

УДК 539.125.17

# Абсолютные измерения сечения радиационного захвата нейтронов с энергией 30 кэВ в $^{238}\text{U}$

ПАНИТКИН Ю. Г., ШЕРМАН Л. Е.

Сечения радиационного захвата нейтронов в  $^{238}\text{U}$  представляют интерес, так как это одна из наиболее важных ядерных констант при проектировании быстрых реакторов-размножителей. Особенно важно абсолютное измерение сечения радиационного захвата нейтронов в  $^{238}\text{U}$ . Однако в настоящее время в результатах, полученных различными авторами, разброс иногда выходит за пределы ошибок, указанных в работах [1—3]. Цель данной работы — абсолютно измерить сечения радиационного захвата нейтронов с энергией 30 кэВ в  $^{238}\text{U}$ .

Источником нейтронов являлась реакция  $^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}$ . Измерения выполнены на электростатическом ускорителе с максимальной энергией протонов 2,5 МэВ. Сечение радиационного захвата нейтронов определялось активационным методом, поток нейтронов — методом сопутствующей активности по  $\gamma$ -квантам с энергией 477 кэВ, возникающим при распаде  $^7\text{Be}$ , который образуется в результате реакции  $^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}$ . Наведенная активность образца  $^{238}\text{U}$  измерялась по  $\gamma$ -квантам с энергией 74 кэВ, возникающим в результате распада  $^{238}\text{U}$ . Нейтронный пучок был кинематически коллимирован в узком конусе, направленном вперед по отношению к направлению падения пучка протонов на мишень. Энергия протонов была на 2 кэВ выше пороговой энергии реакции  $^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}$ . Средняя энергия образующихся при таких условиях нейтронов равна 30 кэВ.

Образец из окиси-закиси  $^{238}\text{U}$  толщиной  $300 \text{ мг/см}^2$  размещался под углом  $0^\circ$  по отношению к пучку падающих протонов и защищался от нейтронов, рассеянных в камере мишени ускорителя, оболочкой из кадмия.

Для контроля нейтронного потока, проходящего через образец, использовалась телескопическая система, состоящая из плоской и коаксиальной камер деления со слоями  $^{235}\text{U}$  (рис. 1). Такая система позволяет оперативно контролировать прохождение пучка нейтронов через образец во время облучения. В качестве дополнительного монитора нейтронного потока использовался «длинный» ВФ<sub>3</sub>-счетчик. Ток мишени мониторовался интегратором тока.

Исследовано распыление материала мишени под действием пучка падающих протонов и вы-

бран режим измерений, при котором распыления в пределах точности эксперимента не наблюдалось ( $<0,5\%$ ).

Фон нейтронов, рассеянных в камере мишени ускорителя, измерялся путем размещения образца и плоской камеры деления за пределами конуса нейтронов и был  $\sim 0,1\%$  от измеряемых эффектов.

Активность мишени и наведенную в результате захвата нейтронов активность образца  $^{238}\text{U}$  измеряли Ge(Li)-детектором. Эффективность детектора для измерения наведенной активности  $^{238}\text{U}$  определяли по  $4\pi - \beta$ -счетчику. Для этого образцы из обедненного  $^{238}\text{U}$  облучали в потоке нейтронов из тепловой колонны реактора БР-10. Во избежание возможного эффекта резонансной самоблокировки и самоэкранировки была установлена «нулевая» толщина образца, т. е. такая, при которой эти эффекты пренебрежимо малы ( $<0,6\%$ ). Определенные таким путем образцы нулевой толщины облучали и затем измеряли на Ge(Li)-детекторе и  $4\pi - \beta$ -счетчике. Толщина образца при измерении на Ge(Li)-детекторе составляла  $0,66 \text{ мг/см}^2$ , а при измерении на  $4\pi - \beta$ -счетчике  $0,2 \text{ мг/см}^2$ .

Для пересчета измеренной активности образца нулевой толщины к активности образца толщиной  $300 \text{ мг/см}^2$  был экспериментально определен коэффициент поглощения  $\gamma$ -квантов с энергией 74 кэВ в образце  $^{238}\text{U}$  и в результаты измерений была введена соответствующая поправка.

Геометрия измерений образцов нулевой толщины оставалась такой же, как и при измерении образцов толщиной  $300 \text{ мг/см}^2$ .

Результаты определений на  $4\pi - \beta$ -счетчике обрабатывались с учетом следующих основных поправок: поправки на счет от продуктов деления  $^{235}\text{U}$  (0,05%), поправки на самопоглощение  $\beta$ -частиц в образце (0,1%), поправки, обуслов-

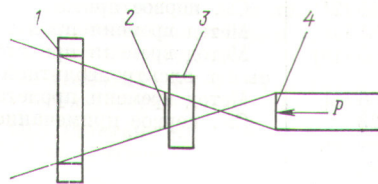


Рис. 1. Геометрия абсолютных измерений:

1 — коаксиальная камера деления; 2 — образец  $^{238}\text{U}$ ; 3 — плоская камера деления; 4 — LiF-мишень



ленной накоплением  $^{239}\text{Np}$  в измеряемом образце (1,2%).

Для измерения активности LiF-мишени эффективность Ge(Li)-детектора определяли по 4л — β-счетчику для γ-квантов с энергией 412кэВ, возникающих в результате распада  $^{198}\text{Au}$ . Геометрия измерения активности  $^{198}\text{Au}$  на Ge(Li)-детекторе была такой же, как и при измерении активности LiF-мишени. Относительное изменение эффективности Ge(Li)-детектора в зависимости от энергии γ-квантов определено в диапазоне энергий 380—620 кэВ по каскаду γ-квантов, образующихся при распаде  $^{71\text{m}}\text{Zn}$ . По экспериментально измеренной энергетической зависимости эффективности детектора найдена полуэмпирическая зависимость эффективности Ge(Li)-детектора от энергии γ-квантов в данном диапазоне [4]. В результате эффективность Ge(Li)-детектора для энергии γ-квантов 477 кэВ, возникающих при распаде  $^7\text{Be}$ , рассчитана на основании измеренной эффективности детектора для γ-квантов с энергией 412 кэВ.

При обработке результатов учитывались поправки на самопоглощение γ-квантов в образце  $^{197}\text{Au}$  (0,8%), на самопоглощение β-частиц в образце для 4л — β-счетчика (0,1%).

Сечение радиационного захвата нейтронов в  $^{238}\text{U}$  определяли с учетом следующих основных поправок: поправки на увеличение эффективной толщины образца за счет конечного угла раскрытия нейтронного конуса (1,3%), поправки на резонансную самоблокировку (0,3%) [5, 6], поправки на рассеяние нейтронов конструк-

ционными материалами экспериментальной установки (5%), поправки на фон нейтронов, рассеянных в камере мишени ускорителя (0,1%), поправки на многократное рассеяние нейтронов в образце (0,3%) [7, 8]. Другие поправки (при определении эффективности детектора) указаны ранее.

Основные ошибки при абсолютном измерении сечения радиационного захвата нейтронов в  $^{238}\text{U}$  при энергии нейтронов 30 кэВ: статистическая ошибка одного измерения (1,5%); ошибка в величине эффективности Ge(Li)-детектора при измерении образца  $^{238}\text{U}$  (2,4%); ошибка в величине эффективности Ge(Li)-детектора при измерении LiF-мишени (3,38%); ошибка в числе γ-квантов на распад (0,1% для  $^{197}\text{Au}$  и 1,6% для  $^7\text{Be}$ ) [9, 10]; ошибка, связанная с поправкой на рассеяние нейтронов на конструкциях экспериментальной установки (0,15); ошибка, обусловленная неопределенностями в периодах полураспада  $^{238}\text{U}$  и  $^7\text{Be}$  (0,5%); средний квадратичный разброс в результатах нескольких серий измерений сечения радиационного захвата нейтронов в  $^{238}\text{U}$  (0,8%); ошибка, связанная с поправкой на самоблокировку (0,1%); ошибка, обусловленная неопределенностью в спектре нейтронов, падающих на образец (0,2%); ошибка, обусловленная неопределенностью в энергетической зависимости сечения радиационного захвата нейтронов в  $^{238}\text{U}$  (0,8%).

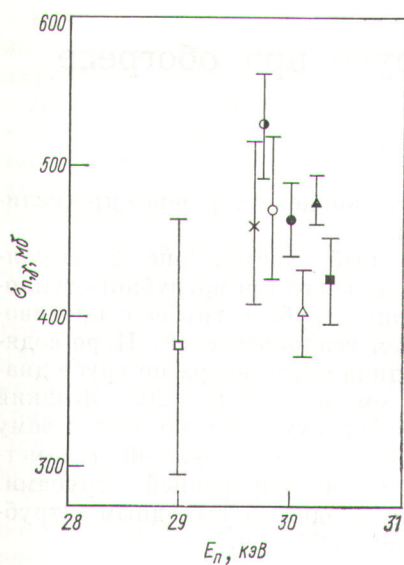
В результате измерений получена величина сечения радиационного захвата нейтронов в  $^{238}\text{U}$ , равная  $465 \pm 23$  мб при энергии нейтро-

Результаты абсолютных измерений сечения радиационного захвата нейтронов в  $^{238}\text{U}$  при энергии нейтронов 30 кэВ

Таблица 1

$E_n$ , кэВ	$\sigma_c$ $^{238}\text{U}$ , мб	Примечания
$30 \pm 8$	$375 \pm 77$ [12]	Активационный метод. Нейтронный поток измерялся по сопутствующей активности в реакции $^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}$ Метод времени пролета. Результаты нормировались по индию, сечение захвата которого было абсолютно измерено на Sb—Be-фотонейтронном источнике в работе [15]
$30 \pm 7$	$473 \pm 47$ [7]	
$30,0$	$430 \pm 43$ [13]	Сферическая геометрия эксперимента. Измерения на фотонейтронном источнике при энергии нейтронов 24 кэВ. Экспериментально полученная величина $467 \pm 46$ мб экстраполирована к энергии 30 кэВ по форме кривой работы [1]. Учтена поправка, сообщенная в работе [16]
$30 \pm 8$	$479 \pm 15$ [2]	См. первое примечание Метод времени пролета. Нормировка проводилась по резонансу с энергией 6,7 эВ Метод времени пролета. Нормировка проводилась по резонансам, расположенным в электронвольтовой области энергий
$30 \pm 8$	$425 \pm 31$ [1]	
$30 \pm 8$	$462 \pm 55$ [14]	
$30 \pm 8$	$528 \pm 36$ [3]	Метод времени пролета. Нормировка проводилась по резонансу с энергией 6,7 эВ См. первое примечание
$30 \pm 6$	$465 \pm 23$ (настоящая работа)	





Р и с. 2. Результаты абсолютных измерений сечения радиационного захвата нейтронов в <sup>238</sup>U при энергии нейтронов 30 кэВ:

● — настоящая работа; ■ — [1]; ▲ — [2]; ○ — [3]; □ — [7]; □ — [12]; △ — [13]; × — [14]

нов  $30 \pm 6$  кэВ. В табл. 1, взятой из работы [11], и на рис. 2 приведены данные измерений сечения радиационного захвата нейтронов в <sup>238</sup>U при энергии нейтронов 30 кэВ, полученные

Сечения радиационного захвата нейтронов в <sup>238</sup>U Таблица 2

$E_n$ , кэВ	$\sigma_c$ , мб	$E_n$ , кэВ	$\sigma_c$ , мб
24±8	500±27		
30±6	465±23		
35±8	426±24	1 200±43	91±4,8
45±8,5	371±49	1 300±45	80±4,3
55±9	357±19	1 500±49	60±3,2
65±10	300±15	1 800±54	47±2,6
75±10,5	276±14	2 000±57	39±2,1
85±11	240±13	2 200±61	32±1,8
105±11,5	205±10	2 500±67	26±1,5
125±12,5	181±9	2 800±73	24±1,3
145±13,5	165±8,5	3 000±78	18±1,1
200±18	145±7,5	3 500±94	16±1,5
250±19	132±6,8	4 000±110	13±1,1
300±19	122±6,3	5 000±115	8±1,1
400±19,5	114±6	6 000±136	6,8±1,0
500±22	108±5,6	7 000±160	5,8±1,1
600±34	108±5,6	15 000±150	3,3±1,47
700±35	114±5,9	16 000±200	3,0±1,3
800±36	116±6	17 000±260	3,7±1,3
900±36	116±6	18 000±235	3,3±1,2
1000±39	109±5,7	19 000±250	2,9±1,4
1100±41	106±5,5	20 000±285	3,4±1,9

в настоящей работе и другими авторами. Как видно из табл. 1, результаты большинства работ имеют ошибки ~7—10% и в пределах ошибок согласуются с результатами настоящей работы. [Исключение составляют результаты работы [3]. Причина существенного расхождения результатов работ [3] и [7, 14], выполненных методом времени пролета, сейчас не выявлена.]

Данные абсолютных измерений использованы для нормирования энергетической зависимости сечения радиационного захвата нейтронов в <sup>238</sup>U, измеренной ранее [17—20]. Сечения радиационного захвата приведены в табл. 2 (для  $E_n = 30$  кэВ сечение измерено абсолютно).

В заключение авторы выражают благодарность Б. Ф. Самылину за помощь в проведении измерений.

Поступила в Редакцию 9/IX 1974 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Moxon M. Rep. AERE-R6074, 1969.
2. Menlove H., Počnitz W. «Nucl. Sci. Engng», 1968, v. 33, p. 24.
3. De Saussure G. e. a. «Nucl. Sci. Engng», 1973, v. 51, p. 385.
4. Paradellis T., Hontzeas S. «Nucl. Instrum. and Methods», 1969, v. 73, p. 21<sup>o</sup>.
5. Macklin R. «Nucl. Instrum. and Methods», 1964, v. 26, p. 213.
6. Dresner L. «Nucl. Instrum. and Methods», 1962, v. 16, p. 176.
7. Gibbon J. e. a. «Phys. Rev.», 1961, v. 122, p. 182.
8. Шорин В. С. Препринт ФЭИ-288, 1971.
9. Nuclear Data Sheets. Compiled by K. Way e. a. Washington, National Academy of Sciences—National Research Council. D.C. 1964.
10. Taylor J., Merrit J. «Canad. J. Phys.», 1962, v. 40, p. 926.
11. Beger T., Konshin V. IAER, Jul. 1971.
12. Hanna R., Rose B. «J. Nucl. Energy», 1959, v. 8, p. 197.
13. Беланова Т. С. и др. «Атомная энергия», 1965, т. 19, вып. 1, с. 3.
14. Frike M. e. a. In: Proc. Conf. of Nuclear Data (Helsinki, 1970). V. 2. IAEA, 1970, p. 265; NASACR-72745, CA-10194, 1970.
15. Shmitt H., Cook C. «Nucl. Phys.», 1960, v. 20, p. 202.
16. Staviskii Y. e. a. [14], p. 51.
17. Паниткин Ю. Г. и др. Вторая международная конференция по ядерным данным для реакторов. Хельсинки, 1970. Докл. CN-26/77.
18. Паниткин Ю. Г., Толстиков В. А. «Атомная энергия», 1972, т. 33, вып. 3, с. 782.
19. Паниткин Ю. Г. и др. В сб.: Материалы совещания по нейтронной физике. Киев, «Наукова думка», 1972.
20. Паниткин Ю. Г. и др. «Атомная энергия», 1972, т. 33, вып. 4, с. 825.