



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

99-208

P3-99-208

С.Б.Борзаков, Ю.С.Замятнин, Ц.Пантелеев, С.С.Павлов,
И.Русков

ИЗУЧЕНИЕ КРИВЫХ РАСПАДА
ЗАПАЗДЫВАЮЩИХ НЕЙТРОНОВ
ПРИ ДЕЛЕНИИ ^{235}U И ^{239}Pu
ТЕПЛОВЫМИ НЕЙТРОНАМИ

Направлено в журнал «Вопросы атомной науки и техники.
Серия "Ядерные константы"»

1999

Изучение кривых распада запаздывающих нейтронов при делении ^{235}U и ^{239}Pu тепловыми нейтронами

Приведены результаты измерений кривых распада запаздывающих нейтронов, образующихся в результате деления тепловыми нейтронами ядер ^{235}U и ^{239}Pu . Данные получены методом периодического облучения в интервале времени после облучения от 5 до 730 мс. Источником нейтронов служил импульсный реактор ИБР-2. Проведено сравнение измеренных кривых с кривыми, рассчитанными с использованием известных из литературы наборов параметров (относительных весов и периодов полураспада 6 или 8 экспонент). Предложен новый 7-групповой набор параметров, лучше описывающий экспериментальные данные.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И.М.Франка ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1999

Перевод авторов

Borzakov S.B. et al.

P3-99-208

Study of Delayed Neutron Decay Curves from Thermal Neutron Induced Fission of ^{235}U and ^{239}Pu

The results of measurements of decay curves for delayed neutrons, obtained in the thermal neutron induced fission of ^{235}U and ^{239}Pu , are presented. The data were obtained by the periodical irradiation method on the IBR-2 pulsed reactor in the time interval from 5 to 730 msec after the end of irradiation. The comparison of the measured curves with the curves calculated with using several known from literature parameter sets (relative weights and half-lives of 6 or 8 exponents) was carried out. The new 7-group parameter set, which describes experimental data better, is proposed.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Введение

Известно, что зависимость от времени числа запаздывающих нейтронов (ЗН) $n_d(t)$, образующихся в результате деления ядер и последующего β - распада осколков-предшественников, может быть представлена в виде суммы большого числа экспонент с постоянными распада $\lambda_i = \ln 2 / T_{1/2,i}$ и весами $a_i = Y_{ci} P_{ni}$:

$$n_d(t) = \sum_i a_i \lambda_i e^{-\lambda_i t} \quad (1)$$

где $T_{1/2,i}$ - период полураспада i -го предшественника, Y_{ci} - его кумулятивный выход при делении ядра, P_{ni} - вероятность эмиссии нейтрона в акте β -распада. Суммирование ведется по всем изотопам - предшественникам.

В связи с тем, что число предшественников очень велико (в настоящее время их известно более 270), для практического

использования выражения (1) обычно предшественники с близкими периодами разбиваются на несколько отдельных групп. Наиболее распространённой является 6-групповая система констант, впервые введённая Кипиным [1]. Некоторыми авторами предлагалось более детальное разбиение предшественников на группы [2,3], однако оно не получило распространения. В последнее время Сприггсом и др. предложена 8-групповая система, лучше согласующаяся с результатами экспериментов по измерению реактивности и периода разгона критических систем, чем 6-групповая [4,13]. В ней предлагается более естественное формирование долгоживущих групп, соответствующих предшественникам с наибольшим выходом. Однако труднее выделить доминирующие изотопы и пренебречь вкладом остальных в области более короткоживущих предшественников, где решение такой задачи становится менее однозначным (см. рис. 1).

В связи с этим было решено более детально проанализировать согласие нескольких систем констант $\{\lambda_i ; a_i\}$, предлагаемых разными авторами, с экспериментальными данными и для их уточнения провести дополнительные измерения в области коротких периодов ЗН. Такая необходимость была связана с тем, что часто используемая методика измерений, включающая перемещение образца от места облучения к детектору нейтронов, не позволяет с хорошей точностью определять характеристики ЗН, испускаемых в первую секунду после облучения. Этим объясняются величины ошибок и разброса данных (15-35%) при определении параметров 5-й и 6-й групп [5,10]. Таким образом, представлялось

целесообразным измерение кривых распада ЗН в интервале времени от нескольких миллисекунд до 1 с.

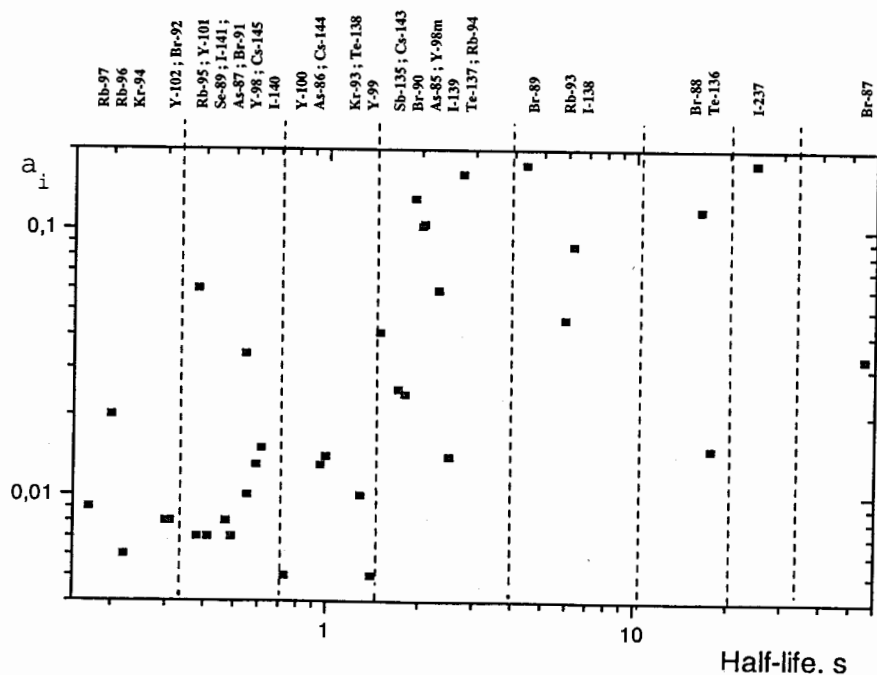


Рис. 1. Вклад различных изотопов в выход ЗН (в процентах) для деления тепловыми нейтронами ^{235}U

Эксперимент

Для этой цели в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ была использована установка "Изомер", предназначенная для определения полных выходов ЗН при делении ядер актинидов тепловыми нейтронами и использующая импульсный реактор ИБР-2 в качестве источника нейтронов [6-8]. Реактор ИБР-2, при средней

мощности 2 МВт, имеет частоту всплеск 5 Гц и мощность в импульсе 1350 МВт и является удобным источником нейтронов для изучения кривых распада короткоживущих предшественников ЗН. Главными элементами установки "Изомер" являются прерыватель тепловых нейтронов и детектор высокой эффективности, состоящий из 12 ^3He -счетчиков в замедлителе. Установка расположена на выходе изогнутого зеркального нейтронвода, что позволило проводить измерения в достаточно хороших фоновых условиях.

В настоящей работе представлены результаты повторных измерений и анализ кривых распада ЗН, образовавшихся в результате деления ^{235}U и ^{239}Pu тепловыми нейтронами, в более широком (по сравнению с нашей предыдущей работой [8]) интервале времени распада от 5 мс до 730 мс после окончания облучения. Измерения проведены методом периодического облучения образца с частотой облучения 1,25 Гц, что достигалось уменьшением частоты вращения прерывателя. В качестве образцов использовались металлические мишени ^{235}U и ^{239}Pu весом 7 и 10 г соответственно.

Фон определялся в измерениях с кадмиевым фильтром в пучке и составлял величину не более 1% от полного счета нейтронов в исследуемом интервале времени. Результаты измерений с вычтенным фоном показаны на рис. 2 для ^{235}U и на рис. 3 - для ^{239}Pu . Накопление данных проводилось в течение 40 часов для ^{235}U и 86 часов для ^{239}Pu . При этом статистическая

точность отсчетов составляла 0,3- 0,4 % для ^{235}U и ^{239}Pu в каждом временном канале, равном 1,024 мс.

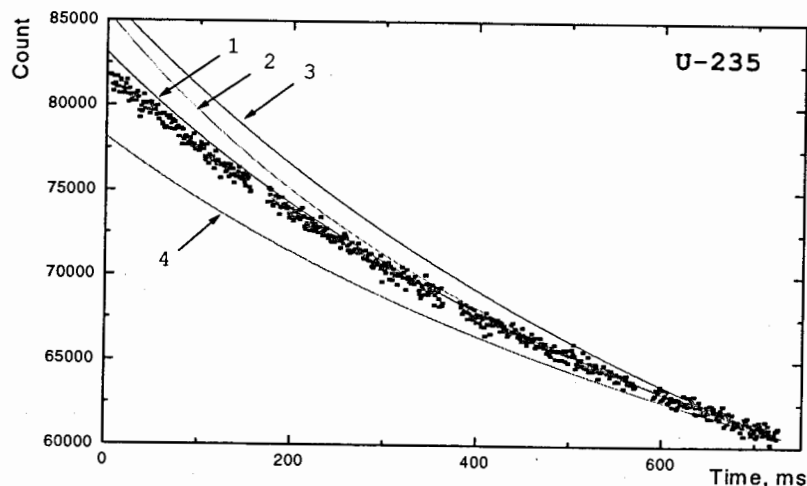


Рис. 2. Экспериментальная кривая, полученная с образцом ^{235}U . Показаны кривые распада, рассчитанные с использованием следующих наборов параметров: 1- R. J. Tuttle [5]; 2- R.W. Waldo et al. [10]; 3- R.W. Mills et al. [11], 4 - G.D. Spriggs et al. [13]

Анализ и обсуждение результатов

Для сравнения полученных нами данных с результатами ранее опубликованных работ были построены кривые распада с использованием различных наборов относительных весов и периодов полураспада каждой группы, приведенных в работах [5,10,11,13] для ^{235}U и [5,10,12,16] для ^{239}Pu . Кривые распада

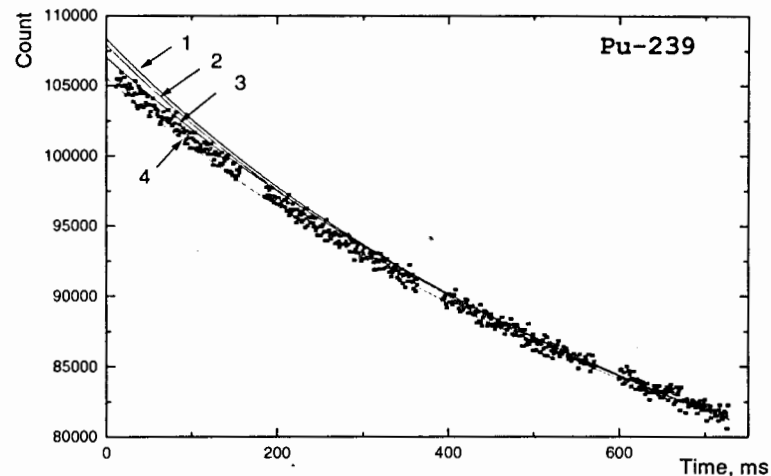


Рис. 3. Экспериментальная кривая, полученная с образцом ^{239}Pu . Показаны кривые распада, рассчитанные с использованием следующих наборов параметров: 1- R.J. Tuttle [5], 2 - Brady-England [16]; 3 - A. Wahl [12]; 4 - R.W. Waldo [10]

$\bar{n}_d(t)$ рассчитывались по формуле, учитывающей периодический характер облучения, приведенной в [8]:

$$\bar{n}_d(t) = N_f \cdot v_d \cdot \varepsilon_d \cdot \sum_{i=1}^6 \frac{a_i}{\Delta t} \cdot \frac{1 - \exp(-\lambda_i \cdot \Delta t)}{1 - \exp(-\lambda_i \cdot T)} \cdot \exp(-\lambda_i \cdot t) \quad (2)$$

Здесь N_f - число актов деления, v_d - выход ЗН, T - период облучения, Δt - время облучения в течение одного периода, ε_d - эффективность детектора, a_i - относительный вес i -ой группы ($\sum a_i = 1$). Поскольку для достижения высокой статистической точности измерения числа ЗН было необходимо использовать образцы большой массы, число актов деления не определялось из-

за просчетов аппаратуры. Нормировочная константа $C = N_f V_d \epsilon_d$ определялась с помощью подгонки. Как видно из рис. 2, авторы работ [10,11] завышают вклад короткоживущих предшественников, а работы [13] - занижают. Наилучшим образом экспериментальные данные описываются с помощью набора параметров из работы [5]: $\chi^2 = 2,6$ на одну точку.

Большой интерес, с нашей точки зрения, представляет последнее предложение Спрингса и др. об использовании 8-групповой системы констант [13], в которой в качестве параметров группы предложены параметры предшественников, доминирующих в группе. Не вызывает сомнения целесообразность такого подхода, по крайней мере для первых четырех долгоживущих групп предшественников (см. рис. 1). Однако в связи с заметным расхождением хода кривых в области коротких периодов и наличия в 5-й и 7-й группах [13] большого числа предшественников, имеющих сравнимые выходы, нами была предпринята попытка учесть вклад большего числа предшественников ЗН в этих группах. При этом использовались данные по периодам полураспада из [14], значениям P_n из [15] и кумулятивным выходам из [12]. Кроме того, вследствие отсутствия предшественников с заметным относительным выходом ($> 0,01\%$) в интервале $T_{1/2} \approx 0,6 \div 1,4$ с и соответственно малым суммарным вкладом $a_6 < 0,02\%$ представляется целесообразным исключить ее как отдельную группу и перейти к 7-групповой системе констант (см. табл. 1).

Таблица 1. Разбиение на группы и набор параметров для ^{235}U

Номер группы	Ядро-предшественник	$T_{1/2,i}$, с	a_i (на 100 актов деления)	Среднее значение $T_{1/2,j}$, с	Вес группы, (на 100 актов деления)
1	Br-87	55,60	0,054	55,6	0,054
2	I-137	24,50	0,233	24,5	0,233
3	Te-136	17,70	0,015	16,4	0,134
	Br-88	16,23	0,119		
4	I-138	6,27	0,087	4,99	0,309
	Rb-93	5,91	0,046		
	Br-89	4,37	0,176		
5	Rb-94	2,73	0,162	2,07	0,664
	Te-137	2,50	0,014		
	I-139	2,29	0,059		
	Y-98m	2,05	0,105		
	As-85	2,02	0,103		
	Br-90	1,91	0,131		
	Cs-143	1,79	0,024		
	Sb-135	1,70	0,025		
	Y-99	1,48	0,041		
	Kr-93	1,29	0,010		
6	Cs-144	0,99	0,014	0,494	0,159
	As-86	0,95	0,013		
	Y-100	0,73	0,005		
	I-140	0,61	0,015		
	Cs-145	0,586	0,013		
	Y-98	0,549	0,010		
	Br-91	0,542	0,034		
	As-87	0,490	0,007		
	I-141	0,470	0,008		
	Se-89	0,410	0,007		
	Y-101	0,380	0,007		
	Rb-95	0,379	0,060		
7	Br-92	0,31	0,008	0,218	0,045
	Y-102	0,30	0,008		
	Kr-94	0,22	0,006		
	Rb-96	0,199	0,020		
	Rb-97	0,169	0,009		

Средний период полураспада для каждой группы определялся

по формуле

$$\langle T \rangle = \frac{\ln 2}{\langle \lambda \rangle},$$

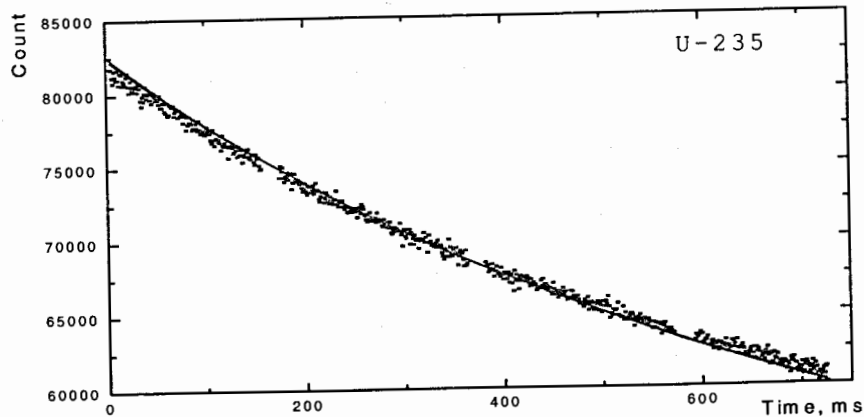
где

$$\langle \lambda \rangle = \sum_i a_i \lambda_i \cdot \left(\sum_i a_i \right)^{-1}, \quad (3)$$

Здесь j - число предшественников, входящих в данную группу.

Сопоставление расчетов по предложенной системе констант с результатами эксперимента представлено на рис. 4 для ^{235}U . Как видно из рисунка, согласие с экспериментом значительно улучшилось ($\chi^2 = 1,6$).

Рис. 4. Кривая распада для ^{235}U рассчитанная в 7-ми групповом приближении



Экспериментальные данные, полученные с образцом ^{239}Pu , анализировались в 6- и 7-групповом приближении таким же образом, как и в случае ^{235}U . Разбиение на группы для ^{239}Pu

показано в табл. 2. На рис. 5 показано согласие рассчитанной кривой с экспериментальными данными.

Согласие с экспериментальными данными для ^{239}Pu несколько хуже, чем для ^{235}U ($\chi^2 = 2,7$).

Таблица 2. Разбиение на группы для ^{239}Pu

Номер группы	Ядро-предшественник	$T_{1/2,i}$, с	a_i (на 100 актов деления)	Средний период полураспада, с	Вес группы (на 100 актов деления)
1	Br-87	55,6	0,017	55,6	0,017
2	I-137	24,5	0,157	24,5	0,157
3	Te-136	17,7	0,009	16,5	0,043
	Br-88	16,23	0,034		
4	I-138	6,27	0,061	5,40	0,123
	Rb-93	5,91	0,019		
	Br-82	4,37	0,043		
5	Nb-105	2,95	0,0117	2,097	0,248
	Rb-94	2,73	0,0635		
	I-139	2,29	0,0297		
	Y-98m	2,05	0,0440		
	As-85	2,02	0,0165		
	Br-90	1,91	0,0333		
	Cs-143	1,79	0,0103		
	Sb-135	1,70	0,0117		
Y-99	1,48	0,0270			
6	Cs-144	0,99	0,0044	0,460	0,061
	Y-100	0,73	0,0034		
	I-140	0,61	0,0031		
	Cs-145	0,586	0,0032		
	Y-98	0,549	0,0085		
	Br-91	0,542	0,0046		
	Y-101	0,380	0,0027		
	Rb-95	0,379	0,0310		
7	Rb-96	0,199	0,0070	0,191	0,00915
	Rb-97	0,169	0,00215		

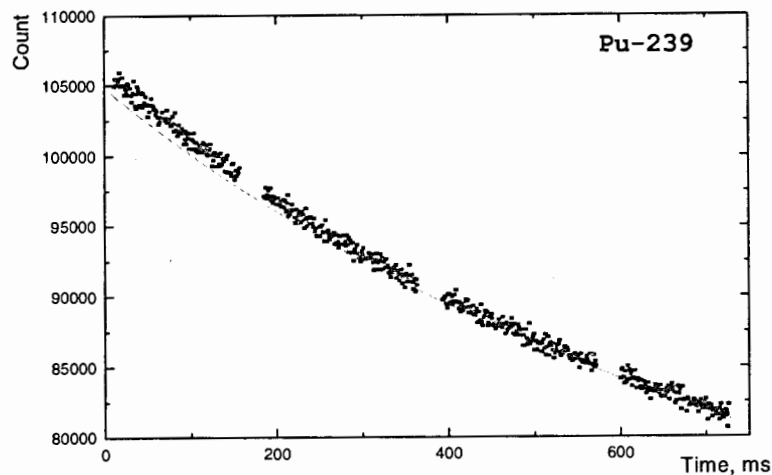


Рис. 5. Кривая распада для ^{239}Pu , рассчитанная в 7-групповом приближении.

Заключение

В настоящей работе представлены результаты измерений и анализ кривых распада ЗН в интервале времени 5-730 мс после окончания облучения для ^{235}U и ^{239}Pu , выполненные с высокой статистической точностью (0.3-0.4 % во временном канале 1 мс).

Проведено сравнение полученных экспериментальных данных с кривыми, рассчитанными для различных наборов групповых констант в 6- и 8-групповых приближениях.

Для ^{235}U и ^{239}Pu предложен 7-групповой набор параметров, опирающийся на известные из литературы характеристики около

30 предшественников с выходом 0.01% и выше, более точно описывающий экспериментальные данные.

Авторы выражают благодарность Ю.В. Григорьеву за предоставление образцов, В.И. Фурману за поддержку работы.

Литература

1. G.R. Keepin, Physics of Nuclear Kinetics, Addison Wesley, Reading, Mass., 1965.
2. Б. В. Максютенко, ЯФ, т. 13, вып. 2, 1971.
3. Л.Г. Маневич, П.Э. Немировский, М.С. Юдкевич, ВАНТ, Серия Ядерные константы, вып. 2, с. 3, 1988.
4. G.D Spriggs, Report at "Colloquy on Delayed Neutron Data", Obninsk, Russia, 9 - 10 April, 1997.
5. R.J. Tuttle, IAEA report, INDC(NDS)-107/G+Special, p. 29, 1979.
6. S.B. Borzakov, E. Dermendjiev, Yu.S. Zamyatnin, V.M. Nazarov, S.S. Pavlov, A.D. Rogov, I. Ruskov, Preprint JINR P3-94-447, 1994.
7. С.Б. Борзаков, Э. Дерменджи́ев, Ю.С. Замятнин, В.М. Назаров, С.С. Павлов, А.Д. Рогов, И. Русков, Атомная энергия, т. 79, с. 231, 1995.
8. С.Б. Борзаков, А.А. Андреев, Э. Дерменджи́ев, А. Филип, В.И. Фурман, Ц. Пантелеев, И. Русков, Ю.С. Замятнин, Ш. Зейналов, Сообщение ОИЯИ, Е3-98-145, Дубна, 1998.
9. F. James, M. Ross, CERN Program Library, D506, 1989.
10. R.W.Waldo et al., Phys. Rev. C23, p. 1113, 1981.

11. R.W.Mills et al., Nuclear Data for Science and Technology, Proceedings, FRG, Juelich, 13-17 May 1991, p. 86, Springer-Verlag, Berlin, 1992.
 12. A.C.Wahl, Atomic Data and Nuclear Data Tables, v. 39, p. 1, 1988.
 13. G.D. Spriggs, J.M. Campbell, V.M. Piksaikin, LA-UR-98-1619, Los-Alamos, 1998.
 14. G. Rudstam, IAEA Report INDC (SWD) 24/L+P, Vienna, 1993.
 15. G. Rudstam, At. Data and Nucl. Data Tables, v. 53, p. 1, 1993.
 16. M.C. Brady, T.R. England, Nucl. Sci. Eng., v. 103, p. 129, 1989.
-