at  $E_n = 14.1$  MeV, irradiation time 60 min.



**Рис. 3.** Гамма-спектр облученного кобальта при  $E_n = 14.1$  МэВ, время облучения 60 мин. Fig.1. Gamma spectrum of cobalt irradiated at  $E_n = 14.1$  MeV, irradiation time 60 min.

В качестве мониторной реакции использовали  $^{27}{\rm Al}(n,\alpha)^{24}{\rm Na}$  ( $T_{1/2}=15$ ч,  $E_{\gamma}=1368$ кэВ). Схема распада приведена на рис. 3.6. Как видно на этом рисунке,  $\gamma$ -переход 811 кэВ в ядре <sup>58</sup>Fe образуется в результате  $\beta^+$ -распада основного состояния <sup>58</sup>gCo. Коэффициент ветвления  $\gamma$ -перехода равен p = 1.

Измерения наведенной активности проводились при разных значениях времени паузы (выдержки). Время измерения составляло 60-120 мин. В основном измерения проводились в течение первых двух суток.

Изомерные отношения выходов  $d = \frac{Y_m}{Y_g}$  определялись по формуле [6,10]:

$$d = \left[\frac{\lambda_g F_m(t)}{\lambda_m F_g(t)} \left(C \frac{N_g I_g \varepsilon_g}{N_m I_m \varepsilon_m} \frac{\lambda_g}{\lambda_g - \lambda_m} - p \frac{\lambda_g}{\lambda_g - \lambda_m}\right) + p \frac{\lambda_m}{\lambda_g - \lambda_m}\right]^{-1}$$
$$F_{m,g}(t) = \left[1 - \exp(-\lambda_{m,g} t_g)\right] \exp(-\lambda_{m,g} t_n) \left[1 - \exp(-\lambda_{m,g} t_g)\right]$$

где:

$$F_{m,g}(t) = \left[1 - \exp(-\lambda_{m,g}t_0)\right] \exp(-\lambda_{m,g}t_n) \left[1 - \exp(-\lambda_{m,g}t_c)\right]$$

 $N_m, N_g$ ,- число зарегистрированных актов распада изомерного и основного состояний; С - коэффициент, учитывающий просчеты регистрирующей аппаратуры и положения импульсов;  $\varepsilon$  - эффективность спектрометра; *I*- интенсивность  $\gamma$  -квантов данной энергии на распад;  $t_0$ ,  $t_n$ ,  $t_c$  – время облучения, паузы и измерения соответственно;  $\lambda_m$ ,  $\lambda_g$  - постоянные распады изомерного и основного состояний; p - коэффициент ветвления  $\gamma$ -перехода.

В таблице 2 приведены изомерные отношения выходов фотоядерной реакции  ${}^{59}\text{Co}(\gamma, n){}^{58\text{m,g}}\text{Co}$ , полученные в настоящей работе. В таблице 3 приведены данные других исследований. Как видно из этих таблиц, значения изомерного отношения выходов реакции при энергиях от 12 МэВ до 19 МэВ показывают рост значений  $\frac{Y_m}{Y_2}$ .

Выше 19 МэВ значения изомерного отношения в пределах экспериментальных погрешностей остаются постоянными. В таблице 3 приведены значения изомерного отношения, полученные в разных работах. Как видно, значения в пределах экспериментальных погрешностей согласуются между собой.

$E_{\gamma \max}$ ,	$Y_m/Y_g$	$E_{\gamma \max}$ ,	$Y_m/Y_g$
МэВ		МэВ	
12	1,11±0,04	24	1,15±0,02
13	1,13±0,03	25	1,18±0,02
14	1,15±0,03	26	1,24±0,02
15	1,17±0,03	27	1,21±0,02
16	1,18±0,03	28	1,23±0,02
17	1,24±0,03	29	1,19±0,02
18	1,26±0,03	30	1,21±0,02
19	1,27±0,03	31	1,23±0,02
20	1,21±0,02	32	1,19±0,02
21	1,18±0,03	33	1,23±0,02
22	1,25±0,02	34	1,24±0,02
23	1,24±0,01	35	1,21±0,02

**Таблица 2.** Изомерные отношения выходов фотоядерной реакции  ${}^{59}$ Co $(\gamma, n)$  ${}^{58m,g}$ Co

**Таблица 3.** Изомерные отношения выходов фотоядерной реакции  ${}^{59}$ Co $(\gamma, n)$  ${}^{58m,g}$ Co

<b>Table 2.</b> Isometric field Ratios of the Photoneutron Reaction $^{\circ\circ}Co(\gamma, n)^{\circ\circ\dots, n}$	Table	e 2. Isomeric	c Yield Ratios	of the Photoneutron	Reaction <sup>59</sup> Co	$(\gamma, n)^{58m,g}C$
---	-------	---------------	----------------	---------------------	---------------------------	------------------------

$E_{\gamma \max}$ , MeV	$Y_m/Y_g$	Источник
21	1,18±0,03	[5]
22	1,25±0,02	[5]
23	1,24±0,01	[5]
24	1,15±0,02	[5]
25	1,18±0,02	[5]
30	1,24±0,03	[4]
30	1,26±0,03	[4]
35	1,26±0,03	[4]
48	1,26±0,03	[4]

Для получения абсолютных значений сечений реакции <sup>59</sup>Co( $\gamma$ , n)<sup>58m,g</sup>Co был использован метод мониторов. В качестве мониторной реакции использовали фотоядерную реакцию <sup>65</sup>Cu( $\gamma$ , n)<sup>64</sup>Cu. Для мониторной реакции использовались наиболее современные данные исследований [11–14].

Значение относительных выходов реакции <sup>59</sup>Co( $\gamma$ , n)<sup>58m,g</sup>Co определяли с учётом коэффициента ветвления  $\gamma$ -перехода p. Учтены изомерные отношения выходов  $Y_m/Y_g$  в данном диапазоне энергий. Абсолютная ошибка изомерных отношений выходов определяется статистической погрешностью и эффективностью регистрации  $\gamma$ -излучения.

На основе соотношений Шиффа был проведён расчёт спектра тормозного излучения [15,16]. Сечения реакций  ${}^{59}$ Со $(\gamma, n)$  ${}^{58g}$ Со и  ${}^{59}$ Со $(\gamma, n)$  ${}^{58m}$ Со были рассчитаны по данным мо-

ниторной реакции  ${}^{65}$ Cu $(\gamma, n)$ <sup>64</sup>Cu [13,14]. Результаты аппроксимировались с использованием функции Лоренца.

Для оценки результатов использован пакет TALYS-1.6 [17]. TALYS обеспечивает точное моделирование ядерных реакций в диапазоне энергий от 1 кэВ до 200 МэВ с использованием надёжных ядерных моделей.

Таблица 4. Сечение реакции  ${}^{59}\text{Co}(\gamma,n){}^{58\text{m},g}\text{Co}$ . Table 4. The cross section of the reaction  ${}^{59}\text{Co}(\gamma,n){}^{58\text{m},g}\text{Co}$ .

Реакция	Е <sub><i>m</i></sub> , МэВ	Г, МэВ	<i>σ<sub>m</sub></i> , мб	$\sigma_{\rm int},$ МэВ·мб	Источник
				(25 МэВ)	
$^{59}$ Co( $\gamma$ ,n) $^{58m,g}$ Co	17,17±0,05	4,72±0,28	72	534±38	
$^{59}$ Co( $\gamma$ ,n) $^{58m}$ Co	17,31±0,06	4,62±0,34	41	291±25	Наши
					данные
$^{59}$ Co( $\gamma$ ,n) $^{58g}$ Co	16,97±0,05	4,85±0,31	31	245±19	
$^{59}$ Co( $\gamma$ ,n) $^{58m}$ Co $^*$	17,39±0,10	5,97±0,10	22	218±30	
$^{59}$ Co( $\gamma$ ,n) $^{58g}$ Co $^*$	17,28±0,05	5,47±0,30	47	426±29	
$^{59}$ Co( $\gamma$ ,n) $^{58m}$ Co	17,1	4,5	40	205	[5]
$59$ Co( $\gamma$ ,n) <sup>58g</sup> Co	17,0	4,0	32,5	152	[5]
$59$ Co( $\gamma$ ,n) <sup>58m,g</sup> Co	17,1	4,4	72,5	357	[5]
<sup>59</sup> Co(γ,n) <sup>58</sup> Co	17,64	6	68,5	447**	[12]

Примечание. \*Расчет сечений проводился по программе TALYS-1.6. \*\*Верхний предел интегрирования равен 28 МэВ.

Note. \*The cross-section calculations were performed using the TALYS-1.6 program. \*\*The upper integration limit is 28 MeV.

В данной работе при определении интегрального сечения  $\sigma_{int}$  реакций <sup>59</sup>Со( $\gamma$ ,n)<sup>58m,g</sup>Со предел интегрирования составлял 25 МэВ, в работе [12] предел интегрирования — 28 МэВ. Значения сечений в максимуме, полученные в работе [5], в области экспериментальных ошибок совпадают с нашими данными. В работе [12] данные получены методом прямой регистрации фотонейтронов, в котором невозможно разделить нейтроны от реакций ( $\gamma$ ,n) и ( $\gamma$ ,np), вследствие чего измерено фактически суммарное сечение  $\sigma[(\gamma, n) + (\gamma, np)]$  вместо  $\sigma(\gamma, n)$ .

Полученное в данной работе интегральное сечение реакции  ${}^{59}\text{Co}(\gamma,n){}^{58\text{m},g}\text{Co}$  меньше дипольного правила сумм. Это отношение тем больше, чем больше атомный номер элементов, т.е. число протонов в ядре. В нашей работе по правилу сумм полное интегральное сечение равно:

$$\int \sigma_{E1}^{\max} dE = 60 \cdot rac{NZ}{A}$$
 МэВ · мб = 879 МэВ · мб

Одна из причин этого заключается в том, что не учтены другие реакции, дающие вклад в сечение фотопоглощения, такие как ( $\gamma$ ,p); ( $\gamma$ ,np); ( $\gamma$ ,2n). Другая причина связана с использованием для сечения мониторной реакции данных, полученных в экспериментах на квазимонохроматических фотонах. Как показано при редукционной обработке выходов фотонейтронных реакций в работе [13], эти эксперименты дают значения сечений, заниженные на 10-20%. Положение максимума сечения определяется по эмпирическому соотношению, которое для <sup>59</sup>Со равно 19,3 МэВ. Это соотношение более точно подходит для тяжёлого ядра. Данные, полученные с помощью этого соотношения для тяжёлых ядер, в пределах экспериментальных погрешностей совпадают с экспериментальными данными.

Приведённые данные в табл. 3.9 по сечениям реакций позволяют получить оценку изомерного отношения сечения  $r = \frac{\sigma_m}{\sigma_g}$  реакций, которое составляет при  $E_{\gamma} = 17$  МэВ:  $r = 1,32 \pm 0,04$ . Это значение в пределах экспериментальных погрешностей совпадает с данными по изомерным отношениям выходов. При определении  $r = \frac{\sigma_m}{\sigma_g}$  получаем данные с большими ошибками, чем изомерных отношений выходов реакции. На основе данных, приведённых в табл. 3.9, также можно определить изомерное отношение интегральных сечений реакций, которое равно 1, 19 ± 0, 04.

Для расчёта изомерных отношений выходов использовали программный пакет TALYS-1.6. Общая схема протекания реакции предполагается следующей: вначале происходит поглощение дипольного  $\gamma$ -кванта на ядре с образованием составного ядра, затем происходит испарение нейтрона с образованием возбужденного состояния конечного ядра. Возбуждение дочернего ядра снимается каскадным испусканием  $\gamma$ -квантов с образованием в итоге основного или изомерного состояния конечного ядра.

Плотность ядерных уровней рассчитывали по формуле Бета-Блоха [1], спиновая часть которой имеет вид.

$$\rho(J) = (2J+1) \exp\left[-\frac{(J+1/2)^2}{2\sigma^2}\right]$$

Улучшить количественное согласие расчётов с экспериментом удалось при фиксации параметра спинового ограничения  $\sigma$ . При этом удовлетворительное согласие достигается при  $\sigma \approx 2\hbar$ .

### Изомерные отношения сечений реакций ${}^{59}$ Co(n, 2n) ${}^{58m,g}$ Co.

Сечения реакций <sup>59</sup>Со $(n, 2n)^{58}$ Со изучали в работах [19]. Функции возбуждения полного сечения этих реакций достаточно изучены в работах [17,18]. Несмотря на достаточную информацию о полных сечениях этой реакции, имеется пробел при изучении парциальных сечений этих реакций, т.е. сечений возбуждений изомерного и основного состояний <sup>58m,g</sup>Со. Имеются данные о сечениях реакций <sup>59</sup>Со $(n, 2n)^{58m,g}$ Со, полученных в ранее выполненных работах. В этих работах использовались спектроскопические данные, которые получены с наименьшей точностью. Поэтому остаётся актуальным изучение сечений образования изомерных состояний для этой реакции.

Для определения сечений реакций  ${}^{59}$ Co(n, 2n)<sup>58m,g</sup>Co использовалось соотношение.

$$\alpha = \frac{Y_x(E_{\gamma \max})}{Y_m(E_{\gamma \max})} = \frac{S_x \lambda_x \varepsilon_m I_m \Theta_m N_m F_m}{S_m \lambda_m \varepsilon_x I_x \Theta_x N_x F_x} ..$$

где

$$F(t) = [1 - \exp(-\lambda t_o)] \exp(-\lambda t_f) [1 - \exp(-\lambda t_c)];$$

S – площадь фотопика в  $\gamma$ -спектре;  $\lambda$  =0,693/Т 1/2 – постоянная распада.  $\varepsilon$  – эффективность спектрометра; I – интенсивность  $\gamma$ -квантов данной энергии на распад;  $\theta$  – распространённость используемого изотопа; N – число ядер исследуемого изотопа в образце;  $t_0, t_n, t_c$  – время облучения, паузы и измерения соответственно.

Таблица 5. Сечение реакции  ${}^{59}$ Co $(n, 2n)^{58m,g}$ Co.

**Table 5.** The cross section of the reaction  ${}^{59}\text{Co}(n, 2n){}^{58\text{m,g}}\text{Co}$ .

$E_n$ , МэВ	<i>σ<sub>m,g</sub></i> , мб	$\sigma_m$ , мб	$\sigma_g$ , мб	$\sigma_m/\sigma_g$	Источник
14,7		428 ±24	231±10		[20]
14,05	729±29	-	-	-	[21]
14,5	766±7	-	-	2,22±0,12	[22]
14,00-14,25	704±15	-	-	-	[23]
14,3	753±13	-	-	2,1±0,30	[19]
14,5	707±70	380	-	-	[24]
12,97	-	390±37	-	0,75±0,06	[25]
14,01	672±13	-	-	-	[26]
15.75	730±68	-	-	-	
14,1	726±20	458±17	268±10	1,71±0,06	Настоящая
					работа
14,0*	686	426	259	1,64	Настоящая
					работа
14,5*	740	456	284	1,60	Настоящая
					работа

Примечание. \*Расчет сечений проводился по программе TALYS-1.6.

Note. \*The cross-section calculations were performed using the TALYS-1.6 program.

Как видно из таблицы 4, результаты по полному сечению реакций, полученные в последние годы, в пределах погрешностей измерения согласуются между собой. Ранее полученные данные завышены. Это может быть связано с принятой в этих расчётах ошибочной или меньшей точностью данных о распаде изомерных пар <sup>58m,g</sup>Co. В нашем случае также использовался программный пакет TALYS-1.6, результаты которого также приведены в таблице 4. Результаты этих теоретических расчётов также совпадают с экспериментальными данными.

На рис. 3.10 и 3.11 приведены функции возбуждения реакций  ${}^{59}$ Co $(n, 2n)^{58g}$ Co и  ${}^{59}$ Co $(n, 2n)^{58m}$ Co, полученные с помощью программного пакета TALYS-1.6.







**Рис. 5.** Сечения реакции  ${}^{59}$ Co(n, 2n) ${}^{58m}$ Co, полученные с помощью программного пакета TALYS-1.6. **Fig.1.** Cross sections of the reaction  ${}^{59}$ Co(n, 2n) ${}^{58m}$ Co, obtained using the TALYS-1.6 program.

#### Результаты

Результаты, полученные в настоящей работе, могут быть использованы для решения прикладных задач, а также при планировании экспериментов по изучению изомерных отношений выходов и сечений фотоядерных реакций, реакций с быстрыми нейтронами и при изучении механизма ядерных реакций.

#### Заключение

Из анализа данных, приведённых в табл. 2 и 3, следует, что экспериментальные исследования возбуждения изомерных состояний в фотоядерных реакциях типа ( $\gamma$ ,n) на ядре <sup>59</sup>Со проводили в основном в области энергий 10–25 МэВ, т.е. в области гигантского дипольного резонанса. В области энергий выше гигантского резонанса энергетическая зависимость изомерных отношений мало изучена. Благодаря этим исследованиям можно получить информацию о плотности ядерных уровней и о вкладе прямых процессов в механизм фотоядерных реакций в данной области энергий.

#### Вклад авторов.

18 of 19

Концептуализация, С.П. и С.А.; методология, С.П.; программное обеспечение, С.А.; валидация, С.П., Т. Ахмаджанов и О.Т.; формальный анализ, С.А.; исследование, Т. Ахмаджанов; ресурсы, С.П.; кураторство данных, О.Т.; написание оригинального текста, С.А.; написание и редактирование, С.П. и О.Т.; визуализация, Т. Ахмаджанов; руководство, С.П.; администрирование проекта, С.П.; привлечение финансирования, не применимо. Все авторы ознакомлены с опубликованной версией рукописи и согласны с ней.

#### Authors' contribution.

Conceptualization, S.P. and S.A.; methodology, S.P.; software, S.A.; validation, S.P., T. Akhmadzhanov and O.T.; formal analysis, S.A.; research, T. Akhmadzhanov; resources, S.P.; data curation, O.T.; writing the original text, S.A.; writing and editing, S.P. and O.T.; visualization, T. Akhmadzhanov; management, S.P.; project administration, S.P.; fundraising, not applicable. All authors have read the published version of the manuscript and agree with it.

#### Благодарности

В заключение автор выражает благодарность М. Каюмову и О. Жура-еву за облучение образцов на нейтронном генераторе, Ж. Рахмонову за помощь в измерениях, С.В. Артемову за полезные обсуждения.

#### Acknowledgments

In conclusion, the author expresses gratitude to M. Kayumov and O. Zhuraev for irradiating the samples on the neutron generator, to J. Rakhmonov for assistance with measurements, and to S.V. Artemov for valuable discussions.

#### Сокращения

 γ
 гамма-лучи

 n
 нейтрон

 МэВ
 Мегаэлектронвольт

 CoCl2
 хлорид кобальта

#### Литература

- Mazur V.M. (2000). Excitation of isomeric nuclear states in photon-neutron reactions in the giant dipole resonance region. Journal of Experimental and Theoretical Physics, 31(2), 1043–429.
- [2] Palvanov S.R., Razhabov O., Isomeric yield ratios of photonuclear reactions at  $E_{\gamma max}$  25 and 30 MeV, Atomic Energy, 1999, 87, 01, 533–536.
- [3] Palvanov S.R., Excitation of isomeric states in the (, n), (n, 2n), and (, 2n) reactions on the <sup>113</sup>In nucleus, Physics of Atomic Nuclei, 2014, 77, 01, 35–38.
- [4] Davyidov M.G., Magera V.G., Trukhov A.V., Isomeric yield ratios of photonuclear reactions for gammaactivation analysis, Atomic Energy, 1987, 62, 04, 236–243.
- [5] Davyidov M.G., Hamraev F.Sh., Shomurodov E.M., Yields and cross sections of cobalt photoactivation, Atomic Energy, 1987, 63, 01, 44–47.
- [6] Ghosh R., Lawriniang B., Badwar S., Measurement and uncertainty propagation of the (,n) reaction cross-section of <sup>58</sup>Ni and <sup>59</sup>Co at 15 MeV bremsstrahlung, Radiochimica Acta, 2017, 10, 2855–2860.
- [7] Lederer C.S.V., Table of Isotopes, Wiley & Sons, Inc., , 2000.
- [8] Firestone R.B., Shirley V.S., Table of Isotopes, 8th, J. Wiley and Sons, , 1996.
- [9] ENSDF Evaluated Nuclear Structure Data File, https://www.nndc.bnl.gov/ensdf/, Accessed: 2024-10-10.
- [10] Vanska R., Rieppo R., The experimental isomeric cross-section in the nuclear activation technique, Nuclear Instruments and Methods, 1981, 179, 525–532.
- [11] Varlamov V.V., Davydov A.I., Makarov M.A., Orlin V.N., Peskov N.N., = Reliability of data on partial photoneutron reaction cross sections for nuclei <sup>63,65</sup>Cu and <sup>80</sup>Se, Izvestiya RAN. Physics Series, 2016, 80, 3, 351–359.
- [12] Varlamov A.V., Varlamov V.V., Rudenko D.S., Stepanov M.E., Atlas of Giant Dipole Resonances: Parameters and Graphs of Photonuclear Reaction Cross Sections, INDC (NDS)-394, IAEA, 1999, 331.
- [13] Varlamov V.V., Davydov A.I., Ishkhanov B.S., Photoneutron cross sections for <sup>59</sup>Co: Systematic uncertainties of data from experiments, European Physical Journal A, 2017, 53, 180–187.

- [14] Center for Photonuclear Experiments Data (CDFE), http://cdfe.sinp.msu.ru/index.ru.html, Accessed: 2024-10-10.
- [15] Schiff L.I., Energy Angle Distribution of Thin Target Bremsstrahlung, Physical Review, 1951, 83, 02, 252–253.
- [16] Kovalev V.P., Vtornichnye izlucheniya uskoriteley elektronov, Atomizdat, , 1979, 198.
- [17] TALYS, http://www.talys.eu, Accessed: 2024-10-10
- [18] Varlamov V.V., Ishkhanov B.S., Giant dipole resonance in photonuclear experiments of various types: discrepancies, reasons, methods of overcoming, and consequences, Physics of Particles and Nuclei, 2004, 35, 04, 459–479.
- [19] Ryves T.B., Kolkowski P., Judge S.M., Cobalt cross sections for 14 MeV neutrons, Annals of Nuclear Energy, 1988, 15, 012, 561–565.
- [20] Bahal B.M., Pepelnik R., Cross section measurements of Cr, Mn, Fe, Co, Ni for an accurate determination of these elements in natural and synthetic samples using a 14 MeV neutron generator, GKSS, 1985, http://cdfe.sinp.msu.ru/cgi-bin/exf2htm?LINK=21936019&SOURCE=ON.
- [21] Kimura I., Kobayashi K., Calibrated fission and fusion neutron fields at the Kyoto University Reactor, Nuclear Science and Engineering, 1990, 106, 332–336.
- [22] Hasan S.J., Pavlik A., Winkler G., Uhl M., Kaba M., Precise measurement of cross sections for the reactions <sup>59</sup>Co(n,2n) and <sup>59</sup>Co(n,p) <sup>59</sup>Fe around 14 MeV, Journal of Physics, Part G: Nuclear and Particle Physics, 1986, 12, 397–404.
- [23] Vonach H., The <sup>27</sup>Al(n,)<sup>24</sup>Na cross section, Nuclear Data Standards for Nuclear Measurements, 1991, Nuclear Energy Agency Organization for Economic Co-operation and Development, 78–79.
- [24] Bychkov V.M., Manokhin V.N., Pashchenko A.B., Plyaskina V.I., Secheniya porogovykh reaktsiy, vyzyvayemykh neytronami, Energoizdat, 1982, 216.
- [25] Sudar S., Qaim S.M., Isomeric Cross Section Ratio for the Formation of <sup>58m,g</sup>Co in Neutron, Proton, Deuteron and Alpha-Particle Induced Reactions in the Energy Region Up to 25 MeV, Physical Review C, Nuclear Physics, 1996, 53, 06, 2885.
- [26] Michal K., Tomáš C., Petr A., Measurement of dosimetrical cross sections with 14.05 MeV neutrons from compact neutron generator, Annals of Nuclear Energy, 2023, 191, 109904–109909.
- [27] Yerraguntla S.S., Naik H., Karantha M., Ganesan S., Saraswatula S.V., Nair, S.N.P., Measurement and covariance analysis of <sup>59</sup>Co(n,2n)<sup>58</sup>Co reaction cross sections at the effective neutron energies of 11.98 and 15.75 MeV, Radiochimica Acta, 2018, 106, 877–882.

Отказ от ответственности/Примечание издателя: Заявления, мнения и данные, содержащиеся во всех публикациях, принадлежат исключительно отдельным лицам. Авторы и участники, а Журнал и редакторы. Журнал и редакторы не несут ответственности за любой ущерб, нанесенныйлюдей или имущество, возникшее в результате любых идей, методов, инструкций или продуктов, упомянутых в контенте.

**Disclaimer of liability/Publisher's Note:** The statements, opinions and data contained in all publications belong exclusively to individuals. The authors and participants, and the Journal and the editors. The journal and the editors are not responsible for any damage caused to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products mentioned in the content.