

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3-2000-4

На правах рукописи
УДК 539.173.84

Б-823

БОРЗАКОВ
Сергей Борисович

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ЗАПАЗДЫВАЮЩИХ НЕЙТРОНОВ
В ДЕЛЕНИИ ТЕПЛОВЫМИ НЕЙТРОНАМИ ЯДЕР

^{235}U , ^{233}U , ^{239}Pu и ^{237}Np

Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 2000

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики Объединенного института ядерных исследований.

Общая характеристика работы

Научный руководитель: доктор физико - математических наук,
старший научный сотрудник

ДЕРМЕНДЖИЕВ Элмир

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник

ГАНГРСКИЙ Юрий Петрович

кандидат физико-математических наук,

начальник лаборатории

ПИКСАЙКИН Владимир Михайлович

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

МИФИ, Москва.

Защита диссертации состоится « » _____ 2000 г.

В _____ часов на заседании диссертационного совета Д 047.01.05 при Лаборатории нейтронной физики и Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований, Дубна Московской области, конференц-зал ЛНФ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан « » _____ 2000 г.

Ученый секретарь специализированного совета

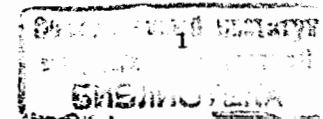
А.Г. Попеко



Актуальность проблемы. Несмотря на малую долю запаздывающих нейтронов (ЗН) в полном числе нейтронов деления, данные по ЗН оказались важны как для изучения фундаментальных свойств процесса деления, так и для расчетов кинетики ядерных реакторов. К настоящему времени проведено большое количество исследований ЗН, появляющихся в результате деления тепловыми нейтронами, быстрыми нейтронами, фотоделении и т.д., однако, достигнутой в измерениях выхода запаздывающих нейтронов ν_d точности (3% для наиболее хорошо изученного ядра ^{235}U) недостаточно для ядерной энергетики и, по-прежнему, сохраняется потребность в новых измерениях с повышенной точностью. Появление новых нейтронных источников высокой интенсивности (как стационарных, так и импульсных), позволяет проводить исследования ЗН на более высоком уровне. В настоящее время изучение ЗН продолжается как с целью уточнения данных для основных реакторных изотопов, так и в плане изучения выходов ЗН, появляющихся в результате деления мало изученных нуклидов. Большие потоки нейтронов, вызывающих деление, позволяют проводить измерения с высокой эффективностью, что особенно важно для изучения нестабильных изотопов и ядер, имеющих малые сечения деления. Особый интерес в последнее время вызывают исследования деления ^{237}Np . Это связано с тем, что ^{237}Np рассматривается как перспективный изотоп в проектах безопасных энергетических установок на базе сильноточных ускорителей.

Одним из лучших среди исследовательских реакторов является импульсный реактор ИБР-2, созданный в ЛНФ ОИЯИ. Ряд каналов ИБР-2 оборудован зеркальными нейтронводами, что позволяет проводить измерения с тепловыми нейтронами в условиях низкого фона быстрых нейтронов. Использование периодического метода облучения образцов в этих условиях предоставляет уникальные возможности для исследования запаздывающих нейтронов.

Цель работы. Диссертация посвящена исследованию выходов ЗН, возникающих в результате деления основных реакторных изотопов ^{235}U , ^{233}U , ^{239}Pu , а также ^{237}Np , тепловыми нейтронами. Измерения проведены методом периодического облучения образца на импульсном реакторе ИБР-2. Кроме того, используемый в настоящей работе метод позволяет измерить кривые распада ЗН в



диапазоне 5-730 мсек после окончания облучения, что дает возможность исследовать ЗН с малыми периодами полураспада.

Новизна, научная и практическая ценность работы.

Измерения проведены методом периодического облучения образца, позволяющим одновременно измерять число мгновенных и запаздывающих нейтронов деления одним и тем же детектором без перемещения образца. Используемый метод позволяет провести измерения выхода ЗН с высокой точностью. Впервые измерен выход ЗН в делении ^{237}Np тепловыми нейтронами. Использование созданной установки и импульсного реактора ИБР-2 позволяет проводить исследования ЗН в диапазоне 5-750 мсек после окончания облучения. Полученные с высокой статистической точностью кривые распада ЗН позволяют получить оценку выхода запаздывающих нейтронов с малым периодом полураспада (порядка 50 мсек), проводить сравнение полученных данных с кривыми, рассчитанными с помощью известных из литературы наборов параметров.

Объем и структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы на 75 страницах печатного текста, содержит 16 рисунков, 12 таблиц и библиографию из 66 наименований.

Апробация работы и публикации.

Основные результаты диссертации были опубликованы в препринтах ОИЯИ и журнале «Атомная энергия», представлены на международных конференциях в Обнинске, Дубне, Часта-Папиерничке (Словакия), Триесте (Италия). Последние результаты опубликованы в виде препринтов ОИЯИ и направлены в журналы «Ядерная физика» и «Вопросы атомной науки и техники» (Серия «Ядерные константы»).

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении содержится обоснование актуальности исследований запаздывающих нейтронов, определены задачи настоящей работы и описана структура диссертации.

В главе 1 дан краткий обзор свойств ЗН и способы теоретических оценок их параметров.

Итоги первых исследований ЗН подведены в монографии Кипина, который установил, что зависимость выхода ЗН от времени хорошо описываются в рамках 6-ти группового приближения.

Для теоретической оценки выхода ЗН необходимо опираться на известное массовое или зарядовое распределение осколков. Соответствующие модели получили название Z_p или A_p -моделей. В работе приведен один из вариантов вычисления числа запаздывающих нейтронов. В настоящее время известно 272 ядра-предшественника. В практических расчетах для 98 изотопов используют известные из эксперимента значения P_n . Для остальных 174 ядер используют расчетные значения P_n . Недостаток экспериментальных данных по плотности уровней, спинам и четностям для многих ядер-предшественников и эмиттеров не позволяет провести чисто теоретические расчеты с высокой точностью.

Приведен краткий обзор работ, посвященных энергетической зависимости выхода ЗН.

Энергетическая зависимость величины v_d при энергиях, меньших 1 эВ, в литературе не обсуждалась. Однако, так как выход ЗН прямо связан с массовым распределением осколков, которое несколько меняется при этих энергиях, можно предположить, что v_d также зависит от энергии. Изменение массового распределения осколков при таких энергиях изучалось в работе Режье и др. для ядра ^{239}Pu . В этой работе определялось отношение асимметричного деления к симметричному в зависимости от энергии и было показано, что оно изменяется в 2 раза при переходе от тепловых нейтронов к нейтронам с $E_n=0.4$ эВ. Конечно, изменение v_d значительно меньше, поскольку изотопы, соответствующие симметричному делению, вносят малый вклад в выход ЗН. Тем не менее, представляет интерес изучить возможное изменение v_d в указанном интервале энергий в прецизионных измерениях.

Во второй главе описаны экспериментальные методы изучения ЗН. Часто используемой схемой изучения ЗН является облучение делящегося изотопа с последующим перемещением образца к детектору ЗН. Для регистрации ЗН используются нейтронные детекторы с высокой эффективностью, слабо зависящей от энергии. Поскольку перемещение образца требует времени порядка десятков

или сотен миллисекунд, вклад короткоживущих изотопов в испускание ЗН определяется с большой погрешностью.

В ряде экспериментальных работ непосредственно определяется величина

$$\beta_0 = v_d / (v_p + v_d),$$

где v_p - число мгновенных нейтронов, испускаемых в одном акте деления. При этом исключаются неопределенности, связанные с точностью определения эффективности детектора. Зная β_0 можно определить v_d поскольку величина v_p , как правило, известна с очень высокой точностью.

В главе 3 описана экспериментальная установка «Изомер», на которой были получены приведенные в диссертации данные и метод измерений. Для исследований запаздывающих нейтронов в ЛНФ ОИЯИ был развит метод периодического облучения образца и создана установка «Изомер», использующая в качестве нейтронного источника импульсный реактор ИБР-2.

В работе приведен вывод основных формул, используемых в рамках метода периодического облучения. Отношение выхода ЗН к числу мгновенных нейтронов деления равно:

$$\frac{v_d}{v_p} = \frac{S_d}{S_p} \frac{\epsilon_p}{\epsilon_d} F(t_1, t_2, \Delta t, T) \quad (1)$$

где S_d и S_p количества зарегистрированных запаздывающих и мгновенных нейтронов деления; ϵ_d и ϵ_p - соответствующие эффективности регистрации.

$$F(t_1, t_2, \Delta t, T) = \left[\sum_{i=1}^6 \frac{a_i}{\lambda_i \Delta t} \frac{1 - \exp(-\lambda_i \Delta t)}{1 - \exp(-\lambda_i T)} (\exp(-\lambda_i t_1) - \exp(-\lambda_i t_2)) \right]^{-1}, \quad (2)$$

функция, зависящая от условий измерения и учитывающая периодичность облучения образца. Здесь a_i и λ_i относительные веса и постоянные распада ($\lambda_i = \ln 2 / T_{1/2i}$, где $T_{1/2i}$ - периоды полураспада, соответствующие определенной группе). Для a_i выполняется следующее соотношение: $\sum a_i = 1$.

Используя периодический метод облучения, величины S_d и S_p можно измерить одним и тем же детектором без перемещения образца. Как можно видеть из (2), измерение β_0 не требует знания абсолютной эффективности детектора и характеристик образца, а только определения отношения эффективностей для запаздывающих и мгновенных нейтронов. Функция $F(t_1, t_2, \Delta t, T)$ практически не зависит

от используемого набора параметров и может быть рассчитана с очень высокой точностью.

Установка Изомер расположена на расстоянии 27 м от активной зоны реактора. Реактор ИБР-2 имеет среднюю мощность 2 МВт и частоту импульсов 5 Гц. Ширина импульса составляет приблизительно 230 мкс. Таким образом, мощность реактора в импульсе (1500 МВт) значительно превышает среднюю, что позволяет иметь значительный поток нейтронов, падающих на образец в течение короткого интервала времени (и вызывающих деление), и проводить измерения выходов ЗН между вспышками реактора. Однако, хотя мощность реактора между вспышками мала (0.15 МВт), фон, вызываемый нейтронами из активной зоны реактора, значительно превышает счет ЗН от образца.

Поэтому необходимо прерывать пучок нейтронов после того, как тепловые нейтроны попали на образец. Установка состоит из изогнутого зеркального нейтронновода длиной 20 м, прерывателя тепловых нейтронов и нейтронного детектора. Зеркальный нейтронновод служит для значительного подавления фона от быстрых нейтронов и гамма-квантов. Поток на выходе нейтронновода равен $6 \cdot 10^{15}$ н/см² с. Энергия падающих на образец нейтронов определялась методом времени пролета.

Прерыватель представляет собой диск из кадмия, зажато между алюминиевыми дисками. Кадмий имеет 2 щели, симметрично расположенных на диске. Вращение диска осуществляется шаговым двигателем с частотой 2.5 Гц. Вращение прерывателя синхронизировано с вспышками реактора. Кроме того, был предусмотрен режим вращения прерывателя с частотой 0.625 Гц, что позволило исследовать характеристики ЗН в интервале до 750 мс.

Нейтронный детектор состоит из 12 ³He счетчиков, помещенных в замедлитель из полиэтилена. Был проведен расчет эффективности методом Монте-Карло с помощью программы MCNP для набора энергий нейтронов в интервале от 0.1 до 2 МэВ. Эффективность детектора измерялась с помощью калиброванного источника ²⁵²Cf, имеющего спектр нейтронов деления. Результаты измерений и расчетов находятся в хорошем согласии друг с другом.

Импульсы от нейтронного детектора подавались на вход временного кодировщика. Временные распределения нейтронов регистрировались с помощью электронной аппаратуры, разработанной в ЛНФ ОИЯИ. Накопление данных осуществлялось с помощью IBM

совместимого персонального компьютера. Управление процессом измерения осуществлялось программой, позволяющей чередовать измерения эффекта и фона и записывать накопленные спектры на жесткий диск компьютера.

Большое внимание уделено характеристикам используемых образцов, поскольку от них зависят условия измерений.

Для измерений использовались слои диаметром 60 мм, нанесенные на подложку из Al (^{235}U), или Ni (^{233}U , ^{239}Pu). Подложка из Ni использовалась для уменьшения фона от (α, n) -реакции, которая идет с большой вероятностью при взаимодействии α -частиц с Al, часто используемым в качестве подложки. Кроме того, (α, n) -реакция на кислороде-18, дает заметный вклад в выход нейтронов из образца. Поэтому в последних измерениях использовался образец металлического ^{239}Pu , что позволило снизить фон почти в два раза. Для исследований кривых распада ЗН использовались образцы весом несколько грамм. Относительно невысокое обогащение изотопов урана (90%) не влияет на результат измерений, так как основную часть примеси составляет ^{238}U , не делящийся тепловыми нейтронами.

Для исследований ЗН нептуния был изготовлен образцы, содержащие окись ^{237}Np в герметичных контейнерах из Al. Для уменьшения фона от (α, n) -реакции на материале контейнера, внутри была проложена никелевая фольга.

Из-за того, что сечение деления ^{237}Np в $3 \cdot 10^{+5}$ раз меньше чем сечения для ^{235}U и ^{239}Pu , нептуний тщательно очищался химически от возможных примесей ^{235}U и ^{239}Pu . Содержание ^{239}Pu может контролироваться методом α -спектроскопии. Измерения, сделанные при очистке образца показали, что примесь ^{239}Pu не более 10^{-6} г/г. Однако для ^{235}U такой контроль имеет значительно худшую чувствительность, поскольку его активность очень мала и энергия α -частиц от ^{235}U меньше, чем от ^{237}Np . Методы γ -спектроскопии также не позволяют достичь требуемой точности. Поэтому была предпринята попытка определения содержания ^{235}U в образце ^{237}Np с помощью резонансных нейтронов. Для этого была изготовлена ионизационная камера, содержащая 88 мг ^{237}Np из той же партии, что и образец для изучения ЗН. Измерения проводились методом времени пролета на импульсном источнике нейтронов (бустере) ИБР-30. Содержание ^{235}U в образце определялось по известным параметрам наиболее сильных резонансов ^{235}U и ^{237}Np . В результате измерений

был сделан вывод, что содержание ^{235}U не превышает величины 10^{-5} г/г.

Большое внимание было уделено определению мертвого времени регистрирующей аппаратуры τ . Измерение мертвого времени производилось классическим методом с помощью двух нейтронных источников. Точность определения τ составляет 10 %.

Фон определялся с помощью фильтра из Cd, перекрывающего пучок падающих на образец тепловых нейтронов.

В диссертации проанализированы факторы, влияющие на погрешность значения величины V_d :

1. - неопределенность в поправке на просчеты;
2. - различные энергии мгновенных и запаздывающих нейтронов для различных изотопов;
3. - неравномерное во времени облучением образца;
4. - различные значения функции $F(\Delta t, T, t_1, t_2)$ для различных наборов параметров, известных из литературы, для одного и того же изотопа.

Основным фактором, вносящим неопределенность в получаемые результаты, является просчеты. Для обработки результатов измерений были написана программа, вычисляющая исправленное на просчеты временное распределение нейтронов. При измерениях с образцами, имеющими большое сечение деления, поток нейтронов ослаблялся с помощью поглотителей из карбида бора или свинца таким образом, чтобы максимальная мгновенная загрузка не превышала 2×10^4 1/с. Таким образом, поправка на просчеты не превышала величины 10% и погрешность при ее введении не превышала 1%.

Энергии мгновенных нейтронов практически одинаковы для всех исследуемых изотопов. Спектры ЗН имеют сложный характер, средние энергии ЗН определены с плохой точностью. Однако, поскольку эффективность детектора слабо зависит от энергии, соответствующая неопределенность не превышает (0.2)%. Отношение эффективностей для всех изотопов использовалось такое же, как для ^{235}U .

Неравномерность облучения во времени приводит к ошибке не более 0.2 %.

Непосредственными вычислениями функции $F(\Delta t, T, t_1, t_2)$ было получено, что результаты использования различных наборов параметров совпадают с точностью порядка 0.1%.

Глава 4 содержит описание процедуры измерений и обработки данных. Здесь же приведены результаты измерений, их сравнение с данными других работ и с теоретическими оценками. ^{235}U использовался в качестве стандарта. Типичный спектр, полученный с образцом ^{235}U весом 25 мг за 18 часов, показан на рис. 1. На этом рисунке показано также действие прерывателя. Измерения с ^{235}U при энергии 0.023 эВ позволили определить отношение эффективностей нейтронного детектора для запаздывающих и мгновенных нейтронов деления. При этом для относительных весов и периодов полураспада различных групп использовались данные работы Татла.

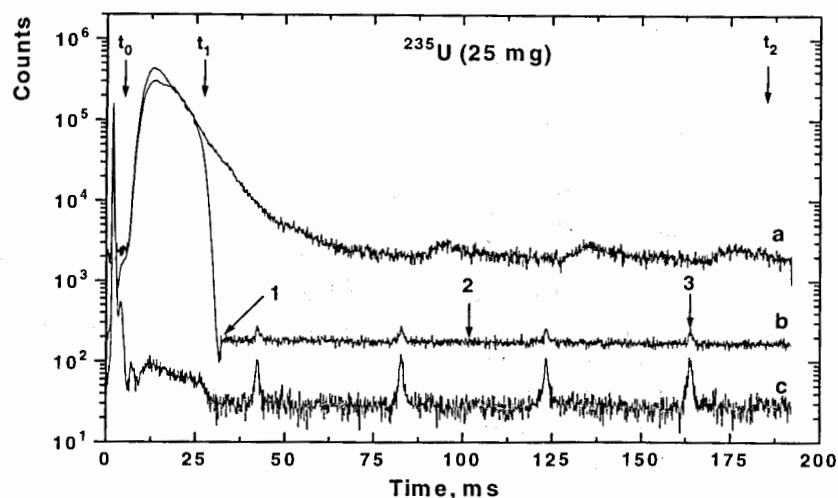


Рис. 1. Экспериментальный спектр, полученный с ^{235}U : а - спектр, измеренный при остановленном прерывателе, б - с вращающимся прерывателем, с - фон, измеренный с помощью Cd фильтра. Показаны время облучения (t_0, t_1) и интервал времени, в котором вычислялось число ЗН (t_1, t_2).

Для величины β_0 было принято значение $\beta_0 = 0.680 \pm 0.020$, полученное с помощью известных из литературы значений ν_d и ν . Были проведены также измерения при энергии падающих нейтронов

0.035 и 0.003 эВ, что достигалось изменением фазы прерывателя. В последнем случае использовался также Ве фильтр, который имеет резкий скачок в сечении рассеяния при 0.005 эВ.

Для измерений с ^{239}Pu использовался металлический образец. Тем не менее, фон составлял 60%. Было проведено несколько серий измерений с целью проверки стабильности получаемых результатов. Ошибка определялась как стандартное отклонение среднего значения.

Полученные для трех основных изотопов данные приведены в таблицах 1 (β_0) и 2 (ν_d). Следует отметить, что статистическая точность измерений, как правило, лучше одного процента. Неопределенность порядка 1-1.5% вносит поправка на просчеты при определении числа мгновенных нейтронов. Существенный вклад в ошибку ν_d вносит неопределенность используемого стандарта (3%). Отношение величины β для ^{235}U ($E_n = 0.003$ и 0.035 эВ), для ^{233}U ($E_n = 0.003, 0.023$ и 0.035 эВ) и для ^{239}Pu ($E_n = 0.023$ эВ) к $\beta_0(^{235}\text{U}+n_{th})$ получено с точностью не хуже 1.5%. Эта же величина для ^{239}Pu ($E_n = 0.003$ и 0.035 эВ) определена с точностью порядка 4% из-за худших фоновых условий. Зависимости выхода ЗН от энергии налетающих нейтронов для ^{235}U и ^{239}Pu не обнаружено.

Таблица 1. Экспериментальные значения β_0 (в процентах) и их отношения к $\beta_0(^{235}\text{U}+n_{th})$ (в скобках) для различных энергий налетающих нейтронов.

Изотоп	$E_n = 0.003$ эВ	$E_n = 0.023$ эВ	$E_n = 0.035$ эВ
^{235}U	0.683 ± 0.021 (1.004 ± 0.009)	$0.680 \pm 0.020^*$ 1.000	0.687 ± 0.021 (1.010 ± 0.008)
^{233}U	0.274 ± 0.009 (0.403 ± 0.005)	0.267 ± 0.009 (0.382 ± 0.005)	0.255 ± 0.009 (0.375 ± 0.005)
^{239}Pu	0.227 ± 0.013 (0.334 ± 0.016)	0.234 ± 0.008 (0.344 ± 0.004)	0.230 ± 0.011 (0.338 ± 0.013)

* - стандарт.

Таблица 2. Значения v_d для основных изотопов.

Изотоп	$\beta_0, \%$	v_d	
		наст. Работа	другие данные
^{233}U	0.270 ± 0.009	0.00674 ± 0.00022	0.00667 ± 0.00029 [17]
^{239}Pu	0.232 ± 0.008	0.00668 ± 0.00023	0.00653 ± 0.00026 [26]

Измерений выхода ЗН при делении тепловыми нейтронами ^{237}Np до сих пор не проводилось. Это объясняется очень малым сечением деления $\sigma_d(0.025 \text{ эВ}) = 21.5 \text{ мб}$. Накопление данных проводилось в режиме частого, каждые 10 мин, чередования измерений с Cd фильтром и без него. Измерения с образцом ^{235}U в качестве стандарта проводились в таком же режиме. Эффект от ЗН для ^{237}Np составлял 5-6% от полного счета нейтронов в интервалах между саттелитами. Основную часть фона (приблизительно 4 импульса в секунду) составлял фон от (α, n) -реакции, вызываемой α -частицами. Фон, вызываемый быстрыми и резонансными нейтронами от реактора, рассеивающимися на мишени, составлял 1.2 импульса в секунду.

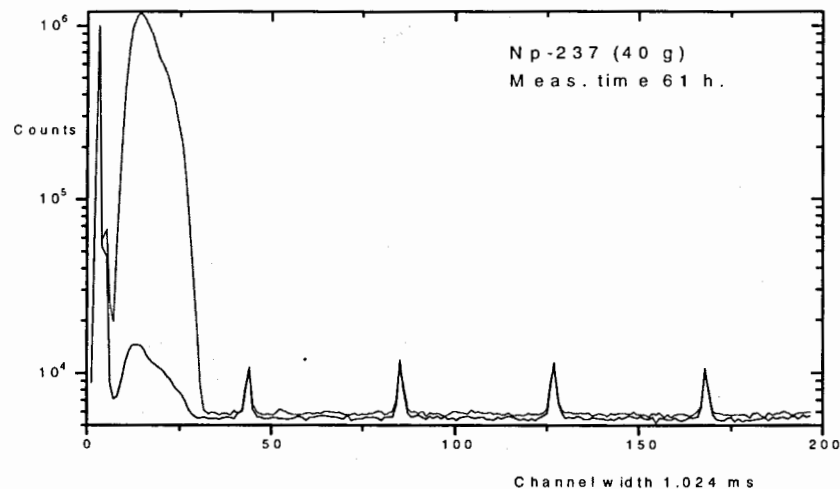


Рис. 2 Экспериментальный спектр, полученный с образцом ^{237}Np . Нижняя кривая - фон, измеренный с помощью Cd фильтра.

Было проведено несколько серий рабочих измерений по 4-7 часов каждая. Результаты отдельных серий находятся в согласии друг с другом в пределах точности эксперимента.

Используя полученное значение

$$\beta_0 = (0.506 \pm 0.029)\%$$

и известное значение v_p получим величину

$$v_d = 0.0125 \pm 0.0011$$

Это значение находится в удовлетворительном согласии с данными, полученными при делении быстрыми нейтронами.

Метод периодического облучения, осуществленный на установке Изомер, позволяет измерить кривые распада ЗН в интервале времени до 0.75 секунды. Для этих измерений использовались образцы с большими массами: 7 г в случае ^{235}U и 10 г для ^{239}Pu . Измерения были проведены в интервале времени распада от 5 мсек до 730 мсек после окончания облучения, что достигалось уменьшением частоты вращения прерывателя до 0.625 Гц. 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 мсек. 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. 3 для ^{235}U и на рис. 5 для ^{239}Pu .

На этих же графиках показаны кривые распада, рассчитанные по формуле (3.6) с использованием различных наборов параметров. Все расчетные кривые привязаны к экспериментальному счету ЗН в интервале 720 - 730 мсек, поскольку в этом интервале вклад короткоживущих изотопов минимален. Для иллюстрации метода периодического облучения на рис. 4 показан вклад нарастающей суммы экспонент в полное число ЗН.

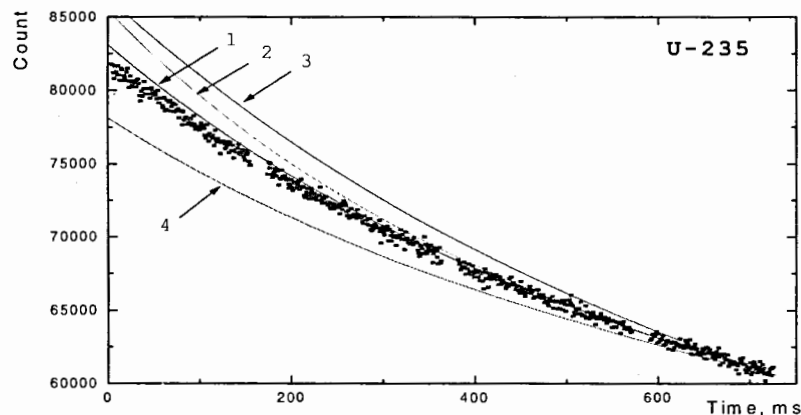


Рис. 3 Экспериментальная кривая (точки), полученная с образцом ^{235}U . Показаны кривые распада, рассчитанные с использованием следующих наборов параметров: 1- R. J. Tuttle [10]; 2- R.W. Waldo et al. [18], 3- Mills et al. [59], 4- G. Spriggs et al. [57].

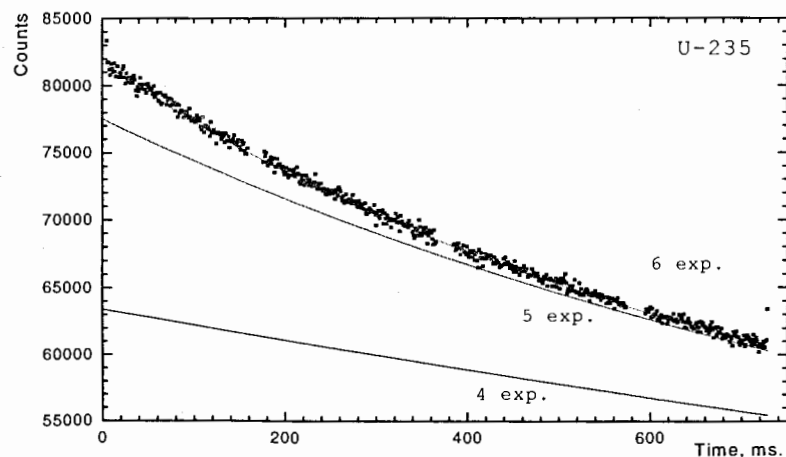


Рис. 4. Вклад сумм различного числа экспонент в кривую распада ^{235}U .

Кроме того, проводилась подгонка параметров короткоживущих групп методом наименьших квадратов с помощью программы MINUIT. Так как нами анализировались экспериментальные данные в ограниченном интервале времени, при анализе данных в 6-ти групповом приближении фиксировались значения $T_{1/2,i}$ для всех групп и значения a_i для первых четырех групп. Свободными параметрами оставались вес 5-й группы и нормировочная постоянная. Значение a_6 определялось из условия нормировки. Попытка варьирования большего числа параметров приводит к большим ошибкам из-за сильной корреляции параметров различных групп. Фитирование экспериментальных данных проведено для набора параметров, взятого из работы Татла. Полученные данные для ^{235}U приведены в таблице 3.

Таблица 3 Результаты подгонки параметров для ^{235}U в 6-ти групповом приближении.

No.	$\lambda_i, 1/\text{сек}$	a_i
5	1.40	0.137 ± 0.008
6	3.87	$0.017 (\pm 0.008)$
χ^2		1.20

Проведенный анализ показывает, что относительные веса 5-й и 6-й групп могут быть определены с более высокой точностью, чем ранее, при условии фиксирования параметров первых 4-х групп и периодов полураспада 5-й и 6-й групп. Полученные экспериментальные данные позволяют также получить ограничение на вес группы, с периодом полураспада меньше 100 мсек. Из литературы известен ряд изотопов с периодами полураспада 40-70 мсек, которые могли бы дать вклад в такую группу. Это ^{84}Br , ^{99}Rb , ^{100}Rb , ^{102}Rb . Их характеристики известны с плохой точностью. Для оценки вклада этой группы проводилась подгонка с включением 7-й группы с $T_{1/2} = 50$ мсек и дополнительным параметром, соответствующим относительному весу a_7 . В результате было получено ограничение $a_7 < 0.005$ (при уровне достоверности 95%).

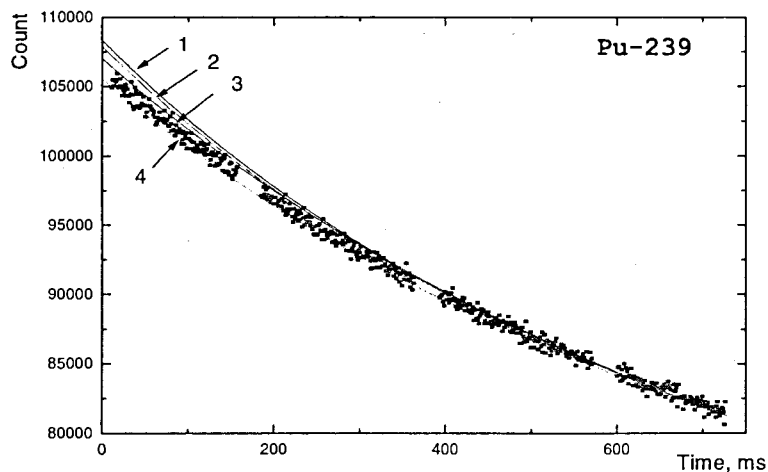


Рис. 5. Кривая распада для ^{239}Pu : 1 - R.J. Tuttle [10], 2 - Brady-England [7]; 3 - Wahl [5]; 4 - Waldo и др. [18];

В последнее время Сприггсом и др. предложена 8-ми групповая система, лучше согласующаяся с результатами экспериментов по измерению реактивности и периода разгона критических систем, чем 6-ти групповая, и использующая одни и те же периоды полураспада групп для описания данных всех изотопов. В связи с наличием в 5-й и 7-й группах 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, значениям P_n и кумулятивным выходам известные из литературы. Кроме того, вследствие отсутствия предшественников с заметным относительным выходом (0.01%) в интервале 0.6-1.4 сек и соответственно малым суммарным вкладом $a_6 < 0.02\%$ представляется целесообразным исключить ее как отдельную группу и перейти к 7-ми групповой системе констант.

Сопоставление расчетов по предложенной системе констант с результатами эксперимента представлено на рис. 6 для ^{235}U . Как видно из рисунка, кривая, рассчитанная с предложенным набором параметров, лучше согласуется с данными, чем кривая распада, рассчитанная с набором параметров, взятых из Табл. V на стр. 14 в работе Сприггса и др. (кривая 4 на рис. 3). В той же работе приводятся

параметры, соответствующие расширенной 8-ми групповой модели Кипина. Кривая распада, рассчитанная с параметрами этой модели практически совпадает с приведенной на рис. 3 кривой 1.

В Табл. 4 приведены результаты подгонки с двумя свободными параметрами кривой распада для ^{235}U , полученные в 7-ми групповом приближении. В качестве параметров первых 5-ти групп взяты периоды полураспада и отнормированные веса групп. Подчеркнем, что в Табл. 4 приведены относительные веса (то есть их сумма равна 1), в то время как из литературы получены абсолютные веса групп (сумма равна 1.6%).

Таблица 4. Значения относительных весов 6-й и 7-й групп для ^{235}U в 7-ми групповом приближении, полученные в результате подгонки.

Номер группы	$T_{1/2,i}$ (сек)	a_i
6	0.494	0.125 ± 0.010
7	0.218	$0.020 (\pm 0.010)$
χ^2		1.34

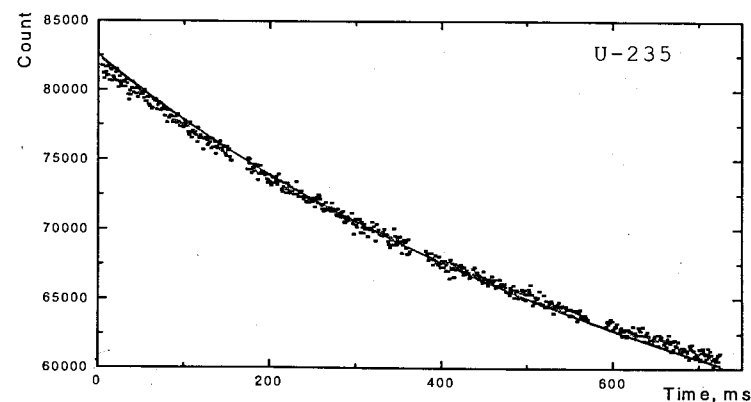


Рис. 6. Кривая распада для ^{235}U , рассчитанная в 7-ми групповом приближении.

Экспериментальные данные, полученные с образцом ^{239}Pu , анализировались в 6-ти и 7-ми групповом приближении таким же

образом, как и в случае ^{235}U . В Табл. 5 показаны значения весов 5-ой и 6-й групп, полученные в результате подгонки. Ссылки указывают на работы, из которых были взяты фиксированные параметры.

Таблица 5. Значения параметров для ^{239}Pu , полученные в результате подгонки в 6-ти групповом приближении.

No.	A_i [5]	a_i [18]
5	0.118 ± 0.008	0.082 ± 0.010
6	$0.022 (\pm 0.008)$	$0.049 (\pm 0.010)$
χ^2	1.58	1.51

На рис. 7 показано согласие рассчитанной кривой (с параметрами) с экспериментальными данными.

Полученные результаты представлены в таблице 6. Согласие с экспериментальными данными для ^{239}Pu несколько хуже, чем для ^{235}U ($\chi^2 = 1.7$).

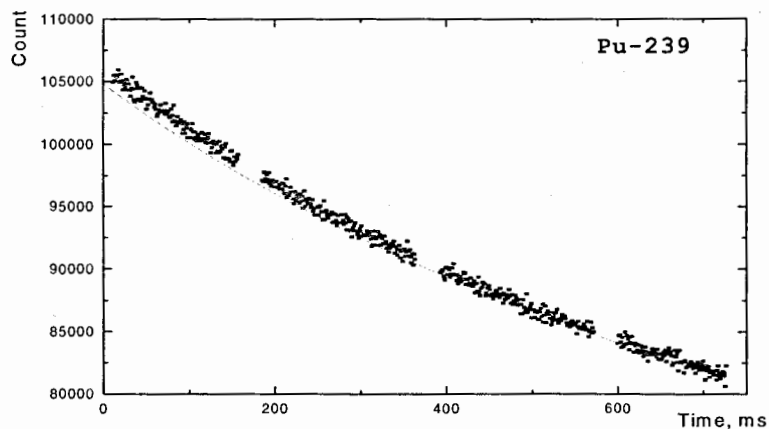


Рис. 7. Кривая распада для ^{239}Pu , рассчитанная в 7-ми групповом приближении.

Таблица 6. Параметры групп для ^{239}Pu в 7-ми групповом приближении, полученные в результате подгонки.

Номер группы	$T_{1/2,i}$ (сек)	a_i
6	0.460	0.066 ± 0.008
7	0.191	$0.029 (\pm 0.008)$
χ^2		1.68

К сожалению, однозначно определить параметры короткоживущих групп с высокой точностью не представляется возможным. Причина, видимо, заключается в слишком коротком периоде облучения и малом наклоне изучаемой кривой. Тем не менее, полученные с рекордной статистической точностью кривые распада позволяют получить необходимый для практических целей набор данных с более высокой точностью, чем ранее. Полученные данные дают возможность проверять соответствие между предлагаемыми различными авторами наборами параметров и экспериментальными данными.

На защиту выносятся следующие результаты:

1. На импульсном реакторе ИБР-2 создана установка «Изомер» для изучения характеристик ЗН, образующихся в делении, вызванном тепловыми и холодными нейтронами.
2. Методом периодического облучения образцов измерены выходы ЗН для реакции деления ядер-мишеней ^{233}U и ^{239}Pu тепловыми нейтронами с использованием данных для ^{235}U в качестве стандарта. Точность определения величины β по отношению к $\beta(^{235}\text{U})$ лучше 1,5%. Точность полученных значений v_i несколько хуже, поскольку стандарт определен с точностью 3%, но находится на уровне современных оцененных данных.
3. Измерены выходы ЗН, возникающих при делении холодными нейтронами (0.003 эВ) и нейтронами с энергией $E_n = 0.035$ эВ ядер ^{235}U , ^{233}U , ^{239}Pu . Показано, что в пределах точности измерений нет энергетической зависимости выхода ЗН в указанном диапазоне E_n .
4. Впервые измерен выход ЗН в реакции деления ^{237}Np тепловыми нейтронами.

5. Измерены кривые распада ЗН в интервале времени до 730 мс для ядер ^{235}U и ^{239}Pu . Измерения проведены с статистической точностью порядка 0.3-0.4% для каждого канала, соответствующего временному интервалу 1.024 мс. Полученные экспериментальные данные позволяют:

а) тестировать различные наборы параметров, известные из литературы;

б) дают возможность получить ограничение на возможное существование группы с сверхмалым периодом полураспада (50 мс);

в) получить относительные веса 5-й и 6-й групп (в 6-ти групповом приближении) с улучшенной точностью.

6. Для описания кривых распада предложены новые 7-ми групповые наборы констант для ^{235}U и ^{239}Pu , опирающиеся на известные из литературы данные для отдельных ядер-предшественников, и показано их соответствие экспериментальным кривым распада в исследованном интервале времени.

Основные результаты, изложенные в диссертации, опубликованы в следующих работах:

1. С.Б. Борзаков, Э. Дерменджиев, Ю.С. Замятнин, В.М. Назаров, С.С. Павлов, А.Д. Рогов, И. Русков, Установка для изучения запаздывающих нейтронов, Препринт ОИЯИ, РЗ-94-447, Дубна, 1994.
2. С.Б. Борзаков, Э. Дерменджиев, Ю.С. Замятнин, В.М. Назаров, С.С. Павлов, А.Д. Рогов, И. Русков, Установка для изучения запаздывающих нейтронов и предварительные результаты определения величины β_{eff} для ^{233}U по отношению к ^{235}U , Атомная энергия, т. 79, с. 231-232, 1995.
3. S.B. Borzakov, E. Dermendjiev, V.M. Nazarov, S.S. Pavlov, I. Ruskov, Yu.S. Zamyatnin, An Improved Experimental Facility for Studying Delayed Neutrons and Preliminary Results of the Value for ^{233}U Relative to ^{235}U , ISINN-2, Proc., p.192-200, Dubna, 1994.
4. S.B. Borzakov, E. Dermendjiev, A. Filip, W.I. Furman, V.Yu. Konovalov, Ts. Pantelev, I. Ruskov, Yu.S. Zamyatnin, Measurements of Delayed Neutron Yields from Thermal Neutron Induced Fission of ^{235}U , ^{233}U , ^{239}Pu and ^{237}Np , ISINN-4, Proc., p. 334, Dubna, 1996.
5. S.B. Borzakov, E. Dermendjiev, A. FILip, W.I. Furman, V.Yu. Konovalov, Ts. Pantelev, I. Ruskov, Yu. S. Zamyatnin, Measurements of Delayed Neutron Yields from Thermal Neutron Induced Fission of

^{235}U , ^{233}U , ^{239}Pu and ^{237}Np , 3rd Int. Conf. Dynamical Aspects of Nuclear Fission, Casta-Papiernichka, Slovakia, 30 Aug-4 Sept. 1996, Proc., Dubna, 1996.

6. S.B. Borzakov, E. Dermendjiev, A. Filip, W.I. Furman, V.Yu. Konovalov, Ts. Pantelev, I. Ruskov, Yu. S. Zamyatnin, Sh. S. Zeinalov, Measurements of Delayed Neutron Characteristics from Thermal Neutron Induced Fission, Colloquy on Delayed Neutron Data, Obninsk, Russia, 9-10 April, 1997.
7. S.B. Borzakov, A.N. Andreev, E. Dermendjiev, A. Filip, W.I. Furman, V.Yu. Konovalov, Ts. Pantelev, I. Ruskov, Yu.S. Zamyatnin, Sh. S. Zeinalov, Investigations of Delayed Neutrons by Periodical Irradiation Method on IBR-2 Reactor, ISINN-5, Proc., p. 343-347, Dubna, 1997.
8. S.B. Borzakov, E. Dermendjiev, A. Filip, W.I. Furman, V.Yu. Konovalov, Ts. Pantelev, I. Ruskov, Yu. S. Zamyatnin, Sh.S. Zeinalov, Delayed Neutron Measurements from Neutron Induced Fission of ^{235}U , ^{233}U , ^{239}Pu and ^{237}Np , Nuclear Data for Science and Technology, Proceedings, Italy, Trieste, 19-24 May 1997, v. I, p. 497, Bologna, 1997.
9. S.B. Borzakov, A.N. Andreev, E. Dermendjiev, A. Filip, W.I. Furman, Ts. Pantelev, I. Ruskov, Yu.S. Zamyatnin, Sh. Zeinalov, Measurements of Delayed Neutron Yields from Thermal Neutron Induced Fission of ^{235}U , ^{233}U , ^{239}Pu and ^{237}Np , Сообщение ОИЯИ ЕЗ-98-145, Дубна, 1998 (принято к печати в ЯФ).
10. 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, Препринт ОИЯИ РЗ-99-208, Дубна, 1999 (направлено в журнал ВАНТ, серия Ядерные константы).

Рукопись поступила в издательский отдел
17 января 2000 года.