

## ИССЛЕДОВАНИЕ СРЕДНЕВЗВЕШЕННЫХ СЕЧЕНИЙ ДЛЯ РЕАКЦИЙ НА $^{93}\text{Nb}$ НА ТОРМОЗНОМ ПУЧКЕ ЛУЭ-75

© 2021 г. А. Э. Аветисян<sup>1)</sup>, Р. В. Аветисян<sup>1)\*</sup>, А. Г. Барсегян<sup>1)</sup>, Ю. А. Гарибян<sup>1)</sup>,  
А. В. Горджинян<sup>1)</sup>, Р. К. Даллакян<sup>1)</sup>, И. А. Керобян<sup>1)</sup>, А. А. Мкртчян<sup>1)</sup>

Поступила в редакцию 14.07.2020 г.; после доработки 30.07.2020 г.; принята к публикации 30.07.2020 г.

Исследования сечения гамма-нейтронных реакций на ядре Nb выполнены на тормозном пучке линейного ускорителя электронов ЛУЭ-75 Научной национальной лаборатории им. А. Алиханяна (Ереванский физический институт) при энергии электронов 30 и 40 МэВ. Измерения сечений реакций  $^{\text{nat}}\text{Nb}(\gamma, xn)^{90g,91m,92m}\text{Nb}$  проводились активационным методом с последующим спектрометрическим анализом с использованием сверхчистого германиевого детектора (HPGe). Значения сечений для различных энергий фотонного пучка определялись посредством ядерных кодов TALYS 1.95 и EMPIRE 3.2. Энергетическое распределение фотонных спектров было получено при помощи пакета GEANT4. Полученные экспериментальные и теоретические результаты сравнены с имеющимися данными других авторов. Хорошее согласие наблюдается как между теоретическими и экспериментальными результатами, так и с данными других авторов. Данные относительно сечения реакции  $^{\text{nat}}\text{Nb}(\gamma, 2n)^{91m}\text{Nb}$  получены впервые.

DOI: 10.31857/S0044002721020033

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Реакции, вызванные фотонами, являются одним из источников информации относительно структуры ядра и механизма протекания реакции. Интерес к ниобию обусловлен тем, что этот элемент находит широкое применение в различных отраслях промышленности, а именно в машиностроении, приборостроении, в атомной энергетике и т.д. Такое свойство ниобия, как малое сечение радиационного захвата тепловых нейтронов ( $1.5 \times 10^{-24}$  см<sup>2</sup>), объясняет его применение в конструктивных элементах атомных реакторов.

Имеющиеся в литературе данные относительно взаимодействия ниобия с фотонным пучком относятся в основном к моноэнергетическим фотонам. С этой точки зрения представляют интерес как экспериментальные, так и теоретические данные по взаимодействию тормозных фотонов с ядрами ниобия.

### 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОЦЕДУРА

Эксперимент был выполнен на тормозном пучке линейного ускорителя электронов ЛУЭ-75 Национальной научной лаборатории им. А. Алиханяна (Ереванского физического института) при

двух значениях энергий пучка электронов — 30 и 40 МэВ. Длительность импульса составляет 0.7 мкс. Подробное описание и технические характеристики ЛУЭ-75 и пучка электронов опубликованы ранее [1]. В качестве конвертора для получения тормозного фотонного пучка был использован тантал. Оптимальная толщина танталового конвертора была вычислена при помощи программного пакета GEANT4 [2], исходя из требования максимальной выходы числа фотонов, и составляла 2 мм [3]. За танталовым конвертором было установлено мишенное устройство, в котором последовательно были расположены пластины из натуральной меди ( $^{65}\text{Cu}$  — 30.83%,  $^{63}\text{Cu}$  — 69.17%) в качестве монитора фотонного пучка и самой мишени из натурального ниобия ( $^{93}\text{Nb}$  — 100%). Физические параметры мишеней из меди и ниобия, а также энергия, ток пучка и длительности облучения приведены в табл. 1.

В табл. 2 приведены пороги реакций, периоды полураспадов радиоактивных изотопов, типы распадов, энергии  $\gamma$ -линий и их интенсивности для ядер-продуктов реакции, а также ядра-монитора. Характеристические данные относительно распадов для ядер-продуктов реакции взяты из таблицы NuDat 2.8 [4].

Были исследованы все конечные продукты реакций  $^{\text{nat}}\text{Nb}(\gamma, xn)$ , у которых пороги ниже максимальной энергии тормозного пучка. В качестве монитора рассматривается канал реакции

<sup>1)</sup>Национальная научная лаборатория им. А. Алиханяна (Ереванский физический институт), Армения.

\*E-mail: rave@mail.yerphi.am

**Таблица 1.** Параметры мишеней  $^{nat}\text{Nb}$  и  $^{nat}\text{Cu}$ 

Нуклид	Энергия пучка, МэВ	Ток пучка, мкА	Длительность облучения, ч	Размер мишени, см	Толщина мишени, мкм	Масса мишени, г
$^{nat}\text{Nb}$	30	0.3	2	$2.5 \times 2.3$	150	0.65
	40	1.1	1	$2.5 \times 2.5$	150	0.72
$^{nat}\text{Cu}$	30	0.3	2	$2.5 \times 2.5$	40	0.23
	40	1.1	1	$2.5 \times 2.5$	40	0.23

**Таблица 2.** Характеристики нуклидов — продуктов реакции

Реакция	Порог реакции, МэВ	Ядро-продукт	Период полураспада ( $T_{1/2}$ )	Тип распада	$E_\gamma$ , кэВ	$I_\gamma$ , %
$^{65}\text{Cu}(\gamma, n)$	10	$^{64}\text{Cu}$	12.7 ч	$\beta^+$ (61%) $\beta^-$ (39%)	511	35.2
$^{93}\text{Nb}(\gamma, 3n)$	28.76	$^{90g}\text{Nb}$	14.6 ч	$\beta^+$ (100%)	1129.22	92.7
					2318.96	82
$^{93}\text{Nb}(\gamma, 3n)$	28.89	$^{90m}\text{Nb}$	18.8 с	IT (100%)	124.67	100
$^{93}\text{Nb}(\gamma, 2n)$	16.71	$^{91g}\text{Nb}$	680 лет	EC (100%)	511	0.34
$^{93}\text{Nb}(\gamma, 2n)$	16.82	$^{91m}\text{Nb}$	60.86 сут	IT (96.6%) EC (3.4%)	1204.67	2
$^{93}\text{Nb}(\gamma, n)$	8.83	$^{92g}\text{Nb}$	$3.47 \times 10^7$ лет	$\beta^+$ (99.95%) $\beta^-$ (0.05%)	561.1	100
					934.5	74
$^{93}\text{Nb}(\gamma, n)$	8.96	$^{92m}\text{Nb}$	10.15 сут	$\beta^+$ (100%)	912.6	1.78
					934.44	99.15

$^{65}\text{Cu}(\gamma, n)^{64}\text{Cu}$ , так как выбранный для мониторинга пучка фотонов изотоп  $^{64}\text{Cu}$  образуется только на  $^{65}\text{Cu}$ .

Были проведены два сеанса облучения при энергиях 30 и 40 МэВ длительностями соответственно 2 и 1 ч. После облучения мишени на 1 ч оставались в экспериментальном зале, после чего были перенесены в помещение для проведения измерений. Спектрометрические измерения проводились на сверхчистом германиевом детекторе HPGe фирмы ORTEC. Для калибровки детектора в качестве источников были использованы  $^{155}\text{Eu}$ ,  $^{57}\text{Co}$  и  $^{22}\text{Na}$ , которые давали следующие гамма-линии: 86.5 ( $^{155}\text{Eu}$ ), 105.3 ( $^{155}\text{Eu}$ ), 122.06 ( $^{57}\text{Co}$ ), 136.47 ( $^{57}\text{Co}$ ), 511 ( $^{22}\text{Na}$ ) и 1274.6 кэВ ( $^{22}\text{Na}$ ). Эффективность детектора была определена при различных расстояниях между детектором и источниками в интервале 0–50 см. Обработка измеренных спектров производилась программой MAESTRO [5].

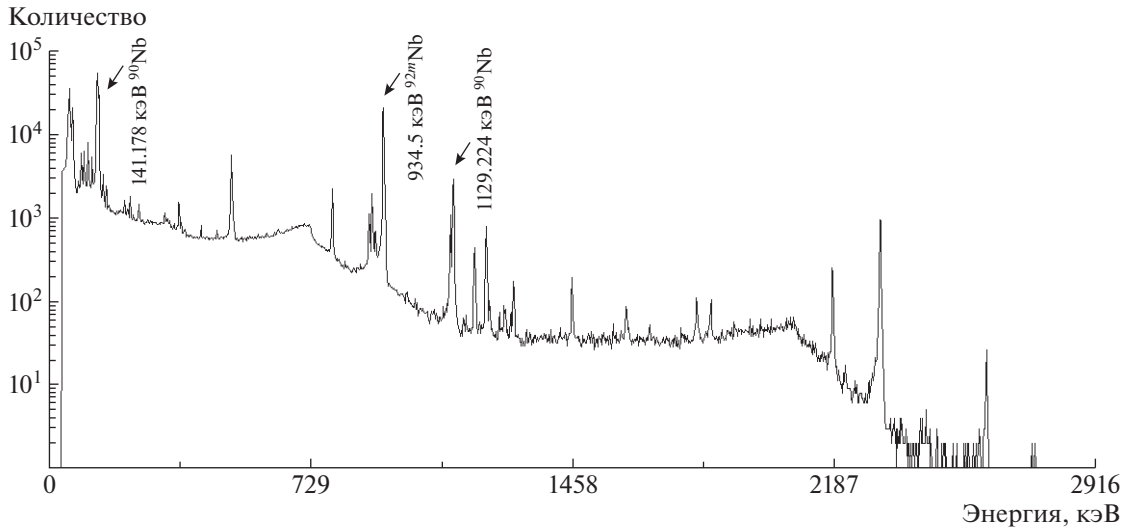
### 3. АНАЛИЗ ДАННЫХ

Наведенная активность  $\Delta N$  для каждой из рассматриваемых реакций измерялась как площадь под фотопиком с вычетом комптоновского фона. На рис. 1 представлен спектр гамма-квантов для изотопов  $^{92}\text{Nb}$  и  $^{90}\text{Nb}$  при тормозном спектре от энергии электронов 40 МэВ, полученный после обработки программой MAESTRO.

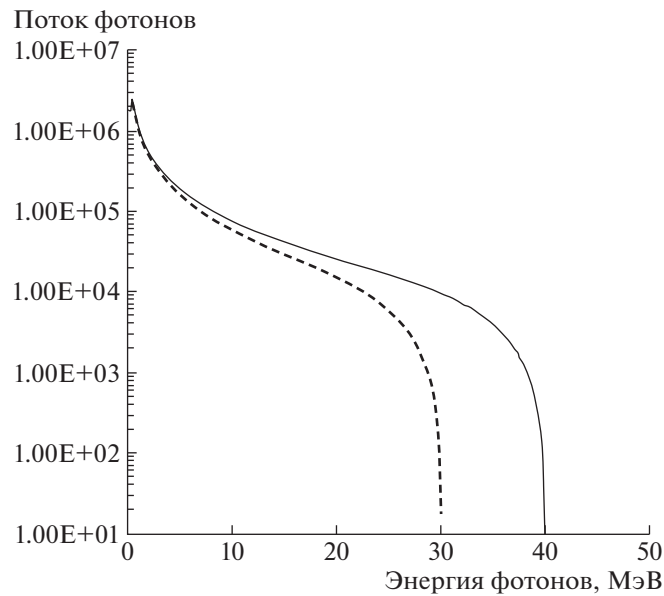
Средневзвешенное поперечное  $\langle\sigma\rangle$  сечение связано с измеренной наведенной активностью соотношением

$$\sigma = \frac{\Delta N \lambda}{\varepsilon \eta k N_\gamma N_{\text{ядер}} (1 - e^{-\lambda t_1}) e^{-\lambda t_2} (1 - e^{-\lambda t_3})}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  — постоянная распада,  $\varepsilon$  — эффективность детектора,  $\eta$  — интенсивность гамма-линии,  $\kappa$  — коэффициент поглощения,  $N_\gamma$  — поток гамма-квантов,  $N_{\text{ядер}}$  — число ядер мишени,  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  — длительность облучения, время от конца облучения



**Рис. 1.** Характеристичный спектр гамма-квантов от  $^{92}\text{Nb}$  и  $^{90}\text{Nb}$  после облучения  $^{93}\text{Nb}$  тормозными фотонами с максимальной энергией 40 МэВ.



**Рис. 2.** Энергетические спектры тормозных фотонов, вычисленные кодом GEANT4, для конечных энергий пучка 30 МэВ (штриховая кривая) и 40 МэВ (сплошная).

до начала измерения и длительность измерения соответственно [3]. Экспериментальный поток гамма-квантов определялся из следующего соотношения:

$$N_{\gamma} = \frac{\Delta N \lambda}{\langle \sigma \rangle \varepsilon \eta k N_{\text{ядер}} (1 - e^{-\lambda t_1}) e^{-\lambda t_2} (1 - e^{-\lambda t_3})}, \quad (2)$$

где обозначения те же, что и в формуле (1). В этом случае величины относятся к мониторинг реакции  $^{65}\text{Cu}(\gamma, n)^{64}\text{Cu}$ .

Средневзвешенное сечение определяется из со-

отношения

$$\langle \sigma \rangle = \frac{\sum \sigma \varphi}{\sum \varphi}, \quad (3)$$

где  $\sigma$  — сечение реакции, а  $\varphi$  — поток фотонов [6]. Величины  $\varphi$  для каждой энергии  $E_{\gamma}$  определяются из энергетического распределения тормозных фотонов, смоделированного посредством кода GEANT4 [2] с учетом размеров и формы коллиматора пучка, а также конвертора. Для сравнения степени достоверности описания процессов реакции различными теоретическими моделями величины  $\sigma$  для тех же значений энергий  $E_{\gamma}$  вычислялись

**Таблица 3.** Значения средневзвешенных сечений, вычисленные по кодам TALYS 1.95 и EMPIRE 3.2, и соответствующие им числа фотонов при конечных энергиях 30 и 40 МэВ

Изотоп	Энергия, МэВ	Сечение $\langle\sigma\rangle$ , мбн		Число фотонов, фотон/ч	
		TALYS 1.95	EMPIRE 3.2	TALYS 1.95	EMPIRE 3.2
$^{64}\text{Cu}$	30	33.77	31.38	$6.04 \times 10^{15}$	$6.5 \times 10^{15}$
	40	28.67	26.8	$3.61 \times 10^{16}$	$3.86 \times 10^{16}$

дважды с использованием кодов TALYS 1.95 [7] и EMPIRE 3.2 [8].

Значения средневзвешенных сечений  $\langle\sigma\rangle$ , вычисленных по формуле (2) для мониторинговой реакции  $^{65}\text{Cu}(\gamma, n)^{64}\text{Cu}$  при использовании кодов TALYS 1.95 и EMPIRE 3.2 и полученные на их основе по формуле (2) числа фотонов приведены в табл. 3.

Ввиду того, что пороги исследуемых реакций отличаются от порога мониторинговой реакции  $^{65}\text{Cu}(\gamma, n)^{64}\text{Cu}$  (см. табл. 2), были введены коэффициенты коррекции величин потоков фотонов. Коэффициенты коррекции фотонов определялись соотношением (4):

$$C_x = \frac{\int_{E_{\text{порог}}^{\text{Nb}}}^{E_e} \Phi(E) dE}{\int_{E_{\text{порог}}^{\text{Cu}}}^{E_e} \Phi(E) dE}, \quad (4)$$

где числитель — интеграл фотонов от порога образования исследуемой реакции до конечной энергии электронного пучка, знаменатель — то же самое для мониторинговой реакции [9]. Использованные спектры фотонов, являющиеся результатом вычислений посредством кода GEANT4, приведены на рис. 2.

В табл. 4 для всех исследуемых реакций приведены значения коэффициентов коррекции гамма-квантов для энергий электронного пучка 30 и 40 МэВ.

Экспериментальные средневзвешенные сечения для реакций  $^{93}\text{Nb}(\gamma, xn)$  определялись по формуле (1) с использованием параметров ядер-продуктов

**Таблица 4.** Коэффициенты коррекции гамма-квантов

Энергия, МэВ	Изотоп	Пороговая энергия, МэВ	Коэффициент гамма-квантов, $C_x$
40	$^{90g}\text{Nb}$	28.7	0.08
40	$^{91m}\text{Nb}$	16.8	0.46
30	$^{91m}\text{Nb}$	16.8	0.31
40	$^{92m}\text{Nb}$	8.9	1.12
30	$^{92m}\text{Nb}$	8.9	1.16

реакции и числа фотонов, вычисленных по формуле (2), основанной на сечениях по кодам TALYS 1.95 и EMPIRE 3.2, с учетом коэффициентов коррекции числа фотонов, приведенных в табл. 4. Таким образом, для каждой из конечных энергий фотонного пучка 30 и 40 МэВ были получены два значения экспериментальных средневзвешенных сечений для реакций  $^{93}\text{Nb}(\gamma, xn)$ , основанных на вычислениях по кодам TALYS 1.95 и EMPIRE 3.2.

Для сравнения результатов по формуле (3) отдельно вычислены теоретические средневзвешенные сечения для ядер-продуктов по кодам TALYS 1.95 и EMPIRE 3.2. При этих вычислениях числа фотонов определялись на основе вычислений по коду GEANT4. Полученные экспериментальные и теоретические сечения совместно с данными других авторов [6, 10] обобщены в табл. 5. Из табл. 5 видно, что для реакции  $^{93}\text{Nb}(\gamma, n)^{92m}\text{Nb}$ , когда имеет место эмиссия одного нейтрона, наблюдается хорошее согласие как между экспериментальными данными на основе расчета числа фотонов, выполненных посредством теоретических вычислений кодами TALYS 1.95 и EMPIRE 3.2, так и с чисто теоретическими расчетами посредством тех же кодов. Следует отметить также, что для всех реакций значения средневзвешенных сечений, вычисленных по коду EMPIRE 3.2, ниже, чем результаты по коду TALYS 1.95.

Для реакций с большим количеством вылетевших нейтронов  $^{93}\text{Nb}(\gamma, 3n)^{90}\text{Nb}$ ,  $^{93}\text{Nb}(\gamma, 2n)^{91m}\text{Nb}$  экспериментальные данные на базе кодов TALYS 1.95 и EMPIRE 3.2 согласуются между собой, однако они сильно расходятся с теоретическими вычислениями на базе тех же кодов. В случае изотопа  $^{90m}\text{Nb}$  ввиду малого времени жизни (см. табл. 2) измеряется полное сечение  $^{90}\text{Nb}$ , так как  $^{90m}\text{Nb}$  посредством ИТ переходит в  $^{90g}\text{Nb}$ .

Из табл. 5 видно, что наши результаты для изотопа  $^{90}\text{Nb}$  хорошо согласуются с данными работы [6]. Для  $^{92m}\text{Nb}$  данные работ [6, 10] и наши результаты выявляют тенденцию роста сечения с увеличением конечной энергии тормозного спектра до энергии 30 МэВ. С дальнейшим увеличением

**Таблица 5.** Сравнение экспериментальных и теоретических значений средневзвешенных сечений с данными работ [6, 10]

Изотоп	Энергия, МэВ	Литература	Средневзвешенные сечения, мбн				
			Экспериментальные результаты			Теоретические вычисления	
				TALYS 1.95	EMPIRE 3.2	TALYS 1.95	EMPIRE 3.2
<sup>90</sup> Nb	40	Настоящая работа		2.88 ± 0.033	2.62 ± 0.031	2.25	1.56
	45	[6]	3.011 ± 0.35				
<sup>91m</sup> Nb	30	Настоящая работа		8.34 ± 0.61	7.75 ± 0.56	6.45	5.54
	40	Настоящая работа		6.33 ± 0.69	5.91 ± 0.68	5.16	4.57
<sup>92m</sup> Nb	12	[6]	8.73 ± 0.196				
	14	[6]	14.61 ± 1.31				
	16	[6]	20.371 ± 1.65				
	30	Настоящая работа		36.79 ± 0.38	34.19 ± 0.35	31.06	26.2
	32	[10]	29.9 ± 1.9				
	40	Настоящая работа		26.81 ± 0.14	25.06 ± 0.14	27.1	22.8
	45	[6]	23.939 ± 1.89				

энергии фотонов открываются новые каналы реакции, что приводит к уменьшению средневзвешенных сечений. Для изотопа <sup>91m</sup>Nb сравнения с другими работами не проведены, так как экспериментальные данные получены впервые.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено измерение средневзвешенных сечений реакций <sup>93</sup>Nb( $\gamma, xn$ ) ( $x = 1-3$ ) на тормозном пучке линейного ускорителя электронов ЛУЭ-75 Национальной научной лаборатории им. А.Алиханяна (Ереванский физический институт) с использованием активационного метода. Измерения были выполнены при двух значениях конечных энергий электронов 30 и 40 МэВ. Спектрометрический анализ облученных мишеней проводился на сверхчистом германиевом детекторе HPGe с последующей обработкой с помощью программы MAESTRO. Для всех исследуемых реакций проведены также сравнения с теоретическими вычислениями, выполненными посредством кодов TALYS 1.95 и EMPIRE 3.2. Результаты, полученные для реакций <sup>93</sup>Nb( $\gamma, n$ )<sup>92m</sup>Nb и <sup>93</sup>Nb( $\gamma, 3n$ )<sup>90</sup>Nb, сравнены с имеющимися экспериментальными данными. Наблюдается хорошее согласие с данными других авторов. Экспериментальные данные для реакции <sup>93</sup>Nb( $\gamma, 2n$ )<sup>91</sup>Nb получены впервые.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета по науке МОНКС РА в рамках научного проекта № SCS 18T-1C297.

Авторы выражают благодарность руководству и всему коллективу ускорительного отдела Национальной научной лаборатории им. А.Алиханяна за обеспечение стабильным пучком в течение всего эксперимента.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. Sirunyan, A. Hakobyan, G. Ayvazyan, A. Babayan, H. Vardanyan, G. Zohrabyan, K. Davtyan, H. Torosyan, and A. Papayan, *J. Contemp. Phys.* **53**, 271 (2018).
2. GEANT4: A Simulation Toolkit, March 5th, 2019; <https://geant4.web.cern.ch/>
3. А. С. Данагулян, Г. О. Оганесян, Т. М. Бахшиян, Р. О. Авакян, А. Э. Аветисян, И. А. Керобян, Р. К. Даллакян, *ЯФ* **78**, 483 (2015) [*Phys. At. Nucl.* **78**, 447 (2015)].
4. National Nuclear Data Center (NNDC); <https://www.nndc.bnl.gov/nudat2/>
5. MAESTRO®-32 MCA Emulator for Microsoft® Windows® 2000 Professional and XP® Professional, Software User's Manual, ORTEC Part No. 777800.
6. H. Naik, G. N. Kim, R. Schwengner, K. Kim, M. Zaman, M. Tatari, M. Sahid, S. C. Yang, R. John, R. Massarczyk, A. Junghans, S. G. Shin, Y. Key, A. Wagner, M. W. Lee, A. Goswami, and M.-H. Cho, *Nucl. Phys A* **916**, 168 (2013).

7. A. Koning, S. Hilaire, and S. Goriely, TALYS 1.9 Nuclear Reaction Program (2017).
8. M. Herman, R. Capote, M. Sin, A. Trkov, *et al.*, EMPIRE-3.2 Rivoli Modular System for Nuclear Reaction Calculations and Nuclear Data Evaluation (2013).
9. H. Naik, G. Kim, K. Kim, M. Zaman, A. Goswami, M. Woo Lee, S.-C. Yang, Y.-O. Lee, S.-G. Shin, and M.-H. Cho, Nucl. Phys. A **948**, 28 (2016).
10. A. K. Md. L. Rahman, K. Kato, H. Arima, N. Shigyo, K. Ishibashi, S. Hori, and K. Nakajima, J. Nucl. Sci. Technol. **47**, 618 (2010).

## INVESTIGATION OF FLUX-WEIGHTED AVERAGE CROSS SECTIONS FOR REACTIONS ON $^{93}\text{Nb}$ WITH BREMSSTRAHLUNG OF LUE-75

A. E. Avetisyan, R. V. Avetisyan, A. G. Barseghyan, R. K. Dallakyan, Yu. A. Gharibyan, A. V. Gyurjinyan, I. A. Kerobyan, H. A. Mkrtchyan

*A. Alikhanyan National Science Laboratory, Yerevan, Republic of Armenia*

Studies of the cross section of gamma–neutron reactions on the  $^{nat}\text{Nb}$  nucleus were carried out on the bremsstrahlung of the linear electron accelerator LUE-75 which is located at the A. Alikhanyan National Science Laboratory (Yerevan Physics Institute). The experiment was done at 30 MeV and 40 MeV bremsstrahlung end-point energies. The cross sections for  $^{nat}\text{Nb}(\gamma, xn)^{90g,91m,92m}\text{Nb}$  reactions were measured by the activation method with the spectrometric analysis using the High Purity Germanium detector (HPGe). The values of cross sections for different energies of photon beam were determined using the TALYS 1.95 and EMPIRE 3.2 nuclear codes. The energy distribution of photon spectra was performed using the GEANT4 package. The obtained experimental and theoretical results are compared with the available experimental data of other authors. Good agreement between theoretical and experimental data was observed. The data on the reaction cross section for  $^{nat}\text{Nb}(\gamma, 2n)^{91m}\text{Nb}$  were obtained for the first time.