

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

РЗ-97-398

С.Б.Борзаков, Ю.С.Замятин, Ш.С.Зейналов,
В.Ю.Коновалов, Ц.Ц.Пантелеев, И.Русков,
М.Флорек

ДЕЛИТЕЛЬНЫЕ ШИРИНЫ РЕЗОНАНСОВ
И СЕЧЕНИЕ ДЕЛЕНИЯ ^{234}U НЕЙТРОНАМИ
С ЭНЕРГИЯМИ ОТ 1 ДО 1000 эВ

1997

Делительные ширины резонансов и сечение деления ^{234}U нейтронами с энергиями от 1 до 1000 эВ

В работе представлены результаты измерений сечений деления ^{234}U резонансными нейтронами, проведенных на импульсном бустере ИБР-30 Объединенного института ядерных исследований. Измерения проводились методом времени пролета. Детектором делений служила многосекционная импульсная ионизационная камера, содержащая около 100 мг урана с содержанием изотопа ^{234}U 99,84% и 25 мг ^{235}U для измерения потока нейтронов. Делительные ширины вычислялись в области разрешенных резонансов (от 200 эВ) методом площадей. Приведено сечение деления в области до 1000 эВ.

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

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1997

Перевод авторов

Borzakov S.B. et al.

P3-97-398

Fission Width and Neutron Induced Fission Cross-Section of the ^{234}U in the Energy Region from 1 to 1000 eV

The results of the measurements of the cross-section of the resonance neutron induced fission carried out on the IBR-30 pulse booster are presented. The measurements were done using the time-of-flight technique. Fission events were detected by multisectional pulse ionisation chamber, containing about 100 mg of ^{234}U and 25 mg ^{235}U for neutron flux measurements. The fission width was calculated in the resolved resonance region (below 200 eV) using square method. The cross-section of fission in the energy region below 1000 eV is shown.

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

Введение

Цель данной работы — получение ядерных данных, необходимых для решения проблемы трансмутации радиоактивных отходов.

Изотоп ^{234}U , относящийся к младшим актинидам, содержится в заметных количествах в отходах ядерных реакторов и является короткоживущим (период полураспада $2,45 \cdot 10^5$ лет), а следовательно, сильно радиоактивным изотопом. Одним из путей решения проблемы радиоактивных отходов является создание установки и соответствующей технологии для дожигания оружейного плутония, некоторых младших актинидов и трансмутации ряда продуктов деления. Проект такой установки представляет сочетание сложнейших физических и технических задач, отличных от ранее встречавшихся в реакторной и ускорительной технике. Оптимальное решение этих задач сильно зависит от точности знания ядерно-физических констант используемых материалов. Эти данные определяют выбор между различными концептуальными вариантами проекта и компоновку мишени, blankets и внешнего контура.

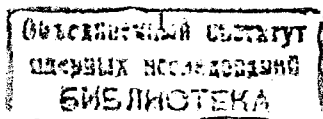
Младшие актиниды являются наименее изученными среди этих материалов.

^{234}U , являясь четно-четным изотопом, представляет большой интерес как объект для изучения влияния уровней второй ямы потенциального барьера деления на резонансную структуру сечения деления. В сечении деления ^{234}U наблюдаются резонансные кластеры, обнаруженные впервые авторами работы [1].

В данной работе измерялось сечение деления ^{234}U резонансными нейтронами с энергией от 1 до 1000 эВ и вычислялись делительные ширины некоторых резонансов в области энергии до 200 эВ.

Эксперимент

Сечения деления ^{234}U резонансными нейтронами измерялись на импульсном бустере ИБР-30 Объединенного института ядерных исследований в Дубне методом времени пролета. Пролетная база для нейтронов составляла 58,4 м. Ширина нейтронного импульса ИБР-30 примерно равна 4 нс, и таким образом достигается разрешение ~ 70 нс/м, позволяющее разделить почти все нейтронные резонансы в области до 200 эВ. Выше, в области первого



резонансного кластера (около 600 эВ), разрешаются лишь самые сильные резонансы.

Детектором делений являлась многосекционная плоскопараллельная ионизационная камера, содержащая 98,8 мг урана с содержанием изотопа ^{234}U 99,84%. Примесь ^{235}U составляла 0,082%. Столь высокое обогащение было достигнуто химическим выделением изотопа ^{234}U из ^{238}Pu , дочерним продуктом α -распада которого он является. Камера была заполнена смесью газов 90%Ag+10%CH₄ при давлении 400 мм. рт. ст.; расстояние между электродами — 6 мм.

Несмотря на крайне низкое содержание ^{235}U в образце, на времяпролетном спектре (рис. 1) видны наиболее сильные резонансы ^{235}U в районе 9, 12, 19 и 35 эВ. Энергии этих резонансов хорошо отделяются от резонансов ^{234}U по времени пролета. При вычислении сечения $\sigma_f(E_n)$ интервалы, содержащие резонансы ^{235}U , удалялись из спектра.

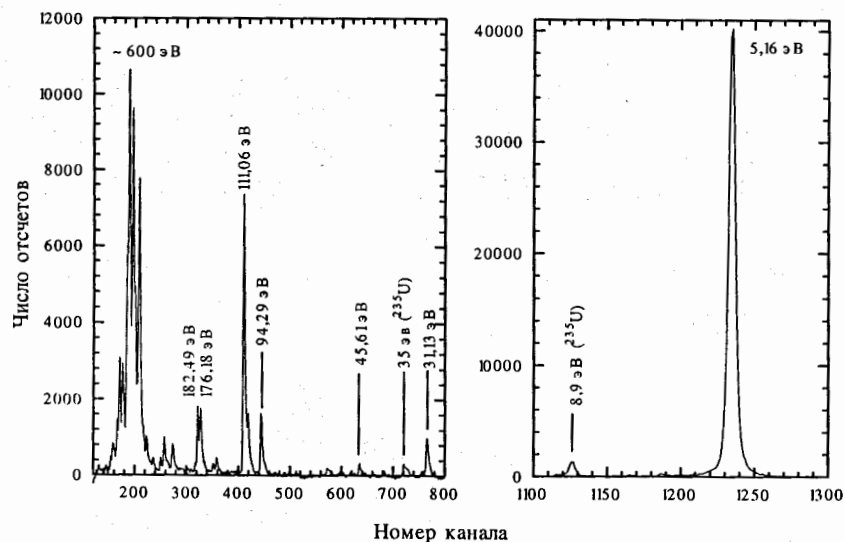


Рис. 1. Времяпролетный спектр ^{234}U , полученный в относительных измерениях

Главными проблемами при регистрации делений ^{234}U является, с одной стороны, низкое сечение деления ^{234}U , что требует образцов с относительно большим числом ядер, и, с другой стороны, высокая альфа-активность образцов,

что накладывает ограничение на количество вещества, которое может находиться в камере. Компромиссом является использование многослойных камер и нескольких параллельных регистрирующих трактов. Такая методика использована нами в работах [2–4] при измерениях средней множественности γ -квантов при делении ^{237}Np и ^{234}U резонансными нейтронами. По времяпролетным спектрам деления ^{234}U , полученным в этих экспериментах (рис. 1), определялся относительный ход сечения ^{234}U нейтронами в области энергии до 1000 эВ.

Другой путь связан с использованием быстрых токовых усилителей, позволяющих сильно уменьшить вероятность наложения нескольких импульсов от α -частиц, имитирующего импульс от осколка деления [5]. С использованием этой техники были проведены калибровочные измерения в области от 2,5 до 10 эВ с хорошо известными количествами ^{235}U ($25,2 \pm 0,8$ мг) и ^{234}U ($63,3 \pm 1,8$ мг), что позволило определить $\sigma_0 \Gamma_f$ резонанса ^{234}U с $E_0 = 5,16$ эВ. В этих измерениях для каждого события деления фиксировались время пролета и

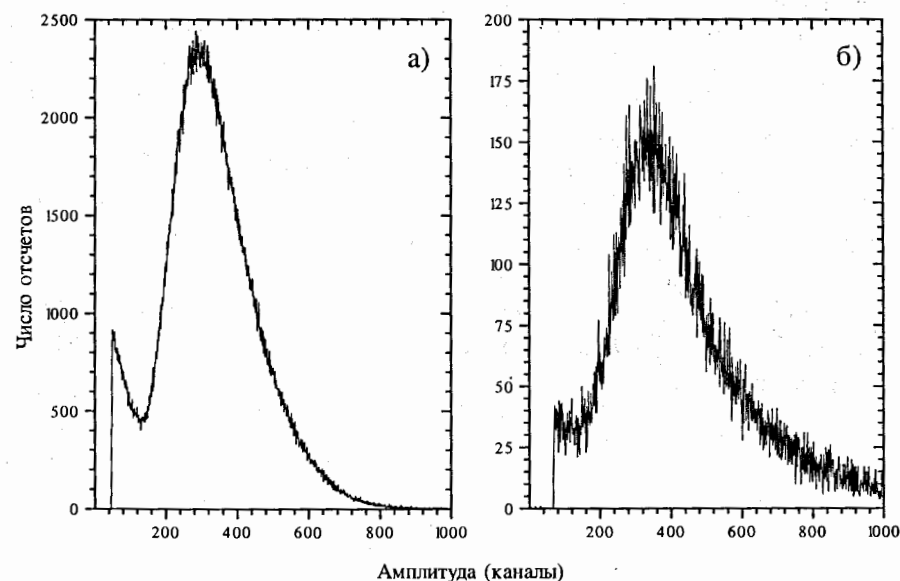


Рис. 2. Амплитудные спектры ^{235}U (а) и ^{234}U (б), полученные в калибровочных измерениях

амплитуда импульса ионизационной камеры. При обработке осуществлялся

отбор событий по амплитуде импульса и формировались четыре одномерных спектра: амплитудный и времяпролетный спектры ^{234}U и ^{235}U . Амплитудные спектры ^{234}U и ^{235}U , по которым определялись эффективности регистрации осколков ^{234}U и ^{235}U , приведены на рис. 2.

Метод обработки экспериментальных данных

Сумма отсчетов детектора N_λ в случае "тонкой" мишени в резонансе λ определяется формулой

$$N_\lambda = \frac{\pi}{2} (\sigma_0 \Gamma_i)^\lambda \varepsilon \Phi(E_0^\lambda) n = \frac{\pi}{2} (\sigma_0 \Gamma_i)^\lambda \varepsilon \Phi(E_0^\lambda) \frac{m}{m_A} 6,02 \cdot 10^{23}, \quad (1)$$

где $\frac{\pi}{2} (\sigma_0 \Gamma_i)^\lambda$ — площадь резонанса, $\Phi(E_0)$ — поток нейтронов с энергией E_0 через образец за время измерений, E_0^λ — энергия λ -го резонанса, ε — эффективность регистрации осколков деления детектором, n — число ядер в мишени, m_A — массовое число ядра-мишени, m — масса мишени.

Поток нейтронов с энергией $>0,1$ эВ от источника ИБР-30 с хорошей точностью описывается формулой Ферми $\Phi(E) = kE^{0,9}$. Коэффициент k в ней определялся по времяпролетному спектру ^{235}U подгонкой числа отсчетов в каждом канале i функцией

$$f_i = \Phi(E_i) \Delta E n \sigma_i'(E_i) + N_i^{\text{BG}} = kE_i^{0,9} \Delta E n \sigma_i'(E_i) + N_i^{\text{BG}}, \quad (2)$$

где E_i — энергия, соответствующая i -му каналу, ΔE — ширина канала, $\sigma_i'(E_i)$ — "наблюдаемое" сечение деления, n — число ядер в мишени, N_i^{BG} — число "фоновых" отсчетов.

"Наблюдаемое" сечение является сверткой реального сечения $\sigma_i(E')$ с функцией разрешения $R(t, t')$ и функцией $D(E-E')$, описывающей доплеровское уширение резонанса

$$\sigma_i'(E') = \int_0^\infty R(t, t') \left(\int_{-\infty}^\infty \sigma_i(E') D(E-E') dE \right) dt. \quad (3)$$

В простейшем случае

$$D(E-E') = \frac{1}{\sqrt{\pi} \Delta_D} \exp\left(-\frac{(E-E')^2}{\Delta_D^2}\right), \quad (4)$$

где $\Delta_D = 2\sqrt{\frac{k_B T E}{m_A + 1}}$ — доплеровская ширина, k_B — постоянная Больцмана, T — температура образца.

Функция разрешения импульсного бустера ИБР-30 определяется шириной импульса электронного ускорителя t_L и параметром τ , связанным с размножением нейтронов в активной зоне бустера:

$$R(t, t') = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), & 0 < t < t_L \\ (1 - \exp(-t_L/\tau)) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), & t > t_L. \end{cases} \quad (5)$$

Время пролета нейтрона в этой формуле связано с его энергией известным соотношением $t = \frac{72,3L}{\sqrt{E}}$, L — длина пролетной базы.

Для описания сечения деления использовалось одноуровневое приближение

$$\sigma_i(E) = \sum_\lambda 4\pi\lambda^2 \left(\frac{g\Gamma_n \Gamma_i}{(E-E_0)^2 + \frac{\Gamma_i^2}{4}} \right)_\lambda, \quad (6)$$

где $g\Gamma_n$, Γ_i , Γ_1 и E_0 — соответственно нейтронная, делительная и полная ширины и энергия резонанса λ брались из [6].

Подставляя в (2) формулы (3), (4), (5), (6) и полагая в (2) $N_i^{\text{BG}} = N^{\text{BG}} = \text{const}$, получим формулу с двумя неизвестными параметрами: k и N^{BG} для подгонки экспериментального спектра ^{235}U в области энергий нейтронов от 2,5 до 10 эВ, полученного в калибровочных измерениях. Эти параметры находились минимизацией функции $\chi^2 = \frac{(f_i - N_i)^2}{(\Delta N_i)^2}$ программой MINUIT.

Подставляя полученный коэффициент k и площадь под резонансом 5,16 эВ в спектре ^{234}U , полученном в калибровочных измерениях в (1), получим величину $\sigma_0 \Gamma_i$ для этого резонанса. Тогда $\sigma_0 \Gamma_i$ для резонанса λ выражается через площади на спектре, полученном в относительных измерениях:

$$(\sigma_0 \Gamma_i)_\lambda = (\sigma_0 \Gamma_i)_{5,16} \frac{N_\lambda}{N_{5,16}} \left(\frac{E_0^\lambda}{5,16} \right)^{0,9}. \quad (7)$$

Делительные ширины находятся по формуле

$$\Gamma_i^\lambda = \frac{(\sigma_0 \Gamma_i)^\lambda \Gamma_i^\lambda}{4\pi\lambda^2 g\Gamma_n}, \quad (8)$$

где $g\Gamma_n^\lambda$ — нейтронная ширина λ -го резонанса брались из работы [7], Γ_i^λ —

полная ширина λ -го резонанса вычислялась как сумма нейтронной и радиационной ширины, приближенно являющейся константой $\Gamma_\gamma=25$ мэВ.

Результаты и обсуждение

Сечение деления ^{234}U резонансными нейтронами с энергией от 1 до 1000 эВ показано на рис. 3. Ошибки определения сечения в резонансах не превышают 4% и обусловлены в основном статистической точностью калибровочных измерений. Сравнение времяпролетного спектра, приведенного на рис. 1, со спектром, представленным в [7], демонстрирует примерно в три раза лучшую статистическую точность наших относительных измерений.

Делительные ширины, определенные для резонансов в области до 200 эВ, где разрешение достаточно для разделения отдельных резонансов, приведены в

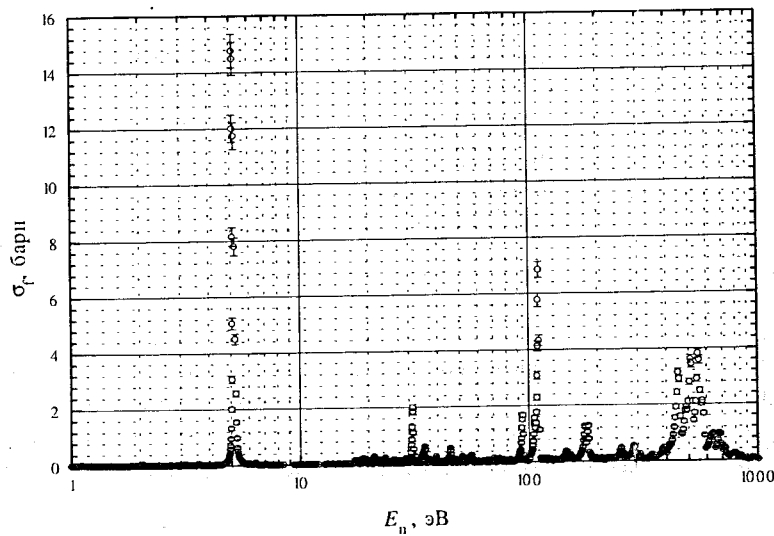


Рис. 3. Сечение деления ^{234}U

таблице 1. Их значения хорошо согласуются с данными [7] (см. также [6]). Ошибки в определении Γ_Γ связаны с неопределенностью параметров Γ_n , Γ_γ и Γ_Γ для резонансов ^{234}U .

Таблица 1. Параметры резонансов ^{234}U в области до 200 эВ

E_n , эВ	Настоящая работа				Работа [7]	
	$\sigma_0\Gamma_\Gamma$, барн	$\Delta(\sigma_0\Gamma_\Gamma)$, барн	Γ_Γ , мэВ	$\Delta\Gamma_\Gamma$, мэВ	Γ_Γ , мэВ	$\Delta\Gamma_\Gamma$, мэВ
57.1	1.38	0.06	0.0201	0.0008	0.0182	0.0009
31.9	0.17	0.01	0.009	0.001	0.008	0.001
48.9	0.08	0.01	0.08	0.01	0.067	0.007
22.2	0.66	0.05	0.038	0.004	0.033	0.003
106.7	0.23	0.03	0.07	0.01	0.091	0.008
117.0	3.2	0.2	0.33	0.03	0.31	0.03
146.2	0.29	0.04	0.047	0.007	0.028	0.002
152.1	0.19	0.04	0.027	0.005	0.022	0.002
176.1	0.98	0.09	0.11	0.01	0.090	0.006
182.4	1.37	0.07	0.146	0.009	0.114	0.007

Многоуровневый анализ данных [7] по сечениям пропускания и деления совместно с нашими данными, может улучшить точность определения делительных и нейтронных ширин для ^{234}U в области низколежащих резонансов.

Работа осуществлена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 95-02-03740) и Международного научно-технического центра (проект #471-97).

В заключение авторы считают приятным долгом выразить свою благодарность В.И. Фурману за постоянное внимание к работе и ценные обсуждения, Г.А. Тимофееву и В.Н. Кованцеву за выделение и очистку изотопа ^{234}U , С.М. Соловьеву за изготовление мишеней и В.И. Смирнову за подготовку электроники к измерениям.

Список литературы

1. James G.D. and Rae E.R. Nucl. Phys. A118, 313 (1968).
2. Дерменджиев Е., Русков И., Замятин Ю.С., Goverдовский А.А. Ядерная физика, 1994, том 57, № 8, с. 1362–1369.
3. Borzakov S.B., Dermendjiev E., Goverdovsky A.A., Kalinin A.I., Konovalov V.Yu., Ruskov I., Soloviev S.M., Zamyatnin Yu. S. Ядерная физика, 1996, том 59, № 7, с. 1175–1379.
4. Borzakov S.B., Dermendjiev E., Konovalov V.Yu., Panteleev Ts.Ts., Ruskov I., Zamyatnin Yu.S.: Study of γ -ray Yields from the Fission of ^{234}U Induced by Resonance Neutrons. In Proc. of 3rd Int. Conf. on Dynamical Aspects of Nuclear Fission, Chasta-Papernichka, Slovak Republic, August 30 – September 4, 1996.—JINR, Dubna, 1996, p.370.
5. Зейналов Ш.С., Смирнов В.И., Стемпиньски М., Флорек М., Шаланьски П. Быстродействующий детектор осколков деления. Препринт ОИЯИ P13-97-222, Дубна, 1997
6. Mughabghab S.F. Neutron Cross-Section, vol. 1, Part B.—Academic Press, New York, 1984.
7. James G.D., Dabbs J.W.T., Harvey J.A., Hill N.W., Schinler R.H.: Phys. Rev. C15, 6, 1977, p. 2082–2097.

Рукопись поступила в издательский отдел
26 декабря 1997 года.