

УДК 550.35; 539.16

И. Адам<sup>1,2</sup>, Ч. Бхатия<sup>3</sup>, И. Гайсак<sup>4</sup>, С.А. Густов<sup>1</sup>, Л. Заворка<sup>1</sup>, Ю. Киш<sup>4</sup>,  
В. Кумар<sup>3</sup>, И.В. Мирохин<sup>1</sup>, В.С. Пронских<sup>1</sup>, А.А. Солнышкин<sup>1</sup>,  
М. Сухопар<sup>2</sup>, Ж.Х. Хушвактов<sup>1</sup>, В.М.Цупко-Ситников<sup>1</sup>,  
В.Ю. Щеголев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

<sup>2</sup>Институт ядерной физики Чешской академии наук, Ржеж, Чехия

<sup>3</sup>Университет в Раджастхане, Джайпур, Индия

<sup>4</sup>Ужгородский национальный университет, Ужгород, Украина

## ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТЕЙ РЕАКЦИЙ $^{nat}\text{U}$ С ВТОРИЧНЫМИ НЕЙТРОНАМИ, ВОЗНИКАЮЩИМИ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ МАССИВНОЙ СВИНЦОВОЙ МИШЕНИ ПРОТОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ 660 МэВ

Экспериментально изучен процесс взаимодействия вторичных нейтронов с ядрами  $^{nat}\text{U}$ . Поле вторичных нейтронов генерировалось в результате облучения массивной свинцовой мишени пучком протонов от фазотрона ОИЯИ с энергией 660 МэВ. Исследования были проведены для двух образцов  $^{nat}\text{U}$ , установленных на боковой поверхности мишени. Получены данные о скоростях реакций для большого количества ядер продуктов.

**Ключевые слова:** протон, вторичные нейтроны, скорости реакций, ядро, уран, свинец,  $\gamma$ -спектр.

### Введение

Экспериментальное исследование процессов взаимодействия вторичных нейтронов с ядрами представляет существенный интерес, как с точки зрения теории, так и для практического применения. В Объединенном институте ядерных исследований в Лаборатории Ядерных Проблем (ЛЯП) на протонном ускорителе ФАЗОТРОН проведены эксперименты по наработке вторичных нейтронов путем облучения свинцовой мишени пучком протонов. Это позволяет формировать поле вторичных нейтронов и получать данные о продуктах и скоростях реакций для большого количества ядер для процессов взаимодействия нейтронов с ядрами мишени.

В данной работе приводятся результаты экспериментальных исследований процесса взаимодействия вторичных нейтронов с ядрами натурального урана  $^{nat}\text{U}$ .

### Эксперимент

Эксперимент проведен на протонном ускорителе ФАЗОТРОН в ЛЯП ОИЯИ. Для генерации вторичных нейтронов использовалась массивная свинцовая мишень диаметром 8 см и длиной 33 см (установка «ГЕНЕРАТОР»), которая облучалась пучком протонов с энергией 660 МэВ. Размеры пучка в поперечном сечении составляли величины  $\Delta X=2.5$  см и  $\Delta Y=2.6$  см, а его направление совпадало с осью мишени. Схема установки показана на рис. 1. Интегральный поток протонов на мишени составил величину  $1.98(9)E+15$  частиц за 295 мин. облучения. Образцы из  $^{nat}\text{U}$ , которые обозначены на рисунке как U2 и U13, размещались на боковой поверхности мишени на расстоянии 12,5 см от плоскости входа пучка в мишень. Массы образцов составляли 0.1719 и 0.3297 граммов диаметром 1.5 см каждый.

После облучения образцы перемещались на спектрометрический комплекс

ЯСНАПП-2 [1] в ЛЯП ОИЯИ, где проводились измерения их  $\gamma$ -спектров с помощью рентгеновского (КХ) HPGe-детектора (фирма ORTEC) объемом  $2 \text{ см}^3$  и разреше-

нием  $\Delta E_\gamma = 580 \text{ эВ}$  на линии  $E_\gamma = 120 \text{ кэВ}$ . Измерение каждого образца проводилось многократно в течение различных временных интервалов.

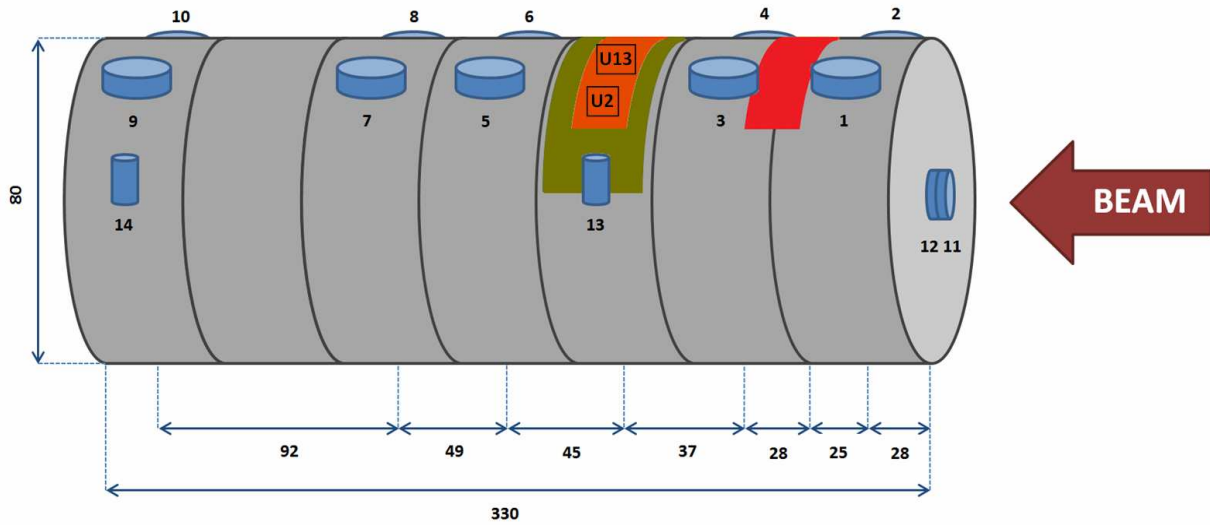


Рис. 1. Схема установки «ГЕНЕРАТОР» ЛЯП ОИЯИ (массивная свинцовая мишень диаметром 8 см и длиной 33 см).

На рис. 2 представлен пример спектра  $\gamma$ -излучения, облученного нейтронами образца  $^{nat}\text{U}$ , измеренного с помощью (КХ) HPGe-детектора. Как видно, на представленном спектре четко

проявляется целый ряд пиков, которые после обработки с помощью программы DEIMOS [2] можно идентифицировать, то есть установить их принадлежность к тому или иному изотопу.

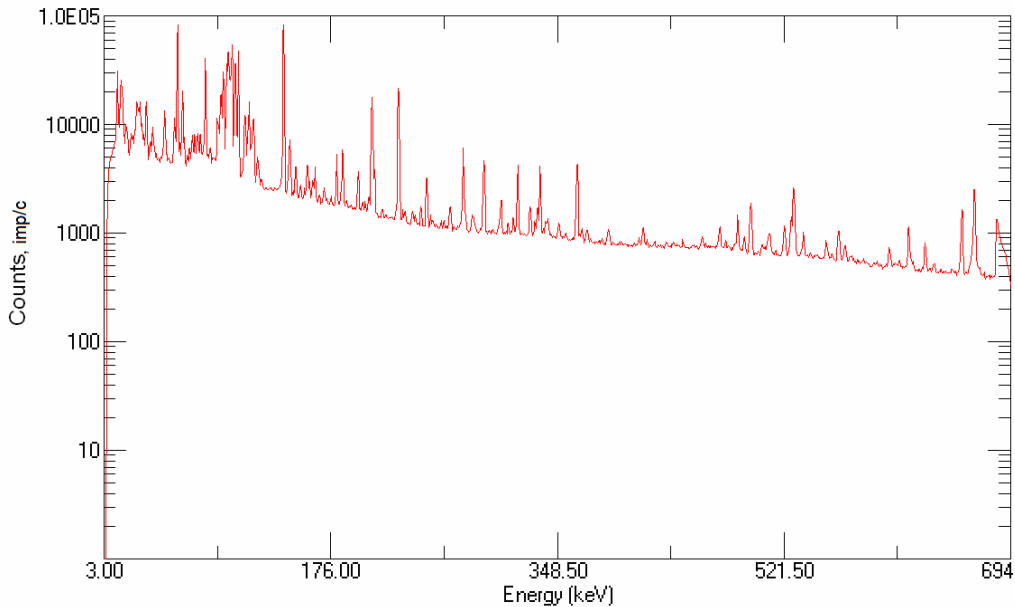


Рис. 2. Спектр  $\gamma$ -излучения облученного нейтронами образца  $^{nat}\text{U}$ , измеренного с помощью (КХ) HPGe-детектора.

Таким образом идентификация по пикам ядер, образовавшихся в результате взаимодействия вторичных нейтронов с

образцами  $^{nat}\text{U}$ , проводилась по величинам энергий и интенсивностей характерных для каждого изотопа  $\gamma$ -линий  $E_\gamma$  и  $I_\gamma$ , а

также по их периодам полураспада  $T_{1/2}$ . При этом использовались литературные данные [3] и пакет программ [4].

В результате были получены сведения о скоростях реакций (R) для более, чем 30 ядер продуктов, большая часть которых представлена на рис. 3 и в таблице 1. Для

определения скоростей реакций использовалось соотношение из работы [5]:

$$R(A_r, Z_r) = Q(A_r, Z_r) / N_t N_p,$$

где  $Q(A_r, Z_r)$  – скорость образования радионуклида (r),  $N_t$  – число атомов в образце,  $N_p$  – число падающих протонов на мишень.

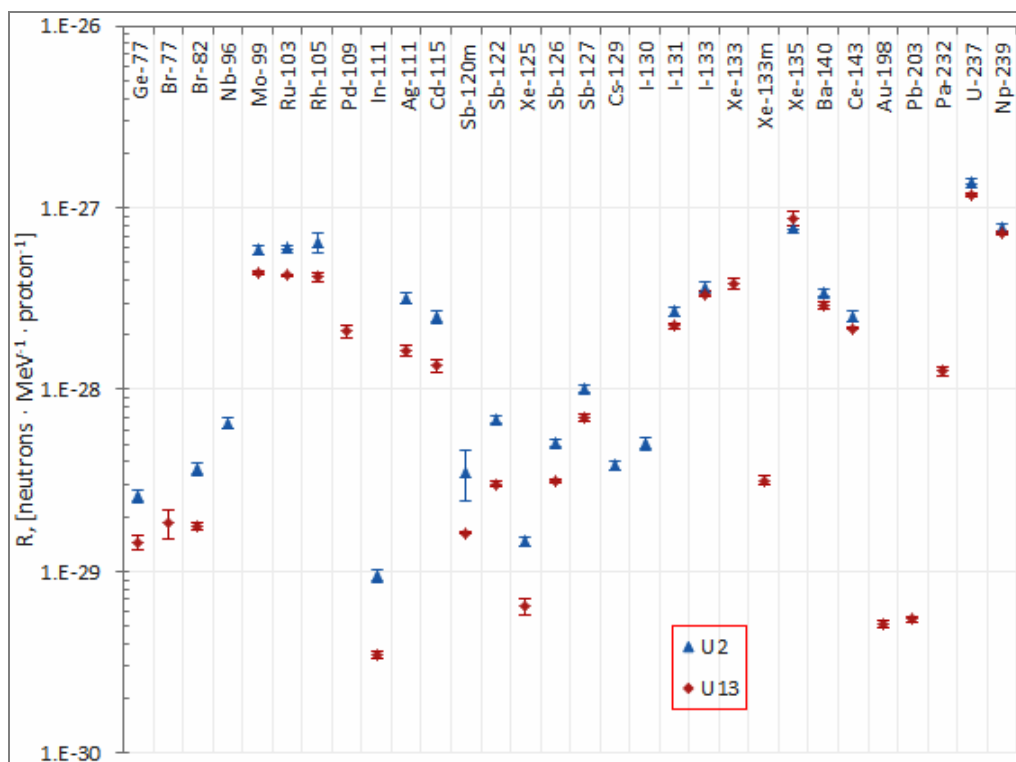


Рис. 3. Экспериментальные данные о скоростях реакций (R) для ядер продуктов (указаны в верхней части рисунка), образовавшихся в результате взаимодействия вторичных нейтронов с образцами  $^{nat}U$ .

Таблица 1

Скорости реакций R, образования ядер и продуктов реакции  $^{nat}U$  вторичными нейтронами ( $E_p = 660$  МэВ, Фазотрон-2010)

Изотоп $E_\gamma$ [кэВ]	$I_\gamma$ [%]	$T_{1/2}$ (Литература) $T_{1/2}$ (Эксп.)	$\langle R \rangle$ R	Число спектров
1	2	3	4	5
<b>Mo-99</b>		<b>2.75(2) d</b>	<b>5.12(17)E-28</b>	
140.511	89.4	2.81(3) d	4.46(8)E-28	7-X,U13
		2.91(18) d	6.2(3)E-28	6-X,U2
181.063	6.0	2.72(6) d	4.04(8)E-28	7-X,U13
		3.02(12) d	5.78(23)E-28	6-X,U2
<b>Ru-103</b>		<b>39.26(2) d</b>	<b>5.33(16)E-28</b>	
497.080	91	45(5) d	4.36(8)E-28	7-X,U13
		47(7) d	6.30(15)E-28	6-X,U2
<b>Rh-105</b>		<b>1.47(2) d</b>	<b>5.19(35)E-28</b>	
306.250	5.1	1.55(2) d	4.18(14)E-28	6-X,U13
		1.86(11) d	6.48(40)E-28	4-X,U2
319.140	19	1.58(3) d	3.97(23)E-28	7-X,U13
		1.71(6) d	6.13(65)E-28	6-X,U2

1	2	3	4	5
<b>I-131</b>		<b>8.02(3) d</b>	<b>2.71(10)E-28</b>	
284.305	6.1	7.44(26) d	2.53(6)E-28	7-X,U13
		7.6(7) d	3.30(14)E-28	6-X,U2
364.489	81.7	9.4(6) d	2.26(8)E-28	7-X,U13
		9.2(5) d	2.75(13)E-28	6-X,U2
<b>I-133</b>		<b>20.8(1) h</b>	<b>3.55(9)E-28</b>	
529.872	87	21.2(4) h	3.39(8)E-28	5-X,U13
		21.0(4) h	3.71(11)E-28	5-X,U2
<b>Ba-140</b>		<b>12.75(3) d</b>	<b>2.94(12)E-28</b>	
162.660	6.2	15.6(10) d	2.71(6)E-28	7-X,U13
		11.6(9) d	2.89(8)E-28	6-X,U2
423.722	3.1	19(5) d	2.79(14)E-28	6-X,U13
		19(11) d	3.25(23)E-28	4-X,U2
537.261	24.4	14.6(9) d	2.82(6)E-28	7-X,U13
		19(4) d	3.20(15)E-28	6-X,U2
<b>Ce-143</b>		<b>1.38(2) d</b>	<b>2.33(14)E-28</b>	
57.356	11.7	1.44(7) d	2.30(7)E-28	5-X,U13
		1.52(8) d	2.72(14)E-28	5-X,U2
293.266	42.8	1.41(3) d	2.16(4)E-28	6-X,U13
		1.50(5) d	2.48(19)E-28	6-X,U2
350.619	3.2	1.61(9) d	2.62(13)E-28	5-X,U13
490.368	2.2	1.44(25) d	2.17(20)E-28	4-X,U13
664.571	5.7	1.45(18) d	2.06(14)E-28	4-X,U13
		1.25(23) d	2.13(25)E-28	4-X,U2
<b>U-237</b>		<b>6.75(1) d</b>	<b>1.30(4)E-27</b>	
59.541	34.5	7.06(18) d	1.20(3)E-27	7-X,U13
		7.4(4) d	1.47(4)E-27	6-X,U2
64.830	1.3	6.48(29) d	1.23(3)E-27	7-X,U13
		6.4(5) d	1.71(10)E-27	6-X,U2
164.610	1.9	7.23(18) d	1.10(2)E-27	7-X,U13
		6.3(3) d	1.23(3)E-27	6-X,U2
208.000	21.2	7.10(18) d	1.17(2)E-27	7-X,U13
		7.4(5) d	1.38(5)E-27	6-X,U2
332.360	1.2	6.8(5) d	1.09(4)E-27	7-X,U13
		8.1(10) d	1.41(7)E-27	5-X,U2
<b>Np-239</b>		<b>2.35(2) d</b>	<b>7.36(32)E-28</b>	
61.461	1.3	2.34(19) d	6.56(30)E-28	6-X,U13
		2.18(11) d	8.46(33)E-28	5-X,U2
106.125	27.2	2.48(5) d	7.02(16)E-28	7-X,U13
		2.65(12) d	7.19(37)E-28	6-X,U2
209.753	3.42	2.39(7) d	8.14(19)E-28	7-X,U13
		2.78(21) d	7.56(64)E-28	6-X,U2
277.599	14.4	2.48(6) d	6.94(17)E-28	7-X,U13
		2.70(8) d	7.40(39)E-28	6-X,U2
315.879	1.6	2.56(10) d	6.96(30)E-28	7-X,U13
		2.63(13) d	7.35(34)E-28	6-X,U2

### Заключение

Из рис. 3 и табл. 1 видно, что при взаимодействии вторичных нейтронов с

ядрами урана  $^{nat}\text{U}$  наблюдается целый ряд различного типа ядерных реакций. Это и реакции деления (n,f), в которых образуются такие изотопы как  $^{99}\text{Mo}$ ,  $^{115}\text{Cd}$ ,  $^{135}\text{Xe}$ ,

$^{140}\text{Ba}$ ,  $^{143}\text{Ce}$  и т. д. Наблюдается и продукт (n, $\gamma$ )-реакции (образуется  $^{239}\text{U}$ , который распадается в  $^{239}\text{Np}$ ). Наблюдаемый нами изотоп  $^{237}\text{U}$  является продуктом (n,2n)-реакции. Подавляющая часть образовавшихся изотопов обязана своим появлением реакциям глубокого расщепления

$^{238}\text{U}$  быстрыми нейтронами. Все эти экспериментальные данные будут крайне полезны как для развития теоретических подходов к описанию процессов взаимодействия нейтронов с тяжелыми ядрами, так и их использования в расчетах реакторов и подкритических систем.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kalinnikov V.G. et al. Experimental complex to study nuclei far from the beta-stability line — ISOL - facility YASNAPP-2// NIM, 1992, V. B70, P. 62-68.
2. Frana J. Program DEIMOS32 for gamma-ray spectra evaluation // J.Radioanal. Nucl. Chem. 2003, V. 257, 583.
3. Extrom L.P. and Firestone R.B., WWW Table of Radioactive Isotopes, database. / <http://ie.lbl.gov/toi/>
4. Адам И. и др. Система программ и дополнения к методу активационного анализа для определения сечений ядерных реакций // Препр. ОИЯИ, P10-2000-28, Дубна, 2000, 22 с.
5. Adam J. et al. Transmutation of Th and U with neutrons produced in Pb target and U-blanket system by relativistic deuterons //JINR Prepr. E15-2008-118. Dubna, 2008, 29 p.

Стаття надійшла до редакції 20.04.2013

J. Adam<sup>1,2</sup>, Ch. Bhatia<sup>3</sup>, I. Haysak<sup>4</sup>, S.A. Gustov<sup>1</sup>, L. Zavorka<sup>1</sup>, J. Kish<sup>4</sup>, V. Kumar<sup>3</sup>, I.V. Mirokhin<sup>1</sup>, V.S Pronskikh<sup>1</sup>, A.A. Solnyshkin<sup>1</sup>, M. Suchopar<sup>2</sup>, J.Khushvaktov<sup>1</sup>, V.M. Tsoupko-Sitnikov<sup>1</sup>, V.Yu. Schegolev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

<sup>2</sup>Nuclear Physics Institute, Rez, Czech Republic

<sup>3</sup>University of Rajasthan, Jaipur, India

<sup>4</sup>Uzhhorod National University, Uzhhorod, Ukraine

## MEASUREMENT OF THE REACTION RATES IN $^{nat}\text{U}$ SAMPLES IRRADIATED BY THE SECONDARY NEUTRONS GENERATED WITH 660 MeV PROTON BEAM IN A MASSIVE LEAD TARGET

Interaction of secondary neutrons with  $^{nat}\text{U}$  nuclei has been experimentally investigated. Secondary neutron field has been generated as a result of irradiation of the massive lead target with the JINR Phasotron proton beam with energy 660 MeV. A set of two  $^{nat}\text{U}$  samples placed at the surface of the target has been studied. The results on reaction rates of a large number of residual nuclei have been obtained.

**Keywords:** proton, secondary neutrons, reaction rate, nucleus, uranium, lead, gamma spectrum.

І. Адам<sup>1,2</sup>, Ч. Бхатія<sup>3</sup>, І. Гайсак<sup>4</sup>, С.А. Густов<sup>1</sup>, Л. Заворка<sup>1</sup>, Ю. Кіш<sup>4</sup>,  
В. Кумар<sup>3</sup>, І.В. Мирохін<sup>1</sup>, В.С. Пронскіх<sup>1</sup>, А.А. Солнишкін<sup>1</sup>,  
М. Сухопар<sup>3</sup>, Ж.Х. Хушвактов<sup>1</sup>, В.М. Цупко-Ситніков<sup>1</sup>,  
В.Ю. Щеголєв<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Об'єднаний інститут ядерних досліджень, Дубна, Росія

<sup>2</sup>Інститут ядерної фізики Чеської академії наук, Ржеж, Чехія

<sup>3</sup>Університет в Раджастхані, Джайпур, Індія

<sup>4</sup>Ужгородський національний університет, Ужгород, Україна

## ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТЕЙ РЕАКЦІЙ $^{nat}\text{U}$ З ВТОРИННИМИ НЕЙТРОНАМИ, УТВОРЕНИМИ ПРИ ОПРОМІНЕННІ МАСИВНОЇ СВИНЦЕВОЇ МІШЕНІ ПРОТОНАМИ З ЕНЕРГІЄЮ 660 MeV

Експериментально вивчено процес взаємодії вторинних нейтронів з ядрами природного урану. Поле вторинних нейтронів генерувалося при опроміненні масивної свинцевої мішені пучком протонів фазотрона ОІЯД з енергією 660 MeV. Дослідження проведено для двох взірців природного урану, встановлених на боковій поверхні нейтроноутворюючої мішені. Отримано дані про швидкості реакцій для великої кількості ядер-продуктів.

**Ключові слова:** протон, вторинні нейтрони, швидкість реакції, ядро, уран, свинець,  $\gamma$ -спектр.