

УДК 539.173.84

Измерение сечений деления ^{233}U и ^{241}Pu относительно сечения деления ^{235}U в диапазоне энергии нейтронов 0,024 — 7,4 МэВ

ФУРСОВ Б. И., КУПРИЯНОВ В. М., СМИРЕНКИН Г. Н.

Для изучения сечений деления ^{233}U и ^{241}Pu использовался метод, описанный в работе [1]. Непосредственно измерялись отношения сечений деления $^{233}\text{U}/^{235}\text{U}$ и $^{241}\text{Pu}/^{235}\text{U}$, что исключало необходимость измерения потока нейтронов. Работа проводилась на электростатических ускорителях. В качестве источников нейтронов использовались $\text{Li}(p, n)$ -, $\text{T}(p, n)$ - и $\text{D}(d, n)$ -реакции на твердых мишенях из гидроксида титана или фторида лития на молибденовых подложках. Энергию нейтронов ниже 127 кэВ получали в реакции $\text{Li}(p, n)$ под углом 120° к направлению падающих на мишень протонов.

Работа проводилась в два этапа. На первом ионизационной методикой в диапазоне энергии нейтронов 0,024—7,4 МэВ изучалась энергетическая зависимость отношений сечений деления $^{233}\text{U}/^{235}\text{U}$ и $^{241}\text{Pu}/^{235}\text{U}$. На втором этапе методикой стекол получено 11 абсолютных значений отношений сечений деления, на которые затем нормировались кривые энергетической зависимости.

Ионизационная методика [2] состояла из двух вдвоенных ионизационных камер, размещенных последовательно и содержащих пары слоев ^{233}U и ^{235}U , ^{241}Pu и ^{235}U , что позволило провести измерения энергетической зависимости отношений сечений деления $^{233}\text{U}/^{235}\text{U}$ и $^{241}\text{Pu}/^{235}\text{U}$ в одном опыте.

Использовались слои из окислов урана и плутония на алюминиевых подложках следующего изотопного состава, %: ^{233}U —93,31; ^{241}Pu —96,02 (к моменту очистки от ^{241}Am); ^{235}U —99,97.

Абсолютизация отношений сечений деления достигалась проведением измерений с помощью методики со стеклянными детекторами в тепловой колонне реактора БР-10 с соотношением тепловых и надтепловых нейтронов $\sim 10^4$ [3]. Температура нейтронного спектра определялась пропусканием через золотой фильтр толщиной 349 мг/см² и составила $27 \pm 11^\circ\text{C}$. Для отношений сечений деления $^{233}\text{U}/^{235}\text{U}$ и $^{241}\text{Pu}/^{235}\text{U}$ на максвелловском спектре нейтронов с температурой 27°C были приняты значения 0,9293 и 1,8692, которые были получены из этих отношений для 20°C [4] с учетом энер-

гетической зависимости g_i -факторов для ^{233}U , ^{235}U [5] и ^{241}Pu [6].

В процессе работы на ускорителях экспериментально измерялись различные компоненты нейтронного фона. Поправки на фон нейтронов экспериментального зала и фон, обусловленный рассеянием нейтронов на конструкции мишени, оказались наиболее значительными для измерений под углом 120° и достигали при $E_n = 24$ кэВ 0,35 и 2,9 % ($^{233}\text{U}/^{235}\text{U}$); 0,78 и 1,6 % ($^{241}\text{Pu}/^{235}\text{U}$). Для измерений под углом 0° поправки на фон экспериментального зала не превосходили 0,2 %, поправка на фон рассеянных нейтронов изменялась в пределах 0,1—1,2 %.

Фон нейтронов сопутствующих (p, n) - и (d, n) -реакций на молибдене и титане, входящих в состав мишени, измерялся заменой мишени на шаблон из молибдена с нанесенным на него титаном. Поправка на фон (p, n) -реакций не превосходила 0,3 %, поправка на фон (d, n) -реакций достигала при $E_n = 7,4$ МэВ 6,5 и 4,6 % для $^{233}\text{U}/^{235}\text{U}$ и $^{241}\text{Pu}/^{235}\text{U}$ соответственно.

Расчетным путем вносились поправки на деление неосновных изотопов быстрыми нейтронами, угловую анизотропию деления (методика стекол) и на энергетическую зависимость эффективности регистрации осколков камерами деления.

Отношение сечений деления $^{233}\text{U}/^{235}\text{U}$ и $^{241}\text{Pu}/^{235}\text{U}$ (стекла) Таблица 1

E_n , МэВ	ΔE_n , кэВ	σ_f^3/σ_f^5	$\Delta(\sigma_f^3/\sigma_f^5)$, %	σ_f^3/σ_f^5	$\Delta(\sigma_f^3/\sigma_f^5)$, %
0,127	20	1,467	1,20	1,344	1,66
0,320	40	1,681	1,16	1,344	1,64
0,500	34	1,680	1,26	1,310	1,61
1,000	31	1,557	1,21	1,304	1,70
1,50	54	1,521	1,28	1,401	1,73
2,25	72	1,501	1,20	1,302	1,64
3,00	84	1,493	1,24	1,293	1,65
4,00	146	1,471	1,16	1,296	1,75
5,00	126	1,442	1,20	1,301	1,67
6,00	142	1,497	1,27	1,345	1,69
7,00	173	1,351	1,39	1,238	1,74

Отношение сечений деления $^{233}\text{U}/^{235}\text{U}$ и $^{241}\text{Pu}/^{235}\text{U}$ (камера)

Таблица 2

ΔE_n , МэВ	ΔE_n , кэВ	σ_f^2/σ_f^2	$\Delta(\sigma_f^2/\sigma_f^2)$, %	σ_f^1/σ_f^1	$\Delta(\sigma_f^1/\sigma_f^1)$, %	ΔE_n , МэВ	ΔE_n , кэВ	σ_f^2/σ_f^2	$\Delta(\sigma_f^2/\sigma_f^2)$, %	σ_f^1/σ_f^1	$\Delta(\sigma_f^1/\sigma_f^1)$, %
0,024	12	1,340	2,48	1,297	2,42	1,60	60	1,505	1,36	1,398	1,81
0,040	14	1,348	2,08	1,306	2,22	1,70	61	1,501	1,38	1,379	1,84
0,060	17	1,336	2,03	1,296	2,19	1,80	63	1,493	1,35	1,371	1,81
0,080	21	1,362	1,93	1,330	2,16	1,90	66	1,493	1,40	1,362	1,81
0,100	25	1,414	1,83	1,346	2,12	2,00	68	1,501	1,35	1,337	1,81
0,115	26	1,448	1,90	1,356	1,95	2,10	70	1,506	1,36	1,324	1,81
0,127	20	1,472	1,40	1,360	1,83	2,20	71	1,504	1,37	1,307	1,83
0,150	20	1,488	1,44	1,363	1,81	2,25	72	1,506	1,35	1,306	1,81
0,180	20	1,512	1,41	1,360	1,96	2,30	73	1,499	1,35	1,310	1,81
0,210	19	1,570	1,49	1,357	1,91	2,40	74	1,504	1,36	1,289	1,84
0,240	18	1,603	1,43	1,379	1,82	2,50	75	1,503	1,35	1,294	1,83
0,270	18	1,646	1,42	1,383	1,85	2,60	77	1,504	1,36	1,290	1,82
0,300	18	1,685	1,43	1,360	1,84	2,70	78	1,504	1,36	1,291	1,82
0,320	40	1,674	1,36	1,356	1,82	2,80	79	1,508	1,36	1,289	1,82
0,350	38	1,686	1,41	1,339	1,82	2,90	82	1,498	1,36	1,286	1,82
0,380	37	1,692	1,48	1,331	1,84	3,00	84	1,505	1,36	1,286	1,84
0,420	36	1,688	1,43	1,320	1,85	3,10	86	1,502	1,38	1,281	1,82
0,460	35	1,685	1,43	1,324	1,83	3,20	88	1,494	1,36	1,278	1,82
0,500	34	1,685	1,38	1,325	1,83	3,30	91	1,491	1,37	1,275	1,84
0,540	33	1,686	1,41	1,322	1,87	3,40	93	1,490	1,37	1,279	1,84
0,580	33	1,683	1,46	1,346	1,83	3,60	102	1,486	1,54	1,283	1,89
0,620	32	1,680	1,41	1,325	1,94	3,80	182	1,488	1,47	1,286	1,97
0,660	32	1,682	1,40	1,320	1,84	4,00	146	1,477	1,43	1,290	1,90
0,700	32	1,669	1,37	1,318	1,85	4,20	141	1,479	1,44	1,293	1,90
0,740	32	1,665	1,36	1,331	1,82	4,40	132	1,464	1,43	1,289	1,92
0,780	31	1,657	1,37	1,352	1,82	4,60	131	1,453	1,44	1,295	1,90
0,820	31	1,643	1,36	1,357	1,83	4,80	125	1,454	1,40	1,295	1,91
0,860	31	1,632	1,36	1,357	1,83	5,00	126	1,439	1,40	1,301	1,91
0,900	31	1,604	1,36	1,337	1,83	5,20	129	1,432	1,40	1,304	1,90
0,950	31	1,559	1,35	1,317	1,83	5,40	131	1,430	1,39	1,318	1,89
1,00	31	1,544	1,34	1,302	1,82	5,60	135	1,444	1,42	1,328	1,90
1,05	34	1,533	1,36	1,296	1,83	5,80	138	1,465	1,44	1,330	1,88
1,10	37	1,524	1,35	1,301	1,82	6,00	142	1,498	1,48	1,327	1,94
1,15	40	1,534	1,36	1,318	1,82	6,20	147	1,496	1,50	1,319	1,91
1,20	42	1,521	1,36	1,332	1,82	6,40	152	1,456	1,45	1,291	1,93
1,25	44	1,531	1,35	1,360	1,82	6,60	160	1,418	1,49	1,256	1,95
1,30	45	1,523	1,36	1,378	1,82	6,80	167	1,382	1,55	1,236	2,01
1,35	46	1,530	1,35	1,394	1,83	7,00	173	1,341	1,53	1,221	2,05
1,40	47	1,519	1,34	1,406	1,82	7,20	178	1,318	1,58	1,199	2,11
1,45	48	1,514	1,34	1,399	1,84	7,40	183	1,276	1,78	1,186	2,16
1,50	49	1,514	1,36	1,399	1,81						

Различие потоков в слоях, разделенных подложками, было учтено проведением облучений детектора со стеклами попеременно с обеих сторон, что одновременно позволило исключить поправку на упругое рассеяние нейтронов на материале между слоями. Оценка неупругого рассеяния нейтронов стенками детектора, материалом электрода и подложками слоев позволяла считать его пренебрежимо малым ($\leq 0,2\%$).

Результаты, полученные методикой стекол, представлены в табл. 1, ионизационной мето-

дикой — в табл. 2. Указана полная погрешность результатов измерений, являющаяся средней квадратической суммой всех выявленных неопределенностей. В табл. 3 показана структура характерных погрешностей измерения, выполненного методикой стекол при $E_n = 3$ МэВ.

Погрешность отношений чисел делящихся ядер в слоях, измеренных тепловой калибровкой, составила 0,76 и 1,35% для $^{233}\text{U}/^{235}\text{U}$ и $^{241}\text{Pu}/^{235}\text{U}$ соответственно. Основной вклад

Поправки и погрешности измерения отношений сечений деления $^{233}\text{U}/^{235}\text{U}$ и $^{241}\text{Pu}/^{235}\text{U}$ (методика стекол, $E_n = 3$ МэВ), %

Источники поправок и погрешностей	$^{233}\text{U}/^{235}\text{U}$		$^{241}\text{Pu}/^{235}\text{U}$	
	поправки	погрешности	поправки	погрешности
Отношение числа делящихся ядер	—	0,76	—	1,35
Просмотр стеклянных детекторов	—	0,40	—	0,40
Угловая анизотропия	0,38	0,35	0,52	0,30
Статистика измерений на быстрых нейтронах	—	0,62	—	0,58
Деление неосновных изотопов	2,96	0,16	5,03	0,28
Фон нейтронов, рассеянных на конструкцию мишени	0,15	0,32	0,47	0,30
Фон нейтронов экспериментального зала	0,12	0,28	0,14	0,24
Фон нейтронов сопутствующих (p, n)-реакций	0,10	0,18	0,16	0,22
Неупругое рассеяние	—	0,20	—	0,20
Полная погрешность	—	1,24	—	1,65

(0,58 и 1,13%) внесла неопределенность температуры нейтронного спектра (± 11 °C).

Полная погрешность результатов, полученных ионизационной методикой, квадратично складывалась из погрешности энергетической зависимости отношений сечений деления (0,5—1,8%); средней погрешности абсолютных значений, полученных методикой стекол (1,23 и 1,68% для $^{233}\text{U}/^{235}\text{U}$ и $^{241}\text{Pu}/^{235}\text{U}$); неопределенности нормировки кривой энергетической зависимости на опорные значения (0,16 и 0,25%). Статистическая погрешность определялась из разброса результатов, она составляла 0,2—0,6% в измерениях под углом 0° и возрастала до 1,3% при $E_n = 24$ кэВ. Погрешности, свя-

занные с учетом фона рассеянных нейтронов и фона экспериментального зала, в измерениях под углом 120° достигали соответственно 1,1 и 0,5%. Максимальная погрешность, обусловленная поправками на фон сопутствующих (d, n)-реакций ($E_n = 7,4$ МэВ), составила 0,8 и 1,15% для $^{233}\text{U}/^{235}\text{U}$ и $^{241}\text{Pu}/^{235}\text{U}$. Полная погрешность основной совокупности данных составляла 1,4 и 1,9% для $^{233}\text{U}/^{235}\text{U}$ и $^{241}\text{Pu}/^{235}\text{U}$ соответственно и возрастала до 2,2—2,4% на границах изученного диапазона энергии нейтронов.

На рис. 1,2 результаты настоящей работы сравниваются с данными других авторов. Для отношения сечений деления $^{233}\text{U}/^{235}\text{U}$ следует

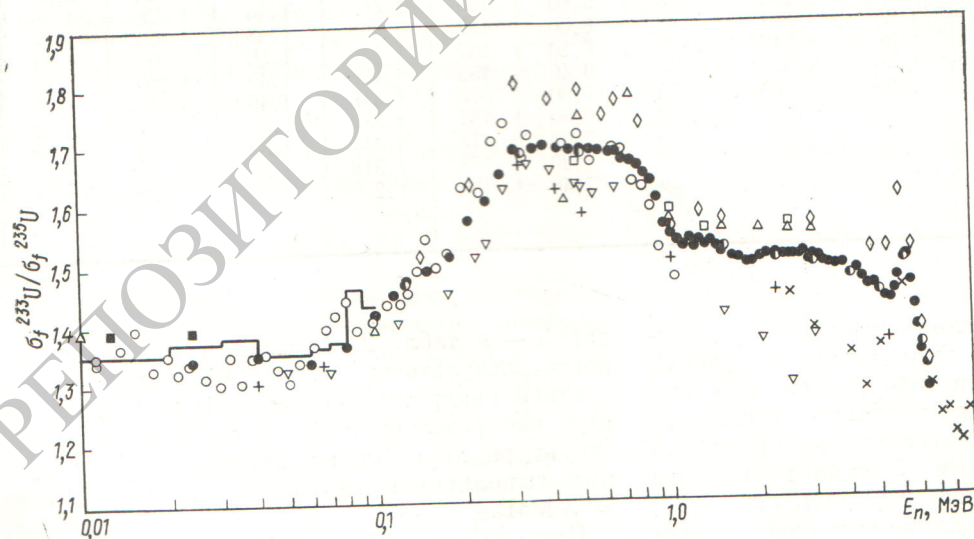
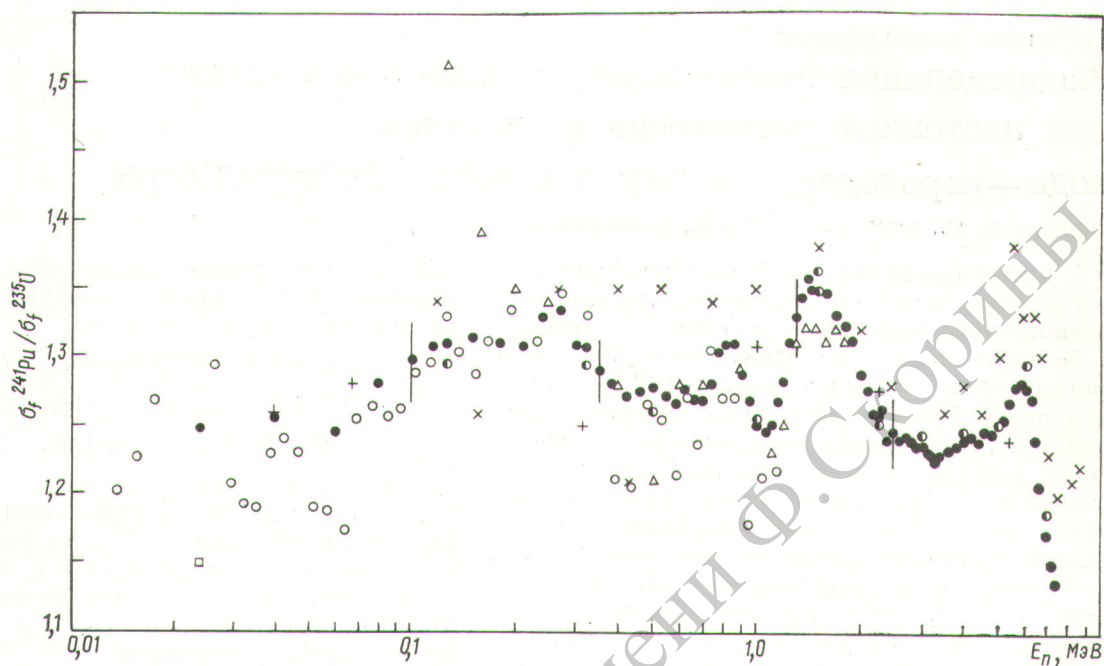


Рис. 1. Отношение сечений деления $^{233}\text{U}/^{235}\text{U}$:

○ — [7]; — — — [8]; ◇ — [9]; △ — [10]; □ — [11]; ■ — [12]; + — [13]; ▽ — [14]; × — [15];
● — камера, ● — стекла (настоящая работа)


 Рис. 2. Отношение сечений деления $^{241}\text{Pu}/^{235}\text{U}$:

+ — [13]; ○ — [16]; × — [17]; △ — [18]; □ — [19]; ● — камера, ○ — стекла (настоящая работа)

отметить хорошее согласие с результатами работ [7] и [8]. Данные работ [9—12] на 3—5% выше, а результаты работ [13—15] систематически ниже данных настоящей работы. Результаты отношения сечений деления $^{241}\text{Pu}/^{235}\text{U}$ в целом согласуются с данными работы [16], хотя для отдельных значений расхождения превосходят совместные погрешности, что можно объяснить разницей в энергетическом разрешении. Следует отметить также согласие по форме с результатами работы [17].

Авторы выражают глубокую признательность за участие в работе В. П. Полюнову, Б. К. Масленникову, В. М. Сурину и Б. А. Петрухину, а также Ю. И. Баранову, М. К. Голубевой, В. Е. Рудникову и Б. Ф. Самылину.

Поступила в Редакцию 15/II 1977 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фурсов Б. И., Куприянов В. М., Смиренин Г. Н. В кн.: Труды конф. «Нейтронная физика». Т. 6. М., изд. ЦНИИатоминформ, 1976, с. 3.
2. Фурсов Б. И. и др. В кн.: Труды конф. «Нейтронная физика». Т. 4. Обнинск, изд. ОНТИ ФЭИ, 1974, с. 3.
3. Лейпунский А. И. и др. «Атомная энергия», 1961, т. 11, вып. 6, с. 498.

4. Lemmel H. In: Proc. 4th Conf. on Nuclear Cross Sections and Technology. Washington, 3—7 March 1975, v. 1, p. 286.
5. Westcott C. Rep. AECL-1101, 1960.
6. Wagemans C., Derutter A. «Ann. Nucl. Energy», 1975, v. 2, N 7/8, p. 541.
7. Pflethinger E., Käppeler F. «Nucl. Sci. and Engng», 1970, v. 40, N 3, p. 375.
8. Gwin R. e.a. «Nucl. Sci. and Engng», 1976, v. 59, N 2, p. 79.
9. Meadows J. «Nucl. Sci. and Engng», 1974, v. 54, N 3, p. 317.
10. Lamphere R. «Phys. Rev.», 1964, v. 104, p. 1654.
11. Нестеров В. Г., Смиренин Г. Н. «Атомная энергия», 1968, т. 24, вып. 2, с. 185.
12. Lehto W. «Nucl. Sci. and Engng», 1970, v. 39, N 3, p. 361.
13. White P., Hodgkinson J., Wall G. In: Proc. IAEA Symp. «Physics and Chemistry of Fission». Salzburg, 22—26 March 1965, v. 1, p. 219; White P., Warner G. «J. Nucl. Energy», 1967, v. 21, N 8, p. 671.
14. Allen W., Fergusson A. In: Proc. «Physical Society». London, 1957, v. 70A, p. 573.
15. Smith R., Henkel R., Nobles R. «Bull. Amer. Phys. Soc.», 1957, v. II, N 2, p. 196.
16. Käppeler F., Pflethinger E. «Nucl. Sci. and Engng», 1973, v. 51, N 2, p. 124.
17. Smith H., Smith R., Henkel R. «Phys. Rev.», 1962, v. 125, p. 1329.
18. Butler D., Sjöblom R. «Phys. Rev.», 1961, v. 124, N 6, p. 1129.
19. Perkin J. e.a. «J. Nucl. Energy», 1965, v. 19, p. 423.