

УДК 550.35; 539.16

И. Адам^{1,2}, Ч. Бхатия³, И. Гайсак⁴, С.А. Густов¹, Л. Заворка¹, Ю. Киш⁴,
В. Кумар³, И.В. Мирохин¹, В.С. Пронских¹, А.А. Солнышкин¹,
М. Сухопар², Ж.Х. Хушвактов¹, В.М.Цупко-Ситников¹,
В.Ю. Щеголев¹

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Институт ядерной физики Чешской академии наук, Ржеж, Чехия

³Университет в Раджастхане, Джайпур, Индия

⁴Ужгородский национальный университет, Ужгород, Украина

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

Экспериментально изучен процесс взаимодействия вторичных нейтронов с ядрами ^{nat}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}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, γ -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}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}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 γ -спектров с помощью рентгеновского (КХ) HPGe-детектора (фирма ORTEC) объемом 2 см³ и разреше-

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

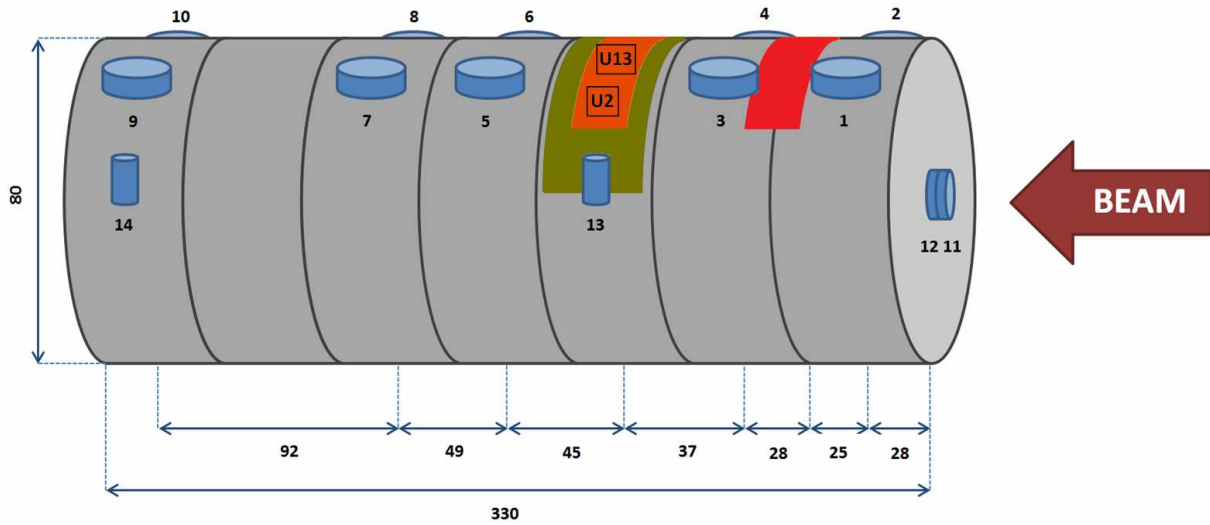


Рис. 1. Схема установки «ГЕНЕРАТОР» ЛЯП ОИЯИ (массивная свинцовая мишень диаметром 8 см и длиной 33 см).

На рис. 2 представлен пример спектра γ -излучения, облученного нейтронами образца ^{nat}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.

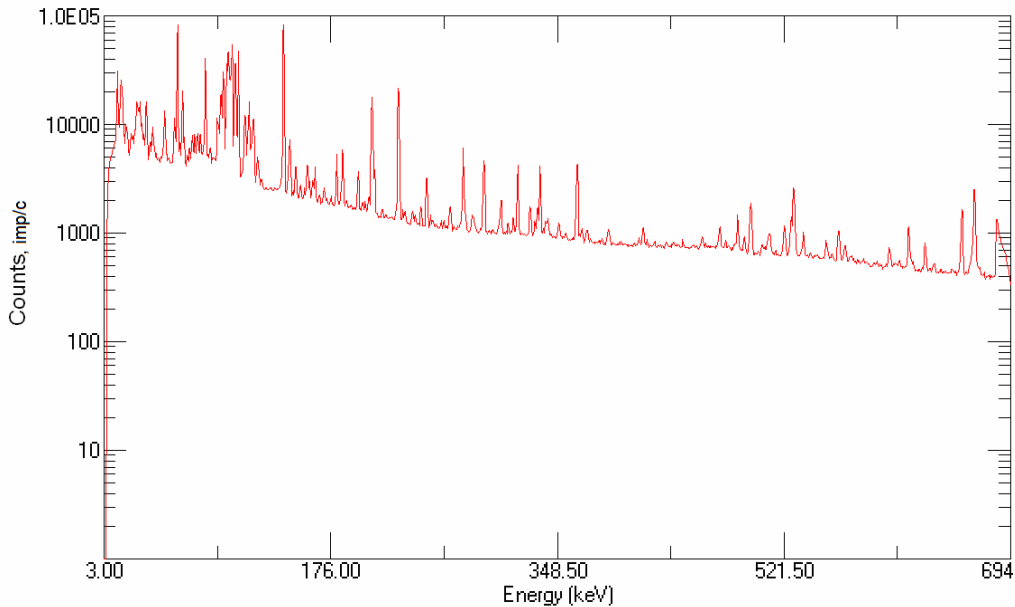


Рис. 2. Спектр γ -излучения облученного нейтронами образца ^{nat}U, измеренного с помощью (КХ) HPGe-детектора.

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

образцами ^{nat}U, проводилась по величинам энергий и интенсивностей характерных для каждого изотопа γ -линий E_γ и I_γ , 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.

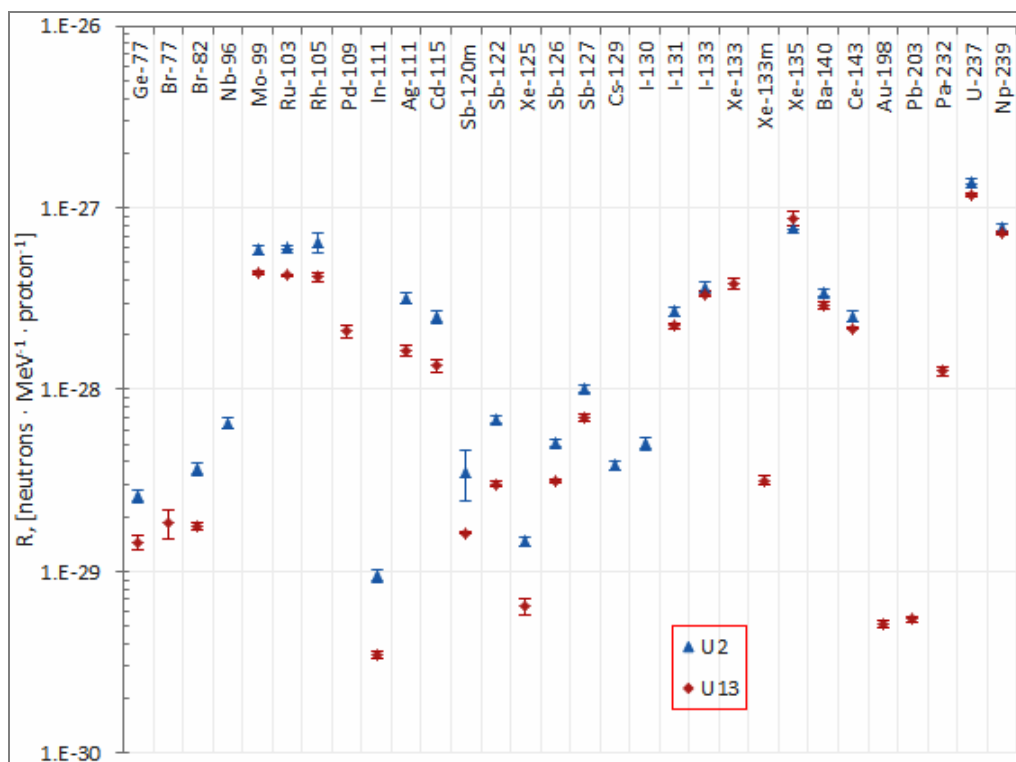


Рис. 3. Экспериментальные данные о скоростях реакций (R) для ядер продуктов (указаны в верхней части рисунка), образовавшихся в результате взаимодействия вторичных нейтронов с образцами ^{nat}U .

Таблица 1

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

Изотоп E_γ [кэВ]	I_γ [%]	$T_{1/2}$ (Литература) $T_{1/2}$ (Эксп.)	$\langle R \rangle$ R	Число спектров
1	2	3	4	5
Mo-99		2.75(2) d	5.12(17)E-28	
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
Ru-103		39.26(2) d	5.33(16)E-28	
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
Rh-105		1.47(2) d	5.19(35)E-28	
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
I-131		8.02(3) d	2.71(10)E-28	
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
I-133		20.8(1) h	3.55(9)E-28	
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
Ba-140		12.75(3) d	2.94(12)E-28	
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
Ce-143		1.38(2) d	2.33(14)E-28	
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
U-237		6.75(1) d	1.30(4)E-27	
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
Np-239		2.35(2) d	7.36(32)E-28	
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}U наблюдается целый ряд различного типа ядерных реакций. Это и реакции деления (n,f), в которых образуются такие изотопы как ^{99}Mo , ^{115}Cd , ^{135}Xe ,

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

^{238}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^{1,2}, Ch. Bhatia³, I. Haysak⁴, S.A. Gustov¹, L. Zavorka¹, J. Kish⁴, V. Kumar³, I.V. Mirokhin¹, V.S Pronskikh¹, A.A. Solnyshkin¹, M. Suchopar², J.Khushvaktov¹, V.M. Tsoupko-Sitnikov¹, V.Yu. Schegolev¹

¹Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

²Nuclear Physics Institute, Rez, Czech Republic

³University of Rajasthan, Jaipur, India

⁴Uzhhorod National University, Uzhhorod, Ukraine

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

Interaction of secondary neutrons with ^{nat}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}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^{1,2}, Ч. Бхатія³, І. Гайсак⁴, С.А. Густов¹, Л. Заворка¹, Ю. Кіш⁴,
В. Кумар³, І.В. Мирохін¹, В.С. Пронскіх¹, А.А. Солнишкін¹,
М. Сухопар³, Ж.Х. Хушвактов¹, В.М. Цупко-Ситніков¹,
В.Ю. Щеголев¹

¹Об'єднаний інститут ядерних досліджень, Дубна, Росія

²Інститут ядерної фізики Чеської академії наук, Ржеж, Чехія

³Університет в Раджастхані, Джайпур, Індія

⁴Ужгородський національний університет, Ужгород, Україна

ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТЕЙ РЕАКЦІЙ ^{nat}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, γ -спектр.