

3/12-79

3439/2-79



сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
дубна

С341.30

Б-19

P3 - 12404

Т.Бакалов, А.А.Ваньков, Ю.В.Григорьев, Г.Илчев,  
С.Тошков, В.Ф.Украинцев, Чан Хань Май, Н.Янева

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ЭФФЕКТОВ РЕЗОНАНСНОГО САМОЭКРАНИРОВАНИЯ  
В ПОЛНОМ СЕЧЕНИИ  
И СЕЧЕНИИ ДЕЛЕНИЯ ПЛУТОНИЯ-239

1979

РЗ - 12404

Т.Бакалов, А.А.Ваньков,\* Ю.В.Григорьев,\* Г.Илчев,  
С.Тошков, В.Ф.Украинцев,\* Чан Хань Май, Н.Янева

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ЭФФЕКТОВ РЕЗОНАНСНОГО САМОЭКРАНИРОВАНИЯ  
В ПОЛНОМ СЕЧЕНИИ  
И СЕЧЕНИИ ДЕЛЕНИЯ ПЛУТОНИЯ-239

\* Физико-энергетический институт /г. Обнинск/

Экспериментальные исследования эффектов резонансного самоэкранирования в полном сечении и сечении деления плутония-239

В работе приводятся коэффициенты резонансной блокировки для полного сечения и сечения деления плутония-239 в диапазоне энергий  $E=21,5 \pm 4,65 \times 10^{-3}$  кэВ, впервые полученные непосредственно путем измерения функций пропускания нейтронов. Измерения проводились на спектрометре по времени пролета реактора ИБР-30 методом пропускания нейтронного пучка через плоские металлические образцы плутония-239 с толщинами от 0,86 до 49 г/см<sup>2</sup> и регистрации временных нейтронных спектров с помощью батареи пропорциональных <sup>3</sup>He-счетчиков и быстродействующей ионизационной камеры деления с 22 слоями плутония-239 общим весом 0,5 г. Обработка результатов измерений функций пропускания проводилась как методом наименьших квадратов /МНК/, так и методом максимального правдоподобия с привлечением априорной информации /байесовский подход/. Последний приводит к большей устойчивости результатов и существенно меньшему времени счета на ЭВМ по сравнению с МНК.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1979

Experimental Study of Resonance Self-Shielding Effects for Total and Fission Cross-Sections of Plutonium-239

By experimental measurement of the neutron transmission functions through metallic samples of plutonium-239 with the thickness from 0.86 to 49 g/cm<sup>2</sup> and time-of-flight spectrometers at the pulsed fast reactor IBR-30 the resonance self-shielding effects for total neutron cross-section and fission cross-section of plutonium-239 in the energy range from 21.5 to 4.65x10<sup>-3</sup> keV have been obtained. Time-of-flight neutron spectra have been determined with the help of batteries of proportional <sup>3</sup>He-counters and fast-working ionization fission chamber with 22 layers of plutonium-239 and total mass 0.5 g. The treatment of transmission measured functions has been carried out with the help of the least-square method (LSM) and the statistical method using a priori information (Bayesian approach). The second method leads to the better stability of the results and to essentially smaller computer time on the IBM as compared with the LSM.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

Важное значение при расчетах реакторов на быстрых нейтронах имеет исходная информация о нейтронных сечениях в резонансной области энергий урана-235, урана-238, плутония-239. Справочные данные по ядерно-физическим константам этих элементов получены путем измерений нейтронных сечений и резонансных параметров в разрешенной области энергий. При переносе этой информации на неразрешенную область вносятся погрешности, обусловленные ошибками определения резонансных параметров и неточностями расчетно-теоретической модели. Поэтому важно осуществить проверку групповых констант прямым измерением.

В данной работе впервые приводятся коэффициенты резонансной блокировки /или самоэкранировки/ плутония-239, полученные непосредственно путем измерения функций пропускания вида

$$\langle T(t) \rangle_{\Delta E} = \frac{\int_{\Delta E} \phi(E) \epsilon(E) e^{-\sigma(E)t} dE}{\int_{\Delta E} \phi(E) \epsilon(E) dE} = \frac{N_{\text{обр}}}{N_{\text{оп}}}, \quad /1/$$

где  $\langle T(t) \rangle_{\Delta E}$  - пропускание нейтронов, усредненное по спектру  $\phi(E)$  и эффективности детектора  $\epsilon(E)$  в энергетическом интервале  $\Delta E$ ;  $\sigma(E)$  - полное нейтронное сечение ядер образца;  $t$  - толщина образца;  $N_{\text{обр}}$ ,  $N_{\text{оп}}$  - счет детектора при измерениях с образцом и без образца.

Если детектор имеет эффективность регистрации нейтронов, пропорциональную парциальному сечению исследуемых образцов  $\sigma_x(E)$  /где  $x = f, \gamma, s$  /, то выражение /1/ преобразуется к виду

$$\langle T_x(t) \rangle_{\Delta E} = \frac{\int_{\Delta E} \phi(E) \sigma_x(E) e^{-\sigma(E)t} dE}{\int_{\Delta E} \phi(E) \sigma_x(E) dE} = \frac{N_{\text{обр}}}{N_{\text{оп}}}, \quad /2/$$

Изучение резонансной структуры нейтронных сечений  $^{239}\text{Pu}$  производилось в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ. Измерения функций пропускания для  $^{239}\text{Pu}$  производились с использованием нейтронного спектрометра по времени пролета на импульсном реакторе ИБР-30. Пропускание  $T(t)$  /1/ измерялось на пролетной базе 1000 м с использованием  $^3\text{He}$ -счетчиков, а  $T_x(t)/2/$  - на базе 75 м с камерой деления по схеме, изображенной на рис. 1. В первом случае использовался так называемый реакторный режим /частота следования - 5 Гц при ширине нейтронной вспышки 70 мкс/, во втором случае - бустерный режим с инжектором /100 Гц и 4 мкс/.

В качестве образцов применялись металлические таблетки  $^{239}\text{Pu}$  в виде дисков диаметром 48 мм, герметично запаянные в оболочку из нержавеющей стали. Быстродействующая ионизационная камера содержала 22 слоя плутония-239 общим весом 0,5 г. Конструкция камеры деления аналогична описанной в работе <sup>1/</sup>, а описание  $^3\text{He}$ -счетчиков содержится в работе <sup>2/</sup>.

Временные спектры от ионизационной камеры и батарей гелиевых счетчиков записывались на два независимых временных анализатора типа АИ-4096. В дальнейшем информация с анализаторов передавалась на ЭВМ БЭСМ-4, где проводилась их первичная обработка, т.е. вычитание фона и получение усредненных функций пропускания в пределах энергетических групп 26-групповой системы констант <sup>3/</sup>. Фон временных спектров оп-

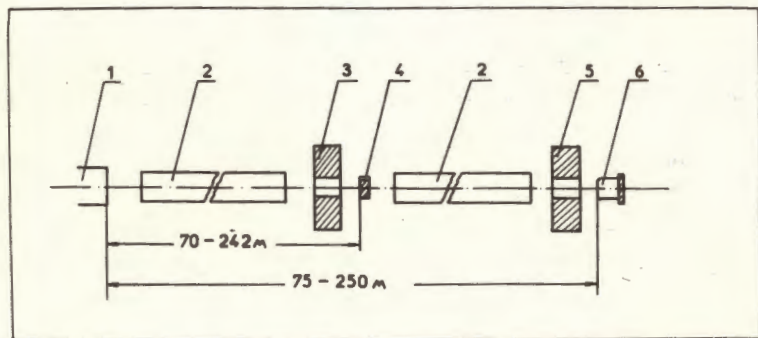


Рис.1. Схема эксперимента для получения эффектов резонансного самоэкранирования  $^{239}\text{Pu}$ . 1 - источник нейтронов ИБР-30, 2 - нейтронпроводы, 3 и 5 - коллиматоры, 4 - образцы  $^{239}\text{Pu}$ , 6 - камера деления.

ределялся экспериментально с помощью резонансных фильтров из вольфрама, марганца, натрия, кобальта и титана при энергиях  $E=4,8; 19; 132; 337$  эВ и 2,4; 17 кэВ.

На рис. 2 изображены численные значения экспериментальных функций пропусканий  $T(t)$  и  $T_f(t)$  для 8 образцов  $^{239}\text{Pu}$  с толщинами  $t$  от 0,86 до 49 г/см<sup>2</sup>.

Экспериментальные ошибки /статистические и систематические/ для полного сечения во всех группах примерно одинаковые и составляют 2-3%. Для пропусканий по сечению деления эти ошибки составляют 6-12%. В случае пропусканий по сечению деления определяющими являются ошибки за счет фона, доля которого в спектре составляет 50-80% при больших толщинах образцов, а точность определения этих ошибок равна 5-10%.

Окончательная обработка измеренных функций пропускания проводилась как методом наименьших квадратов /МНК/, так и методом максимального правдоподобия с привлечением априорной информации. Второй метод основан на так называемом байесовском подходе и описан в работах <sup>4,5/</sup>. Применительно к данной задаче его суть сводится к следующему. Представим функции пропускания /1/ и /2/ в виде

$$T(t) = \int_0^{\infty} \mathcal{P}(\sigma) e^{-\sigma t} d\sigma, \quad /3/$$

$$T_f(t) = \int_0^{\infty} \frac{\sigma_f(\sigma)}{\langle \sigma_f \rangle} \mathcal{P}(\sigma) e^{-\sigma t} d\sigma, \quad /4/$$

где  $\mathcal{P}(\sigma)$  - функции распределения полного сечения /плотность вероятности/ в заданной энергетической группе.  $\sigma_f(\sigma)$  - корреляционная функция сечения деления и полного сечения.

Представляя подынтегральные выражения кусочно-постоянными функциями, получаем систему алгебраических уравнений с неизвестными амплитудами функций распределения. Априорная информация может быть учтена в следующих пунктах:

1. Теоретическая оценка функций  $\mathcal{P}(\sigma)$  и  $\sigma_f(\sigma)$ , область задания  $\mathcal{P}(\sigma)$  ( $\sigma_{\min} \div \sigma_{\max}$ ).
2. Требование  $T(0) = 1$ .
3. Существование оценки полных средних сечений.

Практически дополнительный учет средних сечений /с точностью  $\pm 20\%$ / не влияет на результаты обработки, если содер-

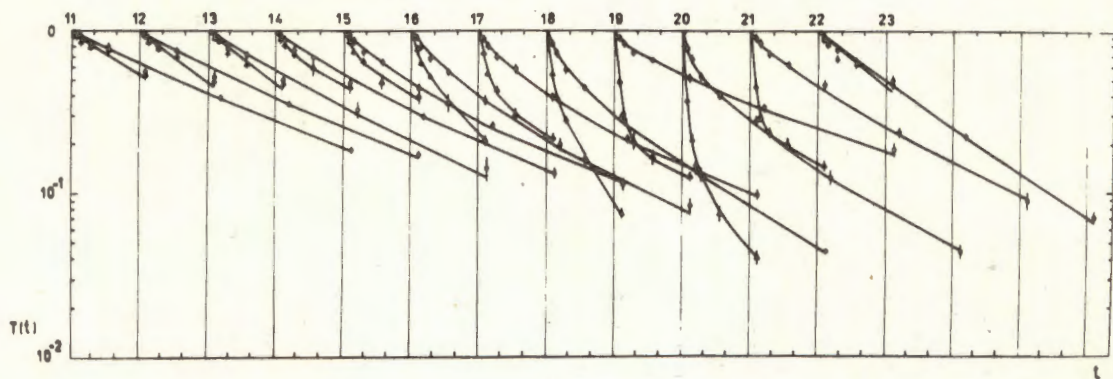


Рис.2. Значения пропускания  $T(t)$  и  $T_p(t)$  образцов с толщами  $t$  от 0,86 до 49 г/см<sup>2</sup> в 12 энергетических группах<sup>/3/</sup> /с 11-й до 22-й/.  $\circ$  - экспериментальные значения полного пропускания,  $\Delta$  - экспериментальные значения пропускания по сечению деления. Сплошные линии - теоретические оценки.

Таблица 1

Групповые полные сечения для плутония-239 /барн/

№ гр.	$E_n$	БНАБ 1964	БНАБ 1970	БНАБ 1978	UKNDL 1972	ENDL 1970	Настоящая работа
11	21,5 - 10 кэВ	15,0	14,4	14,78	14,5	15,2	14,77 ± 0,60
12	10 - 4,65	16,5	16,0	15,74	16,4	17,7	17,10 ± 1,00
13	4,65 - 2,15	18,0	18,0	17,96	18,7	20,7	19,39 ± 1,20
14	2,15 - 1	19,5	21,0	20,71	21,4	24,2	19,64 ± 1,50
15	1000 - 465 эВ	26,0	27,0	28,43	28,1	29,8	33,44 ± 5,00
16	465 - 215	36,5	38,0	38,90	39,2	40,6	40,20 ± 4,00
17	215 - 100	48,0	48,0	50,27	49,2	53,7	54,34 ± 4,00
18	100 - 48,5	127,0	124,0	99,99	100,0	117,7	103,6 ± 8,50
19	48,5 - 21,5	68,0	68,0	64,20	64,2	72,1	63,94 ± 8,50
20	21,5 - 10	194,0	186,0	188,50	188,5	193,6	177,40 ± 18,00
21	10 - 4,65	90,5	70,0	72,10	72,1	73,2	72,67 ± 16,00

жающаяся в функциях пропускания информация приводит к точности определения среднего сечения, лучшей чем априорная оценка. Учет априорной информации, отмеченной в пунктах 1 и 2, даже при неопределенности  $\pm 100\%$ , приводит к существенно большей устойчивости результатов по сравнению с полученными традиционным методом наименьших квадратов. Причем время счета на ЭВМ CDC-6500 для программы байесовского подхода примерно в 5 раз меньше, чем для программы МНК.

Основным результатом обработки является получение  $\mathcal{P}(\sigma)$  и  $\sigma_f(\sigma) \mathcal{P}(\sigma)$  в виде гистограммы. Разбиение оси  $\sigma$  обычно производилось на 10-15 интервалов. Погрешность решения характеризуется ковариационной матрицей. На основе оценки  $\mathcal{P}(\sigma)$  и  $\sigma_f(\sigma) \mathcal{P}(\sigma)$  получались различные характеристики резонансной структуры сечений  $\langle \sigma^n \rangle$  и коэффициенты резонансной самоэкранировки полного сечения и сечения деления:

$$F_t(\sigma_0) = \frac{1}{\langle \sigma \rangle} \left[ \frac{\langle \frac{1}{\sigma + \sigma_0} \rangle}{\langle \frac{1}{(\sigma + \sigma_0)^2} \rangle} - \sigma_0 \right], \quad /5/$$

$$F_f(\sigma_0) = \frac{1}{\langle \sigma_f \rangle} \frac{\langle \frac{\sigma_f}{\sigma + \sigma_0} \rangle}{\langle \frac{1}{\sigma + \sigma_0} \rangle}, \quad /6/$$

где  $\sigma_0$  - сечение разбавления, представляющее сумму полных сечений всех других примесных изотопов в расчете на один атом  $^{239}\text{Pu}$ .

Как известно, таблица коэффициентов резонансной самоэкранировки в системах групповых констант для расчета реакторов составляется для различных сечений разбавления и температур. Приводимые ниже результаты относятся к комнатной температуре и к нулевому сечению разбавления.

В табл. 1 сравниваются некоторые существующие оценки среднегрупповых полных сечений  $^{239}\text{Pu}$  с результатами наших измерений. Источники оценок, полученных Абагяном и др.\*

\* В дальнейшем будем ссылаться на этих авторов сокращенно, как это принято в литературе, по первым буквам их фамилий: БНАБ.

/1970 г./, а также в лабораториях Англии и США UKNDL /1972 г./ и ENDL/1970 г./, приводятся, например, в<sup>6,8,9/</sup> Результаты настоящей работы по среднегрупповому полному сечению удовлетворительно согласуются с последней оценкой БНАБ /1978 г./<sup>10/</sup> и данными других упомянутых выше работ в пределах экспериментальных погрешностей, которые обусловлены статистическими и систематическими ошибками.

В табл. 2 и 3 сравниваются наши экспериментальные значения и оценки коэффициентов резонансной блокировки сечения деления и полного сечения  $^{239}\text{Pu}$ , выполненные БНАБ и др. По сравнению с последними<sup>10/</sup> экспериментальные коэффициенты резонансной блокировки во всех энергетических группах указывают на меньшую блокировку в сечении деления и на большую блокировку полного сечения. Кроме того, из эксперимента следует, что эффекты блокировки в полном сечении более значительны, чем в парциальном сечении деления. В оценках БНАБ /1978 г./<sup>10/</sup>

Таблица 2  
Коэффициенты резонансной самоэкранировки сечения деления  $^{239}\text{Pu}$

№ гр.	$E_n$	БНАБ 1964	БНАБ 1978	UKNDL 1972	Настоящая работа
11	21,5 - 10 кэВ	0,93	0,925	0,999	0,962 $\pm$ 0,03
12	10 - 4,65	0,84	0,839	0,989	0,879 $\pm$ 0,04
13	4,65 - 2,15	0,64	0,635	0,954	0,800 $\pm$ 0,05
14	2,15 - 1	0,49	0,508	0,908	0,706 $\pm$ 0,13
15	1000 - 465 эВ	0,38	0,373	0,802	0,600 $\pm$ 0,10
16	465 - 215	0,29	0,296	0,537	0,533 $\pm$ 0,05
17	215 - 100	0,20	0,205	0,417	0,403 $\pm$ 0,04
18	100 - 46,5	0,16	0,131	0,425	0,275 $\pm$ 0,03
19	46,5 - 21,5	0,16	0,132	0,225	0,206 $\pm$ 0,06
20	21,5 - 10	0,17	0,149	0,149	0,194 $\pm$ 0,02
21	10 - 4,65	0,18	0,268		0,268 $\pm$ 0,04

Таблица 3  
Кoeffициенты резонансной самоэкранировки  
полного сечения  $^{239}\text{Pu}$

№ гр.	$E_n$	БНАБ 1964	БНАБ 1978	Настоящая работа
II	21,5 - 10 кэВ	0,94	0,945	$0,766 \pm 0,16$
I2	10 - 4,65	0,87	0,868	$0,724 \pm 0,14$
I3	4,65 - 2,15	0,76	0,739	$0,701 \pm 0,15$
I4	2,15 - I	0,64	0,635	$0,588 \pm 0,07$
I5	1000 - 465 эВ	0,51	0,467	$0,376 \pm 0,03$
I6	465 - 215	0,40	0,361	$0,392 \pm 0,03$
I7	215 - 100	0,31	0,279	$0,188 \pm 0,05$
I8	100 - 46,5	0,16	0,155	$0,139 \pm 0,02$
I9	46,5 - 21,5	0,19	0,235	$0,181 \pm 0,03$
20	21,5 - 10	0,10	0,110	$0,088 \pm 0,008$
21	10 - 4,65	0,17	0,276	$0,171 \pm 0,03$

блокировка более сильная для сечения деления, чем для полного сечения.

Обращает на себя внимание различие коэффициентов резонансной блокировки сечения деления во всей резонансной области  $E \leq 21,5$  кэВ по данным UKNDL и БНАБ /1978 г./ . Полученные нами данные лежат между результатами UKNDL и БНАБ /1978/ /см. рис. 3/.

Отметим, что до настоящего времени опубликована только одна работа, где имеются сходные с нашими данные о функциях пропускания  $^{239}\text{Pu}$  /7/. Однако в ней приведены только функции пропускания вида /2/ для деления в небольшом интервале толщин /от 0,06 до 3 г/см<sup>2</sup>/, и коэффициенты резонансной блокировки исходя из этих данных не могут быть получены, т.к. нет опубликованных данных о функции пропускания для полного сечения. В диапазоне энергий нейтронов и толщин образцов  $^{239}\text{Pu}$ , где результаты могут быть сопоставлены, данные работы /7/ удовлетворительно согласуются с результатами настоящей работы.

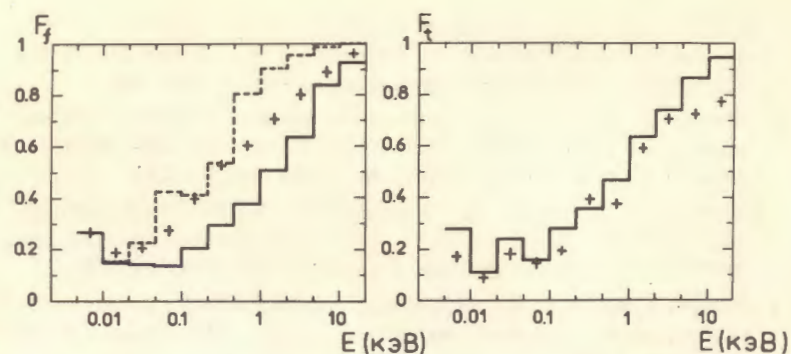


Рис. 3. Коэффициенты резонансной самоэкранировки сечения деления  $F_f$  и полного сечения  $F_t$  для  $\text{Pu}-239$  в области энергии  $E \leq 21,5$  кэВ. — - результаты БНАБ /СССР/, - - - - - результаты UKNDL /Англия/, + - данные настоящей работы /ОИЯИ/

В заключение авторы выражают благодарность Л.Б.Пикельнеру за полезные обсуждения и поддержку работы, Ц.Ц.Пантелееву за разработку конструкции камеры деления, а также Н.С.Клюеву и В.В.Пискуновой за участие в измерениях и обработке результатов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Богдзель А.А. и др. Быстродействующая ионизационная камера с радиаторами из  $^{235}\text{U}$ . ПТЭ, 1976, т. 1, с. 36.
2. Бемер Б. и др. Компактный нейтронный детектор в виде батареи из пропорциональных  $^3\text{He}$ -счетчиков. ПТЭ, 1974, т. 6, с. 57.
3. Абагян А.П. и др. Групповые константы для расчета ядерных реакторов, Атомиздат, М., 1964.
4. Ваньков А.А. Байесовский подход в интерпретации физических экспериментов. В кн.: Ядерные константы. Атомиздат, М., 1974, вып. 16, с. 11.
5. Бакалов Т. и др. Байесовский метод обработки измеренных функций пропускания нейтронов для определения факторов резонансного самоэкранирования и других средних характеристик. ОИЯИ, РЗ-12230, Дубна, 1979.
6. Возяков В.В. и др. Подготовка ядерных данных для детального расчета спектра нейтронов в быстрых системах. В кн.: Ядерные константы. Атомиздат, М., 1977, вып. 27, с. 16.

7. Cziirr J.B., Bramblet R.L. Measurement of Fissions Produced in Bulk Plutonium-239 by 2 eV to 10 keV Neutrons, *Nuclear Science and Engineering*, 1967, v. 28, No. 1.
8. Ваньков А.А. и др. Среднегрупповые полные сечения для изотопов урана-235, урана-238, плутония-239. В кн.: *Нейтронная физика*. Атомиздат, М., 1974, ч.2, с.213.
9. Menaface E., Motta M., Panini G.C. A 26-Group Library with Self-Shielding Factors for Fast Reactor Calculations from the UK Nuclear Data File RT/FI (73) 15, 1973.
10. Ваньков А.А. и др. Изучение резонансной самоэкранировки нейтронных сечений тяжелых ядер. Препринт ФЭИ-905, Обнинск, 1979.

Рукопись поступила в издательский отдел  
19 апреля 1979 года.