

Фотоядерные реакции на изотопе иттрия ^{89}Y

С. С. Бельшев², Б. С. Ишханов^{1,2}, А. А. Кузнецов^{1,2,*}

А. А. Просняков², А. Д. Федорова², В. В. Ханкин¹, Н. Ю. Фурсова¹

¹Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына МГУ имени М. В. Ломоносова
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра общей ядерной физики
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Статья поступила 26.06.2019; Подписана в печать 27.06.2019)

В работе выполнено экспериментальное исследование фоторасщепления ^{89}Y . Измерены абсолютные выходы и средние сечения, взвешенные по тормозному спектру, для фотонейтронных реакций на изотопе ^{89}Y при верхней границе спектра тормозных фотонов 55 МэВ. Выполнено сравнение измеренных выходов и средних сечений, взвешенных по тормозному спектру, с выходами реакций, рассчитанных из теоретических сечений фотонейтронных реакций на основе модели TALYS, а также с результатами экспериментов, выполненных на пучках квазимонохроматических фотонов.

PACS: 25.20.-x

УДК: 539.172.3

Ключевые слова: фотоядерные реакции, гамма-активационный анализ, сечения реакций.

ВВЕДЕНИЕ

Фотоядерные реакции на изотопе ^{89}Y ранее были исследованы в нескольких работах [1–8]. Сечения фотонейтронных реакций ^{89}Y исследовалось в ряде экспериментов на пучках квазимоноэнергетических фотонов [1, 2], тормозного γ -излучения [3] и на пучке моноэнергетических меченых фотонов [4]. Также на пучках тормозных фотонов методом наведенной активности измерялись выходы фотоядерных реакций на изотопе ^{89}Y [5–8]. На рис. 1,а показано сравнение сечений реакции выхода нейтронов $\sigma(\gamma, Xn) = \sigma(\gamma, 1n) + 2\sigma(\gamma, 2n)$, полученных в экспериментах [1, 2], с сечением, рассчитанным по программе TALYS [9]. Следует отметить в целом хорошее согласие в положении максимумов сечения (γ, Xn) . Следует отметить различие в величинах максимумов сечений реакции (γ, Xn) , измеренных в [1, 2]. Сечение реакции, измеренное в Сакле [2] — 225.0 мб на 15% больше сечения, измеренного в Ливерморе [1] — 184.5 мб. На рис. 1,б,в,г показаны сечения реакций $\sigma(\gamma, Sn) = \sigma(\gamma, 1n) + \sigma(\gamma, 2n)$, $\sigma(\gamma, 1n)$, $\sigma(\gamma, 2n)$, измеренные на пучках квазимоноэнергетических фотонов. Различие в величинах максимумов сечений реакции (γ, Xn) естественно проявляется и в сечениях реакций $(\gamma, 1n)$ и $(\gamma, 2n)$, измеренных в Сакле и Ливерморе. Величины сечений и интегральные сечения этих реакций также различаются на 15–20%.

Наблюдаемые расхождения в сечениях реакций (γ, n) и $(\gamma, 2n)$, полученных на пучках квазимоноэнергетических фотонов, на изотопе ^{89}Y [1, 2] обусловлены систематическими погрешностями в определении множественности нейтронов на основании измерений их кинетических энергий [10, 11]. Часть нейтро-

нов, образующихся в реакции с вылетом двух нейтронов, идентифицируется как вклад реакции с вылетом одного нейтрона.

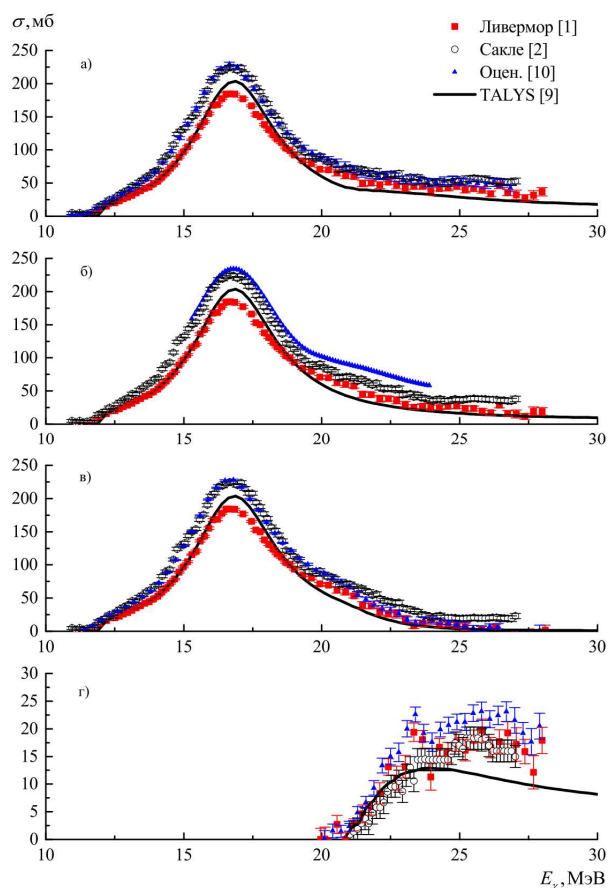


Рис. 1: Сечения реакций: а — $\sigma(\gamma, Xn)$, б — $\sigma(\gamma, Sn)$, в — $\sigma(\gamma, 1n)$, г — $\sigma(\gamma, 2n)$, измеренные в Ливерморе [1], Сакле [2], оцененные сечения [10] и сечения рассчитанные по программе TALYS [9]

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

В настоящей работе были получены абсолютные выходы фотонейтронных реакций на изотопе ^{89}Y на тормозном пучке гамма-квантов от электронного ускорителя РТМ55 с верхней границей спектра 55 МэВ. Для измерения выходов реакций применялся гамма-активационный метод, в котором реакция идентифицируется по распаду конечного ядра. Этот метод лишен недостатков описанного выше метода прямой регистрации нейтронов. Выполнено сравнение измеренных абсолютных выходов и средних сечений, взвешенных по тормозному спектру, с выходами реакций, рассчитанных из теоретических сечений фотонейтронных реакций на основе модели TALYS, а также с результатами экспериментов, выполненных на пучках квазимонохроматических фотонов.

1. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Ранее нами был реализован прямой метод измерения выходов реакций различной множественности непосредственно по конечным ядрам реакций [12, 13]. Эксперимент по γ -активационному анализу продуктов фоторасщепления изотопа ^{89}Y был выполнен на разрезном микротроне РТМ55 НИИЯФ МГУ при энергии электронов ускорителя 55 МэВ [14].

Облучаемая мишень имела размеры: диаметр 22.5 мм и толщину 2.8 мм и представляла собой спрессованный порошок оксидов иттрия Y (82.5%), иттербия Yb (15%) и эрбия Er (2.5%). Для определения абсолютных выходов исследуемых реакций в пучке одновременно облучалась медная фольга [15]. Тормозной пучок фотонов образовывался на вольфрамовой мишени толщиной 0.2 мм. Облучение продолжалось в течение 10 мин. при среднем токе электронов ~ 70 нА. После облучения мишень перемещалась в специальное низкофоновое помещение, где на детекторе из сверхчистого германия HPGe проводилось измерение спектров γ -квантов изотопов, образовавшихся в облученной мишени. Суммарная продолжительность измерения спектров γ -квантов составляла 24 дня. В течение этого времени данные записывались в память запоминающего устройства с интервалом 3.2 сек.

В результате фотонейтронных реакций на изотопе ^{89}Y образуются более легкие изотопы $^{83-88}\text{Y}$, имеющие различные периоды полураспада и характерные энергии γ -распадов. Анализ продуктов распадов изотопа иттрия ^{89}Y проводился на основе характерных γ -линий изотопов и их периодов полураспада. На рис. 2 показаны спектры γ -квантов, измеренные в различные интервалы времени после окончания облучения. Экспериментальные выходы рассчитывались на основе соотношения:

$$Y = \frac{N_0}{e^{-\lambda t_1} \int_0^{t_1} I(t) e^{\lambda t} dt}, \quad (1)$$

где t_1 — время облучения, N_0 — число радиоактив-

ных ядер исследуемого изотопа на момент окончания облучения.

$$N_0 = \frac{S}{k(e^{-\lambda(t_2-t_1)} - e^{-\lambda(t_3-t_1)})}, \quad (2)$$

где S — площадь фотопика в спектрах остаточной активности, соответствующего γ -переходу при распаде конечного ядра за время измерения, 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.

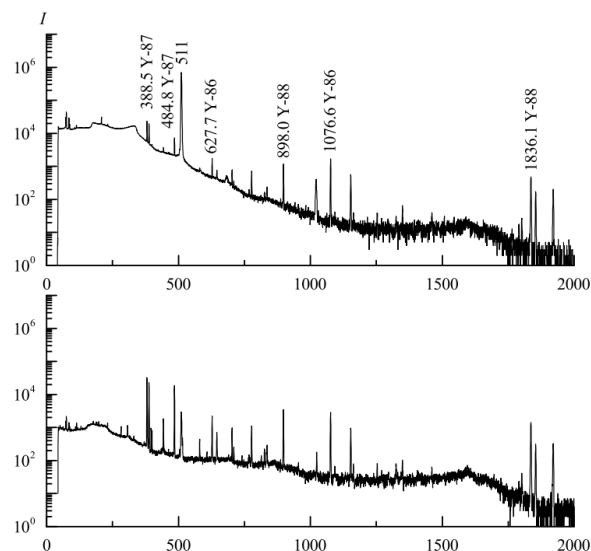


Рис. 2: Спектр γ -квантов от облученного образца ^{89}Y , измеренный HPGe спектрометром через 5 мин и 12 часов (сверху вниз) после облучения. Время измерения — 3 часа. Надписи над пиками — энергии γ -линий в кэВ и соответствующие им радиоизотопы иттрия

2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В табл. 1 приведены рассчитанные на основе соотношения (1) абсолютные выходы фотоядерных реакций в области энергий до 55 МэВ на изотопах иттрия. Здесь же для сравнения приведены выходы реакций $(\gamma, 1n)$ – $(\gamma, 4n)$ рассчитанные по программе TALYS на основе соотношения (3):

$$Y(in) = \alpha \int_{E_{nop}}^{55 \text{ МэВ}} \sigma(\gamma, in) \Phi(E_\gamma, 55 \text{ МэВ}) dE_\gamma, \quad (3)$$

где α — нормировочная константа, учитывающая характеристики мишени и тормозного спектра γ -квантов, $\sigma(\gamma, in)$ — сечение исследуемой реакции, $\Phi(E_\gamma, 55 \text{ МэВ})$ — плотность распределения числа тормозных фотонов с энергией E_γ на 1 электрон ускорителя.

Таблица I: Абсолютные экспериментально измеренные выходы фотонейтронных реакций на ядре ⁸⁹Y, выходы, рассчитанные на основе теоретических сечений рассчитанных по модели TALYS

Изотоп	Реакция	Y _{эксп.} , 1/e-	YTALYS, 1/e-
⁸⁸ Y	⁸⁹ Y(γ, 1n) ⁸⁸ Y	(5.05±0.25)·10 ⁻⁶	5.66·10 ⁻⁶
⁸⁷ Y	⁸⁹ Y(γ, 2n) ⁸⁷ Y	(5.76±0.27)·10 ⁻⁷	4.55·10 ⁻⁷
⁸⁶ Y	⁸⁹ Y(γ, 3n) ⁸⁶ Y	(6.96±0.24)·10 ⁻⁸	7.34·10 ⁻⁸
⁸⁵ Y	⁸⁹ Y(γ, 4n) ⁸⁵ Y	(1.09±0.09)·10 ⁻⁸	1.41·10 ⁻⁸

Таблица II: Параметры аппроксимации сечений реакции ⁸⁹Y(γ,1n)⁸⁸Y, полученные на основе экспериментальных сечений [1, 2, 4], оцененных [10] и теоретических сечений [9]. E_m - положение максимума сечения, σ_m - величина сечения в максимуме, Γ - ширина резонанса, σ_{8=B...} - интегральное сечение реакции в области энергий до 55 МэВ

Параметр	Ливермор [1]	Сакле [2]	Young [4]	TALYS [9]	Оцен. [10]
E _m , МэВ	16.81 ± 0.06	16.80 ± 0.02	16.81 ± 0.04	16.84 ± 0.02	16.92 ± 0.06
σ _m , мб	198 ± 8	226 ± 2	207 ± 4	208 ± 2	246 ± 13
Γ, МэВ	3.29 ± 0.15	4.28 ± 0.07	3.55 ± 0.11	3.46 ± 0.04	3.58 ± 0.16
σ _{8=B...} , мб	955	1384	1066	961	1282

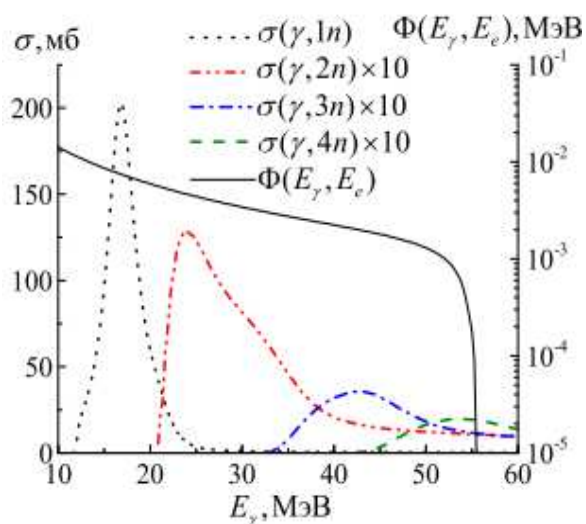


Рис. 3: Плотность распределения числа тормозных фотонов Φ(E_γ, 55 МэВ) на один электрон ускорителя при энергии электронов ускорителя 55 МэВ, рассчитанная с помощью GEANT4. Сечения реакций ⁸⁹Y(γ, 1n)-(γ, 4n), рассчитанные с помощью программы TALYS

На рис. 3 приведен рассчитанный по программе GEANT4 [16] тормозной спектр для использованной нами тормозной мишени. Здесь же для сравнения приведены рассчитанные по программе TALYS [9] сечения реакций (γ, 1n), (γ, 2n), (γ, 3n), (γ, 4n).

Измеренный в настоящей работе выход реакции (γ, 1n) можно сравнить с интегральными сечениями реакции (γ, 1n), определенными в работах [1, 2, 4], а также рассчитанным по программе TALYS [9] и оценен-

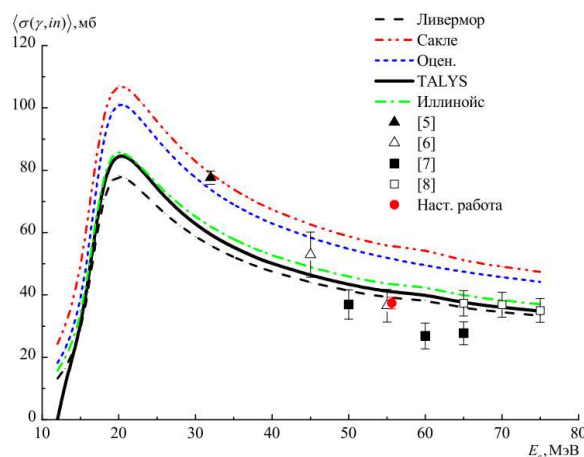


Рис. 4: Рассчитанные на основе параметров Лоренцевских кривых средние сечения, взвешенные по тормозному спектру, для реакции ⁸⁹Y (γ, 1n) в зависимости от энергии электронов ускорителя (линии). Точками показаны средние сечения, полученные в настоящей работе и в работах [5–8]

ным сечением [10]. Для этого на основе наших данных были рассчитаны средние сечения фотоядерных реакций <σ(E_γ, in)> взвешенных по тормозному спектру от порога реакции до максимальной энергии тормозного спектра:

$$\langle \sigma(E_\gamma, in) \rangle = \frac{\int_{E_{nop}}^{55 \text{ МэВ}} \sigma(E_\gamma, in) \Phi(E_\gamma, 55 \text{ МэВ}) dE_\gamma}{\int_{E_{nop}}^{55 \text{ МэВ}} \Phi(E_\gamma, 55 \text{ МэВ}) dE_\gamma} \quad (4)$$

Т.к. сечения реакции (γ, 1n) в работах [1, 2, 4, 10] были измерены в разных энергетических интервалах, сечения этих реакций аппроксимировались кривыми

Таблица III: Средние сечения, взвешенные по тормозному спектру, $\langle \sigma(E_\gamma, in) \rangle$ для реакций $^{89}\text{Y}(\gamma, 1n) - (\gamma, 4n)$, полученные в настоящей работе, средние сечения, рассчитанные на основе аппроксимации экспериментальных [1, 2, 4], оцененных [10] и теоретических сечений [9] в области энергий до 55 МэВ

	Наст. раб.	Ливермор [1]	Сакле [2]	Young [4]	TALYS [9]	Оцен. [10]
$\langle \sigma(E_\gamma, 1n) \rangle$	37.4 ± 1.9	40.0	56.8	44.4	41.9	53.0
$\langle \sigma(E_\gamma, 2n) \rangle$	7.81 ± 0.37				6.4	
$\langle \sigma(E_\gamma, 3n) \rangle$	2.06 ± 0.07				2.17	
$\langle \sigma(E_\gamma, 4n) \rangle$	0.717 ± 0.063				1.00	

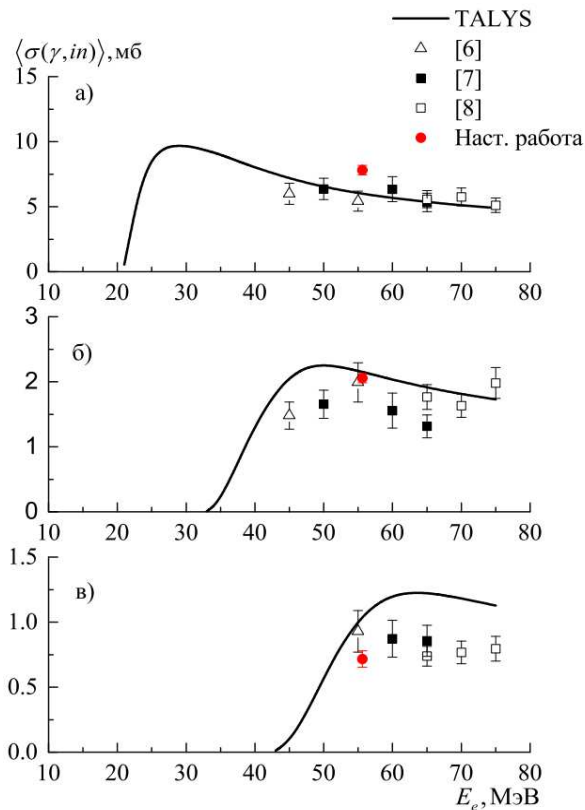


Рис. 5: Средние сечения, взвешенные по тормозному спектру, для реакций $^{89}\text{Y}(\gamma, 2n) - (\gamma, 4n)$, рассчитанные по программе TALYS и средние сечения, полученные в настоящей работе и работах [5–8]

Лоренца:

$$\sigma(E_\gamma, in) = \frac{\sigma_m E_\gamma^2 \Gamma^2}{E_\gamma^2 \Gamma^2 + (E_\gamma^2 - E_m^2)^2} \quad (5)$$

где E_m — положение максимума сечения, σ_m — величина сечения в максимуме, Γ — ширина резонанса.

Параметры сечений подбирались так, чтобы максимально близко описывать экспериментальные данные. В табл. 2 приведены параметры Лоренцевских кривых, аппроксимирующих экспериментальные данные, рассчитанные на их основе интегральные сечения реакции $(\gamma, 1n)$. В табл. 3 приведены средние сечения реакций $(\gamma, 1n) - (\gamma, 4n)$, рассчитанные на основе соотношения (4).

Для сравнения с результатами других активационных экспериментов [5–8] были рассчитаны средние сечения, взвешенные по тормозному спектру, в зависимости от энергии электронов ускорителя. На рис. 4 приведены средние сечения, взвешенные по тормозному спектру, реакции $^{89}\text{Y}(\gamma, 1n)$, рассчитанные на основе параметры Лоренцевских кривых из табл. 4, и средние сечения, взвешенные по тормозному спектру, полученные в настоящей работе и работах [5–8]. На рис. 5 приведены средние сечения, взвешенные по тормозному спектру, реакций $(\gamma, 2n) - (\gamma, 4n)$, рассчитанные по программе TALYS и средние сечения, взвешенные по тормозному спектру, полученные в настоящей работе и работах [5–8].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассчитанное в настоящей работе среднее сечение, взвешенное по тормозному спектру, для фотонейтронной реакции $(\gamma, 1n)$ согласуется с результатами расчета по программе TALYS и сечениями из работ [1, 4]. Для среднего сечения, взвешенного по тормозному спектру, для фотонейтронной реакции $(\gamma, 2n)$ такое сравнение затруднено из-за отсутствия данных выше 28 МэВ и невозможности описать сечение этой реакции Лоренцевской кривой. Средние сечения, взвешенные по тормозному спектру, для реакций $(\gamma, 2n) - (\gamma, 4n)$, полученные в нашей работе, хорошо согласуются с данными других активационных экспериментов [5–8] и с расчетами по программе TALYS [9].

[1] Berman B. L., Caldwell J. T., Harvey R. R., Kelly M. A., Bramblett R. L., Fultz S. C. // Phys. Rev. 1967. **162**.

P. 1098.

[2] Lepretre A., Beil H., Bergere R., Carlos P., Veysiere A.,

- Sugawara M.* // Nucl. Phys. A. 1971. **175**. P. 609.
- [3] *Ишханов Б. С., Капитонов И. М., Лазутин Е. В., Пискарев И. М., Шевченко О. П.* // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1970. **34**. С. 2232.
- [4] *Young L.M.* // PhD Thesis, Champaign: Illinois University, 1972.
- [5] *Rahman A., Kato K., Arima H., Shigyo N., Ishibashi K., Hori J., Nakajima K.* // J. Nucl. Sci. Tech. 2010. **47**. P. 618.
- [6] *Zaman M., Kim G., Naik H., Kim K., Shin S.-G., Tatari M., Cho M.-H.* // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2014. **299**. P. 1739.
- [7] *Zaman M., Kim G., Kim K., Shahid M., Naik H., Yang S., Shin S.-G., Cho M.-H.* // J. Korean Phys. Soc. 2015. **67**. P. 1482.
- [8] *Tatari M., Naik H., Kim G., Kim K., Shin S.-G., Cho M.-H.* // Radiochim. Acta. 2017. **105**. P. 789.
- [9] *Konig A.J., Hilaire S., Duijvestijn M.C.* // Proc. Intern. Conf. on Nuclear Data for Science and Technology. (Nice, France, 2008). P. 211.
- [10] *Варламов В. В., Давыдов А. И., Орлин В. Н., Песков Н. Н.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. **81**. С. 738.
- [11] *Варламов В. В., Ишханов Б. С., Орлин В. Н., Четверткова В. А.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2010. **74**. С. 875.
- [12] *Бельшев С. С., Стопани К. А., Троицев С. Ю., Курилик А. С., Кузнецов А. А.* // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2011. № 4. С. 42.
- [13] *Belyshev S. S., Ermakov A. N., Ishkhanov B. S., Khankin V. V., Kurilik A. S., Kuznetsov A. A., Shvedunov V. I., Stopani K. A.* // Nucl. Instrum. Methods. A. 2014. **745**. P. 133.
- [14] *Raevsky V. G., Karev A. I., Lebedev A. N.* // Proc. XXII Russian Particle Accelerator Conf. Rupac-2010. (Novosibirsk, Budker INP, 2010). p. 316.
- [15] *Filipescu D., Anzalone A., Balabanski D. L., Belyshev S. S., Camera F., La Cognata M., Constantin P., Csige L., Cuong P. V., Cwiok M. et al.* // Eur. Phys. J. A. 2015. **51**. P. 67.
- [16] *Agostinelli S., Allison J., Amako K., Apostolakis J., Araujo H., Arce P., Asai M., Axen D., Banerjee S., Barrand G. et al.* // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 2003. **506**. P. 250.

Photonuclear reactions on the yttrium isotope ^{89}Y

S. S. Belyshev², B. S. Ishkhanov^{1,2}, A. A. Kuznetsov^{1,2,a}, A. D. Fedorova², A. A. Prosnjakov², N. J. Fursova¹, V. V. Khankin¹

¹*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*

²*Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*

E-mail: ^akuznets@depni.sinp.msu.ru

This paper presents the experimental research photodisintegration on the yttrium isotope ^{89}Y . The absolute yields and average cross sections weighted by the bremsstrahlung spectrum for photoneutron reactions at the upper limit of the spectrum of the bremsstrahlung photons of 55 MeV are measured. Comparison of measured yields and average cross sections weighted by the bremsstrahlung spectrum was made with the yields of reactions calculated from theoretical sections of photoneutron reactions based on the TALYS model, as well as with the results of experiments performed on quasimonochromatic photons.

PACS: 25.20.-x.

Keywords: photonuclear reactions, gamma activation analysis, cross section evaluation.

Received 26.06.2019.

Сведения об авторах

1. Бельшев Сергей Сергеевич — ассистент ; тел.: (495) 939-25-58, e-mail: belyshev@depni.sinp.msu.ru.
2. Ишханов Борис Саркисович — доктор физ.-мат. наук, профессор, ; тел.: (495) 939-50-95, e-mail: bsi@depni.sinp.msu.ru.
3. Кузнецов Александр Александрович — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 939-25-58, e-mail: kuznets@depni.sinp.msu.ru.
4. Просняков Александр Александрович — аспирант; тел.: (495) 939-25-58, e-mail: aa.prosnjakov@physics.msu.ru.
5. Федорова Анна Дмитриевна — студент; тел.: (495) 939-25-58, e-mail: anna.fedorova@physics.msu.ru.
6. Фурсова Надежда Юрьевна — студент; тел.: (495) 939-25-58, e-mail: nfursova@bk.ru.
7. Ханкин Вадим Валерьевич — науч. сотрудник; тел.: (495) 939-24-51, e-mail: v-k32@yandex.ru.