

УДК 621.039.51

СПЕКТРОМЕТРИЯ ПО ВРЕМЕНИ ЗАМЕДЛЕНИЯ НЕЙТРОНОВ В СВИНЦЕ II: ДАННЫЕ СЕЧЕНИЙ $^{243}\text{Cm}(n, f)$, $^{244}\text{Cm}(n, f)$, $^{245}\text{Cm}(n, f)$, $^{246}\text{Cm}(n, f)$, $^{247}\text{Cm}(n, f)$, $^{248}\text{Cm}(n, f)$ ПРИ ЭНЕРГИИ ДО 100 кэВ

© 2024 г. Э. А. Коптелов*

Институт ядерных исследований РАН, Москва, 117312 Россия

**e-mail: koptelov@inr.ru*

Поступила в редакцию 25.11.2023 г.

После доработки 29.01.2024 г.

Принята в печать 29.01.2024 г.

Продемонстрированы возможности спектрометрии по времени замедления в свинце. Представлен обзор результатов цикла работ по измерению сечений деления изотопов кюрия ^{243}Cm , ^{244}Cm , ^{245}Cm , ^{246}Cm , ^{247}Cm , ^{248}Cm нейтронами с энергией ниже 100 кэВ, выполненных объединенной группой сотрудников ИЯИ РАН и ГНЦ РФ – ФЭИ на спектрометре по времени замедления нейтронов в свинце СВЗ-100. Этот спектрометр третьего поколения имеет высокую светосилу, позволившую исследовать нейтронно-ядерные процессы в микрограммовых образцах радиоактивных нуклидов, что недоступно в экспериментах, использующих времяпролетную спектрометрию. Результаты работ в ИЯИ РАН и ГНЦ РФ – ФЭИ отражены в международных базах ядерных данных, дополняют известные экспериментальные данные и указывают в ряде случаев на необходимость корректировки рекомендованных значений.

Ключевые слова: деление нейтронами ядер, младшие актиноиды, микрограммовые радиоактивные образцы, данные времяпролетных экспериментов, эпитепловые нейтроны, базы данных, подбарьерное деление.

DOI: 10.31857/S1028096024060146, EDN: DTPWLS

ВВЕДЕНИЕ

Спектрометрия по времени замедления нейтронов в свинце имеет долгую историю применения в качестве метода исследований ядерно-физических процессов. В основе метода лежит явление группировки скоростей нейтронов в узком интервале вблизи среднего значения при замедлении за счет упругого рассеяния в тяжелой среде. Для метода характерна высокая светосила при невысоком разрешении [1].

Идея спектрометра по времени замедления в свинце предложена в [2]. Физические основы метода спектрометрии по времени замедления в свинце получили дальнейшее развитие и реализацию [3, 4]. Следующее поколение спектрометров работало на фотонейтронах от электронного пучка: установки RINS (Rensselaer Intense Neutron Source, 1975 г., 75 т) (Rensselaer Polytechnic Institute, Трой, США), спектрометр на ускорителе “Факел” ИАЭ им. И.В. Курчатова (Москва, 1984 г., 50 т),

KULS (университет Киото, Япония, 1993 г., 40 т). Возможности спектрометров второго поколения и направления исследований на этих установках обсуждены в обзоре [4]. В современных спектрометрах по времени замедления в свинце третьего поколения источником нейтронов служит реакция скалывания (spallation), инициируемая импульсным пучком протонов. Это установки LSDS LANSCE (США, 2003 г., 19.5 т) и СВЗ 100 ИЯИ РАН (Институт ядерных исследований РАН) (Москва, 2003 г., 100 т).

Типичным рабочим диапазоном спектрометров по времени замедления в свинце является область энергии нейтронов от эпитепловых до ~20 кэВ. Даже при относительно плохом энергетическом разрешении ($\Delta E/E \cong 0.35$) по сравнению с времяпролетными спектрометрами спектрометры по времени замедления в свинце надежно выделяют промежуточные резонансы в сечениях подбарьерного деления. Следует отметить, что ра-

бочее тело СВЗ-100 содержит 100 т особо чистого свинца (уровень очистки 99.996%). Это обстоятельство обеспечивает лучшую чувствительность (светосилу) этого спектрометра по сравнению с другими меньшей массы, содержащими менее чистый свинец.

С развитием ядерной энергетики возрастают требования к точности оценок ядерно-физических параметров на основе существующих файлов ядерных данных. При реализации ядерных технологий используют рекомендованные оценки, базирующиеся на полном мировом комплексе экспериментальных и теоретических знаний [5]. В России в АО «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт» (ГНЦ РФ – ФЭИ) создана Российская национальная библиотека оцененных нейтронных данных РОСФОНД. Современная версия РОСФОНД-2010 [6] содержит оценки для всех стабильных и радиоактивных ядер и находится в открытом доступе, в том числе на сайте МАГАТЭ [7].

Имеются заметные расхождения между рекомендованными значениями из библиотек разных стран из-за недостатка экспериментальных данных и/или недостаточной точности измерений. Особенно это относится к ядерным данным радиоактивных изотопов младших актиноидов. Как отмечалось в [8], конструктивные особенности спектрометров по времени замедления в свинце обеспечивают наряду с высокой светосилой доступные возможности для исследования радиоактивных образцов. В связи с этим на нейтронном спектрометре по времени замедления в свинце СВЗ-100 ИЯИ РАН совместно с ГНЦ РФ – ФЭИ была реализована программа измерения сечений деления изотопов америция и кюрия. Обзор результатов исследований группы ИЯИ–ФЭИ по сечениям деления изотопов америция, полученных на спектрометре СВЗ-100 ИЯИ РАН, изложен в [9]. Ниже представлены итоги измерений нейтронных сечений деления изотопов кюрия в совместных экспериментах ИЯИ–ФЭИ, проведено обсуждение результатов и сопоставление с базами оценочных и экспериментальных данных.

ДАнные О НЕЙТРОННЫХ СЕЧЕНИЯХ ДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ КЮРИЯ, ДОСТУПНЫЕ ДО РЕАЛИЗАЦИИ ПРОГРАММЫ ИЗМЕРЕНИЙ ИЯИ–ФЭИ

До реализации комплекса исследований младших актиноидов на СВЗ-100 сложилась следующая картина данных об изотопах кюрия.

Ограничимся областью энергии нейтронов до 100 кэВ, доступной для исследований на СВЗ-100. Приведем основные сведения и ссылки. Более детальное сопоставление и обсуждение содержится в [10–17].

Кюрий-243

В резонансной области энергии (ниже 20 кэВ) преобладает деление. Трудности измерения связаны с высокой α -активностью ядра ^{243}Cm . Энергетическая зависимость сечения деления в области энергии выше 15 эВ (15 эВ–50 кэВ) измерена в [18] (2972 точки) в эксперименте на импульсном нейтронном источнике однократного действия (бомбовый взрыв, метод времени пролета на базе 240 м) в Лос-Аламосе, США, 1976 г. События деления измеряли, регистрируя осколки деления. В качестве монитора нейтронного потока использовали сечения реакций $^6\text{Li}(n, f)$ и $^{235}\text{U}(n, f)$. Исследуемый слой ^{243}Cm имел 11% примеси ядер ^{244}Cm . Точность полученных сечений деления (с учетом нормировки) не лучше 10%.

Сечение деления ^{243}Cm на тепловых нейтронах ($E_0 = 0.0253$ эВ) было измерено в двух экспериментах (1977 г.) [19, 20]. Получены сечения деления ^{243}Cm в тепловой точке ($E_0 = 0.0253$ эВ): $\sigma_0 = 609.6 \pm 25.9$ б (температура спектра нейтронов $T = 323$ К) и $\sigma_0 = 672 \pm 60$ б ($T = 353$ К) соответственно. Рекомендованное значение ENDF/BVII $\sigma_0 = 620,3$ б [21] является средневзвешенной оценкой измеренных величин (которая, однако не учитывала систематическую погрешность 5% [19]).

Для ядра ^{243}Cm имелось несколько файлов оцененных нейтронных данных, полученных на основе близких теоретических методов оценки (ENDF/B-VII, JENDL-4, РОСФОНД). В резонансной области энергии нейтронов все файлы опираются на оценку резонансных параметров [22], которая получена на основе экспериментальных значений полного нейтронного сечения, измеренного с помощью техники по времени пролета и механического селектора на реакторном пучке нейтронов [23, 24]. В области энергии выше 150 эВ эти оценки опираются на данные Лос-Аламоса [18] в предположении, что сечение деления описывается как среднее в рамках статистической теории ядерных реакций.

Результаты сравнения рекомендованных сечений деления $\sigma(E)E^{1/2}$ с экспериментальными данными указывают на недостаток экспериментальной информации о сечении деления ^{243}Cm в области ниже 50 эВ [11]. Актуальны новые измерения резонансных параметров и сечений.

Измерение на СВЗ-100 представлялось крайне полезным ввиду скудности экспериментальной информации.

Кюрий-244

Четно-четные изотопы кюрия кроме высокой α -активности имеют высокую скорость спонтанного деления. Деление ядра ^{244}Cm в области энергии нейтронов ниже 100 кэВ – глубоко неупругий процесс, который характеризуется наличием промежуточной структуры сечения деления. Подобные эффекты объясняют моделью двугорбого барьера [25], в которой деление рассматривают как многоступенчатый процесс. Этот процесс реализуется через промежуточные уровни класса II. Они являются компаунд-возбуждениями во второй потенциальной яме, которые связаны с компаунд-уровнями (класс I), соответствующими возбуждениям в первой потенциальной яме.

Сечение деления $^{244}\text{Cm}(n, f)$ в резонансной области энергии нейтронов измерено в [26] в области от 20 эВ до 2.8 МэВ. Данные получены в эксперименте по времени пролета с использованием подземного ядерного взрыва в качестве однократного импульсного источника нейтронов (Physics 8, Лос-Аламос). Пролетная база 250 м, монитор нейтронов $^6\text{Li}(n, f)$, $^{235}\text{U}(n, f)$, примеси 1.50%, мишень 2.5 мкг/см², 7.85 мкг.

На СВЗ-75 RINS, установленном на линейном ускорителе электронов, сечения деления измерены в области энергии нейтронов от 0.1 эВ до 80 кэВ [27]. Монитор нейтронов $^{235}\text{U}(n, f)$, примеси 0.47%, мишень 5.21 мкг. Точность данных составляла 7–8% при энергии нейтронов выше 80 эВ, а при низких энергиях точность уменьшалась.

Сечение деления ядра ^{244}Cm на тепловых нейтронах измерено в двух экспериментах, проведенных на реакторных пучках тепловых нейтронов [28]. Рекомендованное значение ENDF/BVII 1038 \pm 200 мб [21] является средневзвешенной оценкой измеренных величин. Относительная среднеквадратичная погрешность $\Delta\sigma_0$ оценки не лучше 20%. Соответственно, величина $\sigma_0 E_0^{1/2}$ равна 0.165 \pm 0.032 б·эВ^{1/2}. Сравнение экспериментальных данных и рекомендованных значений проведено в [13].

Необходимы уточняющие экспериментальные измерения интегралов сечений захвата и деления. Расхождения экспериментальных данных, полученных по времени пролета [26] и на спектрометре по времени замедления в свинце второго поколения [27], достигают порядка величины. Рекомендованная оценка частично опирается на результаты, полученные с помощью спектрометра

RINS, и лишь частично описывает данные время-пролетного эксперимента. Оценка и данные RINS сильно расходятся в области ниже 7 эВ.

Кюрий-245

Этот изотоп кюрия наиболее изучен в резонансной области и диапазоне энергии быстрых нейтронов [10]. В области энергии $E > 20$ эВ (100 эВ–10 кэВ) наблюдалась промежуточная структура сечения деления. Данные получены в [26] (бомбовый взрыв, времяпролетный метод на базе $L = 250$ м, монитор нейтронов $^6\text{Li}(n, \alpha)$, $^{235}\text{U}(n, f)$ примеси 23.5%, мишень 2.5 мкг/см², 7.85 мкг).

Оценка ENDF/B-VII при описании резонансной структуры опиралась на данные [28–30], верхний диапазон которых ограничен энергией 63 эВ (Livermore, линейный ускоритель электронов ЛЭУ-100, пролетная база 3.6 м, монитор нейтронов $^6\text{Li}(n, \alpha)$, мишени 3.25 и 2.5 мкг). Содержание примеси ^{244}Cm менее 0.2% в [29], измерения проводили при длительности импульса $\tau = 3$ мкс. Во втором эксперименте [30] длительность импульса $\tau = 60$ нс, содержание примеси ^{244}Cm менее 1%.

В области энергии нейтронов $E \leq 100$ эВ есть рекомендованные резонансные параметры для s -нейтронов. Накоплены данные измерений сечения деления ^{245}Cm на реакторных пучках [28]. Оценки разных стран в целом согласуются, но дополнительные измерения на спектрометре по времени замедления в свинце были бы полезны.

Кюрий-246

Деление ядра ^{246}Cm в резонансной области энергии нейтронов (ниже 10 кэВ) глубоко подбарьерное и характеризуется наличием промежуточной структуры нейтронных резонансов [31, 32, 25]. Сечения деления измерены методом времени пролета в области энергии от 20 эВ до 2.8 МэВ (подземный ядерный взрыв Physics 8) [26]. Масса мишени 16.3 мкг при содержании основного изотопа 94.7%. Наименьшая погрешность данных с учетом нормировки составила 8–11%, а в среднем хуже 20%. В [27] получены данные в области энергии 0.136 эВ–80 кэВ на СВЗ-75 RINS второго поколения. Мишень ^{246}Cm содержала 17 мкг при чистоте 96.87%. Погрешность данных с учетом нормировки при энергии выше 3 эВ достигала 7–11%. При низкой энергии погрешность составляла 30–50%.

Данные эксперимента Physics 8 [26] в области 100 эВ–10 кэВ заметно расходятся с оценкой и результатами, полученными на спектрометре RINS. Оценка ENDF/B-VII в области энергии

нейтронов выше 3 эВ опирается на данные экспериментов [27]. Она включает 17 *s*-резонансов в области энергии $E < 400$ эВ, причем только для десяти из них есть экспериментальные данные [16]. Имеются данные о сечении деления на тепловых нейтронах (ENDF/B-VII) [33]. Из анализа совокупности данных следовала необходимость проведения новых, более точных экспериментов.

Кюри-247

Информация о резонансных параметрах этого сильно делящегося изотопа основана на измерениях [26] с использованием нейтронов подземного ядерного взрыва (Physics 8) методом времени пролета в области энергии 20–60 эВ и [34] в диапазоне 0.5–20 эВ. Ввиду использования делящегося образца ^{247}Cm очень низкого обогащения (20.9%) измерения [26] представляются ошибочными, как это можно видеть из сопоставления с более поздними результатами исследований других авторов в области энергии быстрых нейтронов.

Имеются данные, полученные на спектрометре по времени замедления RINS [35] и на мезонной фабрике LANSCE (США) с помощью техники времени пролета [36]. В этих экспериментах использовали мишень ^{247}Cm массой 10.6 мкг при содержании основного изотопа 29.8%. Погрешность данных RINS с учетом нормировки при энергии ниже 3 эВ достигала 7–11%, а при низкой энергии доходила до 30–50%. Погрешность величин, полученных на мезонной фабрике LANSCE в области энергии нейтронов от 20 мЭВ до 9.8 кэВ с учетом нормировки, не лучше 10%.

Измерения 44 резонансов в области энергии ниже 60 эВ выполнены в [36]. Для первых 16 резонансов при энергии ниже 21 эВ найдены нейтронная и делительная ширины. Для рекомендации нужных значений нет достаточной информации [15]. В [37] (ВНИИЭФ, Саров) получены результаты в области энергии выше 20 кэВ с помощью методики подземного ядерного взрыва. Ниже 100 кэВ погрешность составляет 17–30%. Проводились реакторные измерения деления изотопов кюрия на тепловых нейтронах — сечения деления в тепловой точке (табл. 1 в [15]).

Рекомендованные данные библиотек ENDF/B-VII и РОСФОНД для ^{247}Cm опираются на результаты LANSCE и RINS и заметно расходятся с усредненными данными эксперимента Physics 8 [26] в области 100 эВ–20 кэВ. Оценка JEFF-3.1 показывает более низкий уровень в эпитепловой области, опираясь на результаты [33]. Новые измерения сечений деления в резонансной области были крайне необходимы ввиду существенных

расхождений экспериментальных данных и оценок ученых разных стран [15].

Кюри-248

Экспериментальные сечения деления включают бомбовые данные Physics 8 в области энергии $20 \text{ эВ} < E < 2.8 \text{ МэВ}$ [26] и результаты RINS [27] в диапазоне 0.1 эВ – 80 кэВ. В первом эксперименте использована мишень массой 67.6 мкг при содержании основного изотопа 89.3%. Точность полученных величин (с учетом нормировки) не лучше 8%. Во втором эксперименте использована высокообогащенная мишень массой 31.2 мкг при содержании основного изотопа 96.89%. Точность не лучше 7%. В области 100 эВ – 1 кэВ данные заметно расходятся [15], в интервале 2 – 80 кэВ они согласуются между собой.

Оценки JEFF-3.1 и РОСФОНД опираются на данные в тепловой точке, тогда как сечение по оценке ENDF/B-VII примерно в четыре раза меньше [16]. В области высокой энергии его величина заметно расходится с другими оценками. В то же время оценка РОСФОНД включает меньшее значение резонансного интеграла деления, чем в эксперименте. Сечение деления на тепловых нейтронах и резонансный интеграл деления I_f были измерены в двух реакторных экспериментах, результаты которых хорошо согласуются между собой [38, 33].

Изотоп обладает самой высокой для младших актиноидов интенсивностью спонтанного деления, но сечение деления в резонансной области относительно невелико. Эти два фактора являются причиной большого расхождения разных экспериментальных результатов и, соответственно, опирающихся на них оценок ученых разных стран [15, 16]. Для улучшения ситуации были полезны новые измерения на СВЗ-100.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ СЕЧЕНИЙ $^{243}\text{Cm}(n, f)$, ^{244}Cm , ^{245}Cm , ^{246}Cm , ^{247}Cm , ^{248}Cm НА СВЗ-100, ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ДРУГИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Программа предусматривала измерение сечений деления резонансными нейтронами изотопов америция и кюрия, в том числе ^{243}Cm , ^{244}Cm , ^{245}Cm , ^{246}Cm , ^{247}Cm , ^{248}Cm . Была поставлена задача получения результатов, обеспечивающих для непороговых нуклидов ^{243}Cm , ^{245}Cm , ^{247}Cm статистическую точность на уровне, близком к 1% и менее, а для пороговых нуклидов ^{244}Cm , ^{246}Cm , ^{248}Cm — порядка ~5%. Детали программы и этапы ее реализации подробно изложены в [9].

Информация о спектрометре СВЗ-100 ИЯИ РАН, детекторах (пропорциональных счетчиках), их калибровке и особенностях работы в условиях сверхинтенсивных нагрузок систем анализа и регистрации сигналов в процессе замедления нейтронов в тяжелой среде содержится в [39]. Экспериментальная техника, методика измерений и обработки данных описаны в [40]. Временные спектры событий деления измеряли с помощью быстрых многосекционных ионизационных камер деления, помещенных в рабочие каналы спектрометра по времени замедления в свинце СВЗ 100 ИЯИ РАН. Энергия протонного пучка линейного ускорителя протонов ИЯИ РАН в проводимых экспериментах 209 МэВ; ток пучка в импульсе $\sim 5\text{--}10$ мА. Основные измерения сечений деления проводили при длительности импульса протонов 1.0 мкс и частоте 50 Гц.

Камеры деления содержали делящиеся слои с исследуемыми изотопами, а также ^{239}Pu , ^{235}U . Слои с изотопами ^{235}U и ^{239}Pu использовали как мониторы потока нейтронов. Мишени, исследуемые в многосекционных ионизационных камерах делений, были изготовлены из материала высокой чистоты (младшие актиноиды) в процессе двойного электромагнитного разделения, проведенного в РФЯЦ–ВНИИЭФ (Саров). Данные об изотопном составе использованных мишеней кюрия приведены в табл. 1. Приведенное сечение деления исследуемых младших актиноидов $\sigma(E)E^{1/2}$ измеряли относительно усредненного сечения деления ^{239}Pu , которое рассчитывали с помощью компьютерной программы моделирования СВЗ-100 на основе метода Монте-Карло [41]. Программа позволяла вычислять времен-

ную зависимость средней энергии нейтронов $E(t)$ и временные спектры событий деления $N(t)$ для заданной ширины временного канала. Значение сечения деления брали из библиотеки ENDF/B-VII.1 [42]. Временную шкалу преобразовывали в шкалу энергии нейтронов с помощью основного соотношения, связывающего значение средней энергии нейтронов с временем замедления [43, 41].

Кюрий-243

Сечение деления ядер $^{243}\text{Cm}(n, f)$ измеряли на СВЗ-100 дважды. Результаты первых измерений приведены в [11]. Новые эксперименты проводили в улучшенных по сравнению с предыдущей работой условиях, что позволило получить более высокую статистическую точность измерений [17] по сравнению с данными [11]. Ядра ^{244}Cm и ^{246}Cm не вносят существенный вклад в измеряемое сечение деления ^{243}Cm . Трудности измерения связаны с высокой α -активностью ядра ^{243}Cm . В области энергии нейтронов 15 эВ–50 кэВ имелись только данные о сечении деления ^{243}Cm в резонансной области, полученные на импульсном источнике однократного действия в Лос-Аламосе (бомбовый взрыв) [18]. Точность измеренных величин (с учетом нормировки) не лучше 10%.

На СВЗ-100 были реализованы измерения сечения деления ^{243}Cm в области энергии нейтронов от 0.03 эВ до 14 кэВ при статистической точности (в первых измерениях) 2.2–1%, в области энергии 14 кэВ–1.5 эВ, до 2.3–9.8% при $E = 1$ эВ–43 мэВ. Поправки на примеси других изотопов кюрия в сечение деления ^{243}Cm из-за их малости не вводили. Учен вклад накопленных ядер ^{239}Pu во

Таблица 1. Изотопный состав Cm-мишеней на момент измерений

Мишень	Нуклид, ат. %							Примесь от α -распада	Масса, мкг	
	^{243}Cm	^{244}Cm	^{245}Cm	^{246}Cm	^{247}Cm	^{248}Cm	^{240}Pu			
^{243}Cm	$95.65 \pm \pm 0.005$	$3.79 \pm \pm 0.05$	$0.057 \pm \pm 0.002$	$0.48 \pm \pm 0.02$	$0.100 \pm \pm 0.002$			14.0% $^{239}\text{Pu} / ^{243}\text{Cm}$	4.26 ± 0.13 (^{239}Pu : 19.1)	
^{244}Cm	0.018	99.32	0.090	0.56	0.007			18.3% $^{240}\text{Pu} / ^{244}\text{Cm}$	4.51 ± 0.14 (^{239}Pu : 17.3)	
^{245}Cm	–	1.11	98.48	0.405					8.44 (^{239}Pu : 19.1)	
^{246}Cm		0.207	0.0165	99.53	0.137	0.10	0.111		13.0 (^{239}Pu : 17.3)	
^{247}Cm		2.23	0.78	12.56	73.84	10.59	0.55			
^{248}Cm		1.46	0.022	1.3	0.229	96.98	0.78			
^{239}Pu	Сверхвысокая чистота основного изотопа 99.9966%									

временной спектр для ^{243}Cm -камеры, особенно заметный в области 0.3 эВ резонанса $^{239}\text{Pu}(n, f)$ [11].

Сравнение рекомендованных сечений деления $\sigma(E)E^{1/2}$ с результатами первых измерений на СВЗ-100 показало [17], что в области энергии более 150 эВ в целом есть согласие с данными Лос-Аламаса и оценкой ENDF/B VII.0, усредненными по функции разрешения спектрометра СВЗ-100 ($\Delta E/E = 0.35$). В области ниже 40 эВ явно расходятся значения, полученные на спектрометре СВЗ-100, и рекомендованные сечения библиотек ENDF/B VII.0 и JENDL-4.0, которые мало отличаются от других оценок в этой области энергии. В связи с имеющимися расхождениями была проведена дополнительная серия измерений сечения деления ^{243}Cm в усовершенствованных экспериментальных условиях [17].

На СВЗ-100 получены уточненные данные о сечении деления ^{243}Cm в области энергии нейтронов 0.03 эВ–20 кэВ. Статистическая точность этих измерений заметно выше, чем в предыдущем эксперименте, и составляет 2–12% при энергии 27–44 мэВ, 1.3–1.8% при 45 мэВ–8.7 кэВ и 2–4.3% при $E > 10$ кэВ. Полученные данные были сопоставлены с усредненными по функции разрешения спектрометра СВЗ-100 ($\Delta E/E = 0.35$) результатами оценок ENDF/B-VII.0 и JENDL-4.0 (рис. 1). Согласно результатам измерений сечения деления ^{243}Cm на СВЗ-100 в области 0.02–1 эВ

приведенное сечение деления $\sigma(E)E^{1/2}$ при $E \leq 0.15$ эВ становится постоянным и соответствует значению в тепловой точке (при $E_0 = 0.0253$ эВ). Сравнение показывает, что в области энергии ниже 10 эВ, для которой до измерений на СВЗ-100 не было других прямых экспериментальных данных, результаты эксперимента и рекомендованные сечения заметно расходятся [17].

В интервале энергии нейтронов 20 эВ–20 кэВ данные СВЗ-100 согласуются с единственными (до измерений ИЯИ–ФЭИ) экспериментальными результатами, полученными времяпролетной методикой на бомбовом источнике нейтронов. В области энергии 20 кэВ данные СВЗ-100 лежат ниже усредненных сечений Лос-Аламаса [18], которые рассматривали как рекомендованные. Измеренное сечение деления при энергии 14 кэВ составляет 452 ± 12 б·эВ^{1/2}, а рекомендованное значение равно 505 б·эВ^{1/2} (ENDF/B-VII.1). В области энергии выше 2 кэВ оценочные сечения (ENDF/B-VII.1 и JENDL-4.0) в среднем лежат в коридоре данных [11] и [17], полученных на спектрометре СВЗ-100.

Приведена уточненная оценка сечения деления на тепловых нейтронах [17]. Абсолютное сечение деления ^{243}Cm получено с помощью экстраполяции данных из области 29–62 мэВ в тепловую точку, $\sigma_0 E_0^{1/2} = 102.1$ б·эВ^{1/2}, что отличается от рекомендованного значения [21] и получено в результате пересмотра экспериментальных данных [19, 20] с учетом выявленного отклонения фактора Весткотта от единицы [11]. Введенные поправки в данные [19, 20] привели к новой оценке величины $\sigma_0 = 642 \pm 29$ б. Систематическая ошибка (точность абсолютизации) измеренного сечения деления ^{243}Cm равна 4.5%. Эта оценка в пределах ошибок согласуется с результатом измерения сечения в тепловой точке в реакторном спектре $\sigma_0 = 667 \pm 26$ б [44].

Библиотеки JEFF-3.1, TENDL-2010, JEFF-3.1.2 и JENDL-4.0, ENDF/B-VII.1 рекомендуют разные значения сечения σ_0 . В библиотеках ENDF/B-VII.0 и РОСФОНД-2010 рекомендовано среднее значение на основе оценок [22] и [45]. Таким образом, имеются явные противоречия между экспериментальными данными о тепловом сечении и актуальными оценками. Учет обсужденных в [11] поправок к усредненным значениям [19, 20, 46] дает приведенное сечение в тепловой точке $\sigma_0 E_0^{1/2} = 100$ б·эВ^{1/2}.

Результаты измерений на СВЗ-100 позволили оценить параметры нижних s -резонансов, резонансного интеграла деления I^f . Обработка дан-

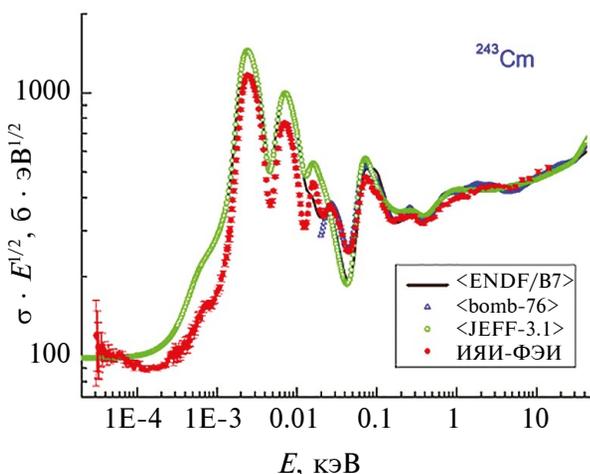


Рис. 1. Приведенное сечение $\sigma(E)E^{1/2}$ деления ^{243}Cm в зависимости от энергии нейтронов E , данные: ИЯИ–ФЭИ [12] (сплошные кружки); “бомбового” эксперимента [18] (треугольники); оценка ENDF/B-VII.0 (сплошная линия); оценка JEFF–3.1 (пустые кружки). Данные “бомбового” эксперимента и рекомендованные сечения усреднены с помощью функции Гаусса с разрешением СВЗ-100.

ных СВЗ-100 дает значение $I_f = 1295$ б, что в 1.2 раза меньше оценок JENDL-4.0 и ENDF/B-VII.1 (подробнее об этом написано в [12]). Среднее значение резонансного интеграла по результатам реакторных измерений $I_f = 1570 \pm 100$ б [22].

В целом полученные на СВЗ-100 сечение деления и резонансный интеграл для ^{243}Cm заметно расходятся с экспериментальными данными и оценками. В случае других младших актиноидов ($^{242\text{m}}\text{Am}$, ^{245}Cm), исследованных по такой же методике и в тех же условиях экспериментов, подобных расхождений не было [10]. Для выяснения причин расхождений как с рекомендованными данными, так и между рекомендованными значениями сечения деления ^{243}Cm необходимы новые эксперименты с хорошим энергетическим разрешением в области энергии нейтронов ниже 20 кэВ. В области ниже 10 эВ особо заметно расхождение с рекомендованными данными.

Окончательные сечения ^{243}Cm после обработки улучшенных результатов показаны на рис. 1 в широком диапазоне энергии нейтронов. Их систематическая неопределенность из-за процедуры нормализации составляет 2%, а неопределенность значений составляет менее 5% [17]. Для сравнения итоговых результатов СВЗ-100 измерения сечения деления ^{243}Cm с экспериментальными данными Лос-Аламосской группы (бомбовый эксперимент) [18] и рекомендованными оценками ENDF/B-VII, JENDL-4.0, JEFF-3.1 эти данные были усреднены по функции разрешения спектрометра с параметром $\Delta E/E = 0.35$. Как видно из рис. 1, результаты СВЗ-100 соответствуют усредненным данным Лос-Аламоса, особенно в диапазоне 20–50 эВ. Таким образом, подтверждена известная резонансная структура сечения. Резонансный пик при энергии нейтронов 72 эВ на сечении СВЗ-100 имеет меньшую высоту, чем резонанс в данных бомбового эксперимента и оцениваемых значениях.

Данные JEFF-3.1 показывают сильный резонанс при энергии 16 эВ, но он практически не наблюдается в случае ENDF/B-VII. Пик сечений ИЯИ–ФЭИ имеет промежуточную высоту. Следует отметить, что JEFF-3.1 не указывает на какой-либо резонанс при $E = 27$ эВ, который наблюдается в других работах. В диапазоне $E < 10$ эВ, в котором другие экспериментальные данные деления отсутствуют, сечения СВЗ-100 примерно на 25% меньше, чем ENDF/B-VII, но форма поперечного сечения одинакова. Наблюдались отчетливые пики при $E \sim 7$ эВ (из-за двух резонансов при 6.5 и 7.21 эВ), $E \sim 2.31$ и ~ 0.67 эВ.

Результаты измерений на СВЗ-100 содержат информацию о резонансной структуре сечения и заметно расходятся с оценкой ENDF/B-VII.0 (и РОСФОНД-2010) в области энергии нейтронов 13–60 эВ [22]. Как уже отмечалось выше, для выявления причины расхождения необходимы новые экспериментальные данные о сечении деления $^{243}\text{Cm}(n, f)$ с хорошим энергетическим разрешением в области энергии нейтронов ниже 20 кэВ.

Кюрий-244

Сечение деления ядра ^{244}Cm измерено на спектрометре СВЗ-100 в области энергии нейтронов 0.07 эВ–20 кэВ [13] относительно сечения ^{239}Pu – рекомендованного стандарта. Чистота мишени ^{239}Pu 99.9966%, масса 17.3 мкг. Точность измерения α -активности исследуемых слоев ^{244}Cm и ^{239}Pu 1%. Концентрация примеси изотопа ^{243}Cm в мишени ^{244}Cm была 0.018 ат. %, что лучше 0.0861 ат. % в эксперименте RINS (СВЗ-75).

Камера деления содержала делящиеся слои с изотопами ^{244}Cm , ^{239}Pu , ^{235}U . Слои с ^{239}Pu , ^{235}U использовали как мониторы потока нейтронов. Для учета вклада примеси ^{240}Pu в измеряемое сечение ^{244}Cm в канал СВЗ-100 была помещена камера со слоем ^{240}Pu . Временные спектры событий деления для всех мишеней регистрировали одновременно.

При обработке данных измерений учтены поправки на примеси изотопов. Подтверждены обнаруженные ранее резонансные структуры. Сечения, полученные на СВЗ-100, меньше сечений, полученных на спектрометре RINS (СВЗ-75) [27] (кроме области 5–20 эВ). В области энергии нейтронов $E < 5$ эВ такие отличия можно связать с вкладом изотопных примесей, который в эксперименте RINS не учитывался и был более существенным, чем при измерениях на СВЗ-100, где было достигнуто несколько лучшее разрешение по сравнению со спектрометром RINS.

В области энергии нейтронов выше 2 кэВ данные, полученные на спектрометре СВЗ-100, лучше согласуются с данными LANL [26], полученными на нейтронах бомбового взрыва. В области энергии нейтронов ниже 100 эВ наблюдается ярко выраженный резонансная структура сечения деления ^{244}Cm , сформированная нижними s -резонансами. Полученные данные о сечении деления ^{244}Cm позволили оценить параметры этих резонансов, в частности площадь резонанса и его делительную ширину.

Сравнение с оценкой ENDF/B-VII и экспериментальными сечениями [26, 27] показывает, что получено хорошее согласие для резонансов

7.67, 16.8, 86 и 96 эВ. По сравнению с данными RINS [27] достигнута в два раза большая точность определения площади делительных резонансов (A^k_f) (исключая резонанс 7.67 эВ). Это результат более корректной процедуры анализа результатов и более высокой точности экспериментальных данных.

В случае резонансов 35, 86 и 96 эВ имеется хорошее согласие с результатами высокого разрешения, полученными в бомбовом эксперименте, где точность определения параметров A^k_f существенно выше, чем в [13] на основе измерений на СВЗ-100. В случае резонанса 22.85 эВ наблюдается заметное расхождение – величина A_f [13] превышает в 1.5 раза значение, полученное в Лос-Аламосе. Заметим, что этот резонанс лежит на краю энергетического диапазона измерений в бомбовом эксперименте (рис. 2).

Оценка ENDF/B-VII не учитывает проявляющуюся в области энергии 1–10 кэВ промежуточную структуру сечения, наблюдаемую во всех экспериментах уже выше энергии нейтронов 100 эВ. В [13] показано, что энергия возбуждения ядра ^{244}Cm лежит выше барьера, и основным каналом распада уровней II является деление. Связь состояний оказывается очень слабой (матричный элемент связи существенно меньше расстояния между уровнями компаунд-ядра). Приведены

оценки параметров промежуточной структуры сечений деления ^{244}Cm и ^{240}Pu .

Кюрий-245

Мишень ^{245}Cm была приготовлена из материала очень высокой чистоты. Собственная α -активность составляла 0.1587 от полной активности, где доминирует распад примесных ядер ^{244}Cm . Результаты измерения сечения деления ^{245}Cm на СВЗ-100 в эпитепловой области энергии нейтронов опубликованы в [10]. Показано, что они заметно меньше оценки ENDF/B-VII ($\sigma_0 E_0^{1/2} = 342 \pm 9 \text{ б} \cdot \text{эВ}^{1/2}$ при энергии 0.0253 эВ). Экстраполяция данных СВЗ-100 в тепловую точку дает величину приведенного сечения $\sigma_0 E_0^{1/2} = (345 \pm 12) 221/2 \text{ б} \cdot \text{эВ}^{1/2}$.

Согласно результатам измерений приведенного сечения деления $\sigma(E)E^{1/2}$, данные, полученные на СВЗ-100 в области энергии $E < 200$ эВ, хорошо согласуются с усредненными по энергетическому разрешению спектрометра СВЗ-100 результатами других работ как по величине сечения, так и по его форме. Хорошее согласие с бомбовыми данными и полученными на спектрометре КИАЭ [47] указывает на недостатки оценки ENDF/B-VII при описании структуры сечения при энергии 100–200 эВ и в области 8 эВ. В области 2–30 кэВ данные СВЗ 100 на ~13% превышают оценку ENDF/B-VII (рис. 3). Результаты измерений

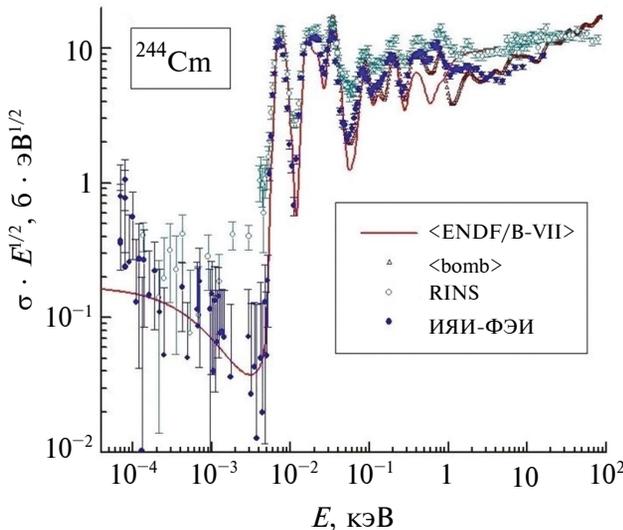


Рис. 2. Приведенное сечение $\sigma(E)E^{1/2}$ деления ^{244}Cm в зависимости от энергии нейтронов E , данные: ИЯИ–ФЭИ [12, 13] (сплошные кружки); “бомбового” эксперимента [26] (треугольники); RINS (СВЗ-75) [27] (пустые кружки); оценка ENDF/B-VII.0 (сплошная линия). Данные “бомбового” эксперимента и рекомендованные сечения усреднены с помощью функции Гаусса с разрешением СВЗ-100.

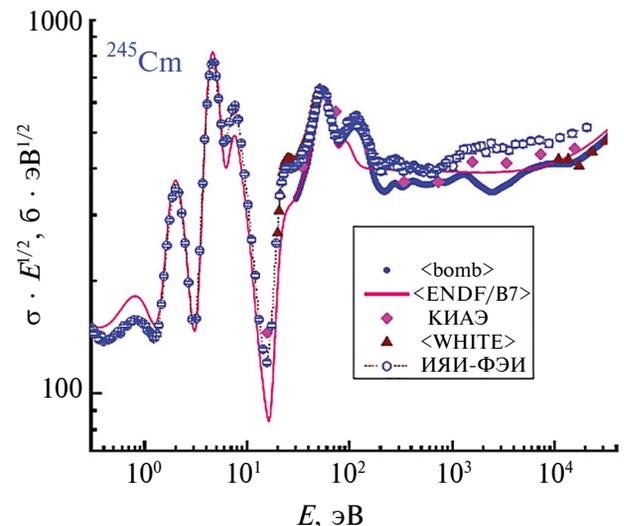


Рис. 3. Приведенное сечение $\sigma(E)E^{1/2}$ деления ядер ^{245}Cm в зависимости от энергии нейтронов E , данные: ИЯИ–ФЭИ [17, 10] (пустые кружки); “бомбового” эксперимента [26] (сплошные кружки); СВЗ-44 (КИАЭ) [47] (ромбы); эксперимента [55] (треугольники); оценка ENDF/B-VII.0 (сплошная линия). Данные “бомбового” эксперимента и рекомендованные сечения усреднены с помощью функции Гаусса с разрешением СВЗ-100.

на СВЗ-100 демонстрируют промежуточную структуру сечения деления ядра ^{245}Cm — деление составного ядра происходит существенно выше барьера деления. Приведены оценки резонансных параметров s -нейтронов ядра мишени ^{245}Cm для $E < 22$ эВ. Оценены также средние резонансные параметры s -нейтронов (эВ) ядра-мишени ^{245}Cm в области неразрешенных резонансов $E > E_s$ при энергии $E_s = 100$ эВ.

Сравнение доступных данных позволило выявить недостатки рекомендованных ENDF/B VII сечений деления ядра ^{245}Cm . В [48] сопоставлены результаты измерений, выполненных на СВЗ-100 и на СВЗ-40 (KULS), — приведены измеренные сечения деления $^{245}\text{Cm}(n, f)$ в диапазоне энергии от 0.01 эВ до 2 кэВ (рис. 4). Результаты для ^{245}Cm согласуются с данными [49], полученными на спектрометре RINS во всем энергетическом диапазоне, а также с результатами [50]. Расхождения в резонансной области энергии в диапазоне 1–30 эВ могут быть обусловлены различиями в энергетическом разрешении спектрометров. Ниже 2 эВ данные ИЯИ–ФЭИ [10] и оценка JENDL-4.0 дают меньшие значения, чем KULS. В энергетической области выше 50 эВ все экспериментальные данные согласуются друг с другом, тогда как оценка JENDL-4.0 занижает их (рис. 4).

В [51] представлены результаты измерения поперечного сечения деления нейтронами изотопа ^{245}Cm на времяпролетном спектрометре n _TOF (ЦЕРН) в широком диапазоне энергии

с высоким разрешением. Зависимость сечения от энергии, полученная в едином измерении при энергии нейтронов от 30 мэВ до 1 МэВ, была определена с точностью 5% относительно поперечного сечения $^{235}\text{U}(n, f)$. Энергетическая зависимость поперечного сечения оценена с неопределенностью, близкой к 3%. Получить абсолютную нормировку с сопоставимой точностью не удалось из-за высокого порога, необходимого для уменьшения большого α -фона. Поэтому данные были перенормированы до средневзвешенного теплового сечения, определенного в двух предшествующих измерениях [52, 53]. Сочетание неопределенностей для фонового вычитания, нормализации и формы потока привело к общей систематической погрешности около 5% во всем энергетическом диапазоне. В области энергии нейтронов от тепловых до 1 эВ сравниваемые сечения [54, 55] вели себя по-разному вблизи тепловой точки (наибольшая разница ~20%). Данные, полученные на n -TOF, оказались промежуточными между двумя наборами данных предыдущих измерений ниже 100 мэВ, но находятся в разумном согласии с [55] выше этой энергии и исключают один из наборов в области выше 10 эВ. В интервале от 50 эВ до 10 кэВ приводимые в [51] результаты согласуются с единственными известными ранее данными высокого разрешения [26], в то время как при более высоких значениях энергии наблюдается несколько иная энергетическая зависимость по сравнению с предыдущими измерениями. Экспериментальные данные [51] не воспроизводятся библиотеками ENDF/B-VII.0 и JENDL/AC-2008.

По сравнению с оцененными поперечными сечениями в библиотеках данных ENDF/B-VII.0 и JENDL/AC-2008 резонансные интегралы хорошо согласуются, т.е. в пределах $\pm 5\%$. Тем не менее существуют большие различия некоторых резонансов ниже 20 эВ, а также в неразрешенной резонансной области. Предварительный анализ показал, что параметры резонансов могут быть существенно улучшены. Соответственно, по утверждению авторов, необходим пересмотр оцененного сечения деления ^{245}Cm , особенно в разрешенной резонансной области.

В резонансной области энергии нейтронов сечения деления ^{245}Cm были измерены на установке GELINA Бельгия (Institute for Reference Materials and Measurements) методом времени пролета на пролетной базе около 9 м. Получены данные с улучшенным на этой установке энергетическим разрешением, в частности ниже 20 эВ [56]. Новый набор резонансных параметров определен с помощью оценочного кода CONRAD

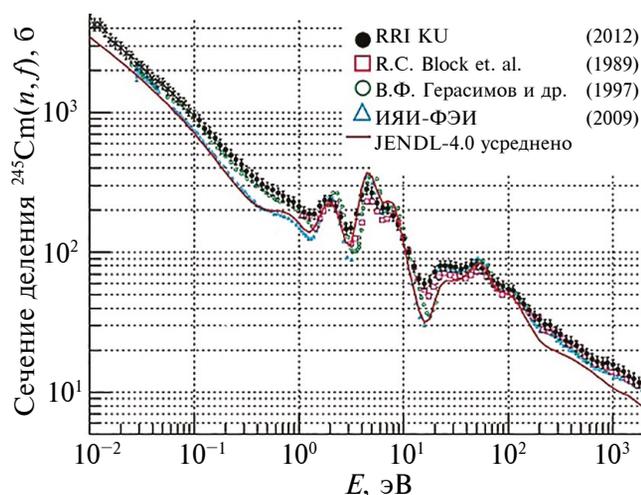


Рис. 4. Сравнение результатов измерения сечения деления $^{245}\text{Cm}(n, f)$ на СВЗ-40 (RRI KULS, 2012) [48] (сплошные кружки) с данными СВЗ-44 (КИАЭ) [50] (пустые кружки), СВЗ-100 (ИЯИ–ФЭИ, [10]) (треугольники), эксперимента [49] (квадраты) и рекомендованными данными JENDL-4 (сплошная линия), усредненными с учетом разрешения СВЗ [48].

(CEA-Cadarache). По результатам измерений определено сечение деления в тепловой точке $\sigma_0(E_0 = 0.0253 \text{ эВ}) = (2131 \pm 43 \pm 173) \text{ б}$ и фактор Весткотта $g_f = 0.939 \pm 0.019$, также приведены оценки статистической неопределенности и систематическая погрешность.

Кюрий-246

Сечение деления этого изотопа измеряли на СВЗ-100 дважды [14, 15]. Во втором эксперименте полное число зарегистрированных событий вынужденного деления было в ~ 3.3 раза больше. Соответственно, статистическая точность измерений оказалась почти в два раза выше. Данные второго эксперимента хорошо согласуются с результатами первых измерений практически во всем изученном диапазоне энергии нейтронов. Расхождения появляются лишь в области выше 10 кэВ, где они достигли 12%.

Статистическая точность составила 2.5–4.0% при $E < 250 \text{ эВ}$ в области резонансных пиков и 30–40% в остальной области [15]. Оценены абсолютная $\Delta\sigma$ и относительная $\delta = \Delta\sigma/\sigma$ ошибки измеренных сечений деления изотопов кюрия в функции энергии нейтронов. В области малых энергий ошибки $\Delta\sigma$ для слабо делящихся ядер ^{246}Cm и ^{248}Cm являются, по сути, пределами обнаружения. Для ^{246}Cm соответствующая величина составляет $\sim 10 \text{ мб} \cdot \text{эВ}^{1/2}$. Систематическая ошибка (точность абсолютизации) оценивается как 3.4–4% [15].

Изотопный состав мишени был существенно лучше, чем в эксперименте на спектрометре RINS [27]. Точность измерения α -активности исследуемых слоев ^{246}Cm и ^{239}Pu равна 1%. Мишень содержала малые, но сильно делящиеся примеси изотопов ^{245}Cm и ^{247}Cm . Их вклад в измеренное сечение в области энергии нейтронов $E > 2 \text{ эВ}$ сравнительно мал (несколько процентов), однако при $E < 1 \text{ эВ}$ (время замедления $t > 400 \text{ мкс}$) он начинает доминировать. Проведено вычитание вклада примесей в измеряемое среднее сечение, и обоснована корректность процедуры.

Данные СВЗ-100 о приведенном сечении деления $\sigma(E)E^{1/2}$ ядра ^{246}Cm сравнивали с результатами группы RINS ([27, 35], сечения поправлены на вклад 0.084% примеси ядер ^{247}Cm в исследованном образце) и LANL [26], полученными с использованием нейтронов бомбового взрыва. Данные СВЗ-100 в целом лежат между RINS и LANL. Подтверждены обнаруженные ранее резонансные структуры. Рекомендованная оценка в области энергии нейтронов выше 3 эВ опиралась на результаты RINS. В области энергии более

200 эВ расхождение данных СВЗ-100 и RINS составляет 1.4 раза.

В результате измерений на СВЗ-100 (рис. 5) обнаружена более четкая резонансная структура в области энергии $E < 85 \text{ эВ}$ по сравнению с RINS. Резонансы при 15.3 и 84 эВ почти полностью разделяются, что лишает основания вводить в оценку ENDF/B-VII гипотетические резонансы с малой нейтронной шириной при энергии 33 и 47 эВ. В области энергии нейтронов $E < 3 \text{ эВ}$ данные СВЗ-100 не противоречат оценке ENDF/B-VII.

Сечения деления ^{246}Cm , измеренные на СВЗ-100 [15], позволили оценить величину резонансного интеграла I_f . При интегрировании от 0.5 эВ до $E_2 = 20 \text{ кэВ}$ получено значение $I_f = 1.734 \pm 0.10 \text{ б}$ [16]. Рекомендованное сечение (ENDF/B-VII), оцененное в тех же энергетических пределах, составляет 4.862 б. Таким образом, полученная величина I_f в ~ 2.8 раза меньше оценки ENDF/B-VII. Оценены значения параметров нижних s -нейтронных резонансов (площадь резонанса A_f и его делительная ширина Γ_f).

Информация о промежуточной структуре сечения подбарьерного деления ^{246}Cm содержится в данных СВЗ-100 и RINS. Результаты СВЗ-100 в области $E = 50\text{--}1600 \text{ эВ}$ указывают на существование промежуточной структуры сечения деления. Выявлены недостатки рекомендованных данных ENDF/B-VII о сечении деления ядер ^{246}Cm .

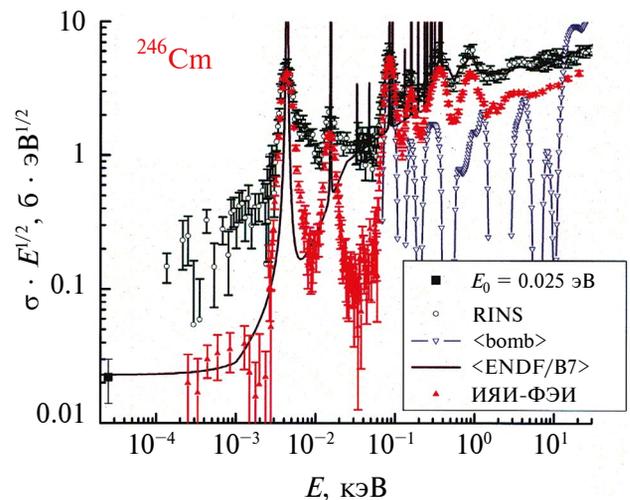


Рис. 5. Приведенное сечение $\sigma(E)E^{1/2}$ деления ^{246}Cm в зависимости от энергии нейтронов E , данные: ИЯИ-ФЭИ [15] (сплошные треугольники); RINS [27, 35] (пустые кружки); тепловая точка [33] (квадраты); оценка ENDF/B7 (сплошная линия); LANL [26] (треугольники), данные усреднены с помощью функции Гаусса с разрешением $\Delta E/E = 0.28$.

Кюрий-247

Результаты измерений приведенного сечения деления $\sigma(E)E^{1/2}$ изотопа ^{247}Cm на СВЗ-100 [15] в области малой энергии в пределах ошибок согласуются с данными RINS [35] и времяпролетными данными высокого разрешения LANSCE [36] (рис. 6). Усреднение величин, полученных с помощью спектрометра СВЗ-100, дало значение $\sigma(E)E^{1/2} = 19.6 \pm 0.84 \text{ б} \cdot \text{эВ}^{1/2}$ в диапазоне $E = 0.03\text{--}0.1 \text{ эВ}$, что немного выше оценки РОСФОНД ($17.7 \text{ б} \cdot \text{эВ}^{1/2}$) и существенно отличается от оценки JEFF-3.1 ($13 \text{ б} \cdot \text{эВ}^{1/2}$) при энергии нейтронов в тепловой точке $E_0 = 0.0253 \text{ эВ}$.

Данные, полученные на СВЗ-100, RINS и LANSCE, удовлетворительно согласуются с оценкой РОСФОНД в области энергии нейтронов до 150 эВ. Выше 150 эВ результаты измерений на СВЗ-100 хорошо согласуются с экспериментами группы RINS и немного отличаются от результатов LANSCE, но расходятся с оценкой РОСФОНД (до 17% при энергии 20 кэВ). В то же время данные, полученные на СВЗ-100 в этой области энергии, соответствуют усредненным результатам бомбового эксперимента LANL [26]. При измерении на СВЗ-100 обнаружена более четкая резонансная структура по сравнению с RINS, особенно вблизи резонанса 18 эВ.

Приведена оценка резонансного интеграла I_f [15]. В области от 0.5 эВ до 20 кэВ $I_f = 889 \pm 36 \text{ б}$, что подтверждает данные RINS ($890 \pm 53 \text{ б}$) и несколько ниже сечения LANSCE ($1091 \pm 80 \text{ б}$). Рекомендованное значение (РОСФОНД) опирается на данные LANSCE, несколько превышает величину ИЯИ–ФЭИ и существенно превышает реакторные данные [38, 33]. Оценка JEFF-3.1 дает слишком низкое значение резонансного интеграла. Для ядер с высокой делимостью (нечетные ядра) зависимость резонансного интеграла от верхней границы интегрирования E_2 слабая. Оценки на основе рекомендованных значений показывают, что расширение границы спектра от $E_2 = 20 \text{ кэВ}$ до 20 МэВ увеличивает резонансный интеграл до 1.4% для ^{247}Cm .

На основе анализа формы сечений проведена оценка площади делительных резонансов A_f [16]. Определены величины погрешности для различных резонансов с учетом систематической ошибки, связанной с нормировкой. Уточнена информация о s -нейтронных делительных резонансах.

Кюрий-248

В области энергии нейтронов $E = 5\text{--}150 \text{ эВ}$ данные СВЗ-100 [15] и RINS [27] хорошо согласуются. Результаты измерений на СВЗ-100, усред-

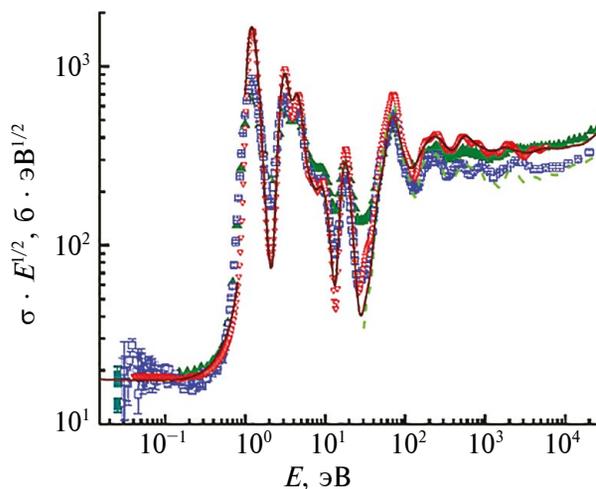


Рис. 6. Приведенное сечение $\sigma(E)E^{1/2}$ деления ^{247}Cm в зависимости от энергии нейтронов E , данные: ИЯИ–ФЭИ [15] (пустые квадраты); RINS [35] (сплошные треугольники); LANSCE [36] (пустые треугольники); тепловая точка [38, 33] (сплошные квадраты); оценка РОСФОНД-2010 (сплошная линия); Physics 8 (LANL) [26] (штриховая линия). Данные LANSCE, LANL и ROSFOND усреднены с помощью функции Гаусса с разрешением $\Delta E/E = 0.28$ (СВЗ-100).

ненные в диапазоне 0.5–2.0 эВ, дали величину $\sigma(E)E^{1/2} = 0.056 \pm 0.020 \text{ б} \cdot \text{эВ}^{1/2}$, которая не противоречит оценке РОСФОНД и данным для тепловой точки [15, 38, 33]. Большая ошибка полученной величины не позволяет однозначно подвергнуть сомнению результаты оценки ENDF/B-VII ($0.0128 \text{ б} \cdot \text{эВ}^{1/2}$).

Оценены площади нижних делительных резонансов A_f и проведено сравнение с результатами измерений RINS и эксперимента Physics 8 [27, 26]. Имеются расхождения с данными РОСФОНД в оценке площади резонанса при энергии 7.25 эВ. Выше 150 эВ сечения, измеренные на СВЗ-100, расходятся с данными RINS и оценкой РОСФОНД, усредненной по функции разрешения спектрометра СВЗ-100. Результаты LANL (Physics 8) [26] в этой области расходятся и с данными RINS, и СВЗ-100. В области 10–30 кэВ расхождения практически нет (рис. 7).

Оценка резонансного интеграла I_f (от 0.5 эВ до 20 кэВ) дает значение $I_f = 3.61 \pm 0.20 \text{ б}$. Ограничение верхней границы рекомендованной величины интеграла I_f в данных РОСФОНД от 20 МэВ до 20 кэВ дает значение 3.842 б, близкое к оценке по данным СВЗ-100, что примерно в два раза меньше величин, полученных в реакторных измерениях [38, 33] (для четно-четных изотопов кюрия зависимость резонансного интеграла от верхней границы интегрирования довольно сильная).

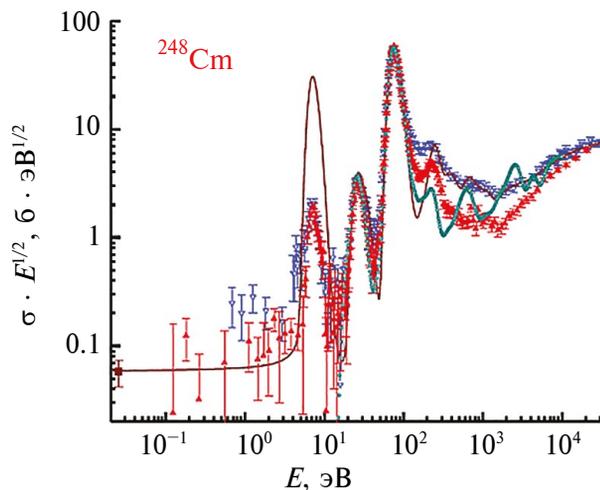


Рис. 7. Приведенное сечение $\sigma(E)E^{1/2}$ деления ^{248}Cm в зависимости от энергии нейтронов E , данные: ИЯИ–ФЭИ [16] (сплошные треугольники); RINS [27] (пустые треугольники); тепловая точка (сплошные квадраты); Physics 8 (LANL) [26] (кружки); оценка РОСФОНД-2010 (сплошная линия). Данные LANL и РОСФОНД усреднены с помощью функции Гаусса с разрешением $\Delta E/E = 0.28$ (СВЗ-100).

Высокая чувствительность спектрометра СВЗ-100 позволила измерить делительную ширину для 35 эВ резонанса ядра ^{248}Cm на уровне 9.8 ± 5.1 мкэВ, тогда как полученное в эксперименте RINS значение в семь раз больше: 70 ± 20 мкэВ. Заметим, что масса мишени в этом эксперименте составляла 31 мкг, а на СВЗ-100 использовали мишень массой 3.6 мкг.

Проведена оценка параметров нижних s -уровней делительных нейтронных резонансов. Сравнение с имеющимися данными выявило недостатки и противоречия в измеренных и рекомендованных сечениях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксперименты по измерению сечений деления изотопов кюрия в области энергии нейтронов ниже 100 кэВ на спектрометре по времени замедления в свинце СВЗ-100 в рамках совместной программы исследований младших актиноидов ИЯИ РАН и ГНЦ РФ–ФЭИ дали новые результаты, выявили неточности и противоречия баз, рекомендованных ядерных данных.

Получены новые сведения о сечениях деления $^{243}\text{Cm}(n, f)$, $^{244}\text{Cm}(n, f)$, $^{245}\text{Cm}(n, f)$, $^{246}\text{Cm}(n, f)$, $^{247}\text{Cm}(n, f)$, $^{248}\text{Cm}(n, f)$ в области энергии нейтронов от 0.02 эВ до 20 кэВ. На основе данных

о сечениях вынужденного деления ядер кюрия, полученных на СВЗ-100 ИЯИ РАН, сделаны оценки резонансных параметров для этих ядер, в том числе резонансных интегралов деления и параметров s -нейтронных резонансов. Подтверждено наличие промежуточных структур сечений подбарьерного деления исследованных изотопов.

Получена дополнительная информация о поведении нейтронных сечений деления вблизи тепловой точки и в резонансной области энергии нейтронов. Высокая чувствительность СВЗ-100 позволила получить ценную информацию, несмотря на низкое разрешение спектрометра. В образцах изотопов, исследованных в ИЯИ–ФЭИ, использовали мишени актиноидов из материалов высокой чистоты, полученных в РФЯЦ–ВНИИЭФ (Саров). Результаты исследований в ИЯИ–ФЭИ нашли свое отражение в отечественной и международной базах данных. Работа была поддержана МАГАТЭ [12, 17].

За время, прошедшее после завершения цикла работ ИЯИ–ФЭИ, состоялось ограниченное число новых экспериментов в области эпитепловых (резонансных) значений энергии нейтронов до 100 кэВ, результаты которых рассмотрены при анализе данных СВЗ-100. В ЦЕРНе в течение ряда лет реализуется программа исследований нейтронно-ядерных взаимодействий на основе спектрометра по времени пролета CERN n_TOF [57].

Для обеспечения точности измерений, удовлетворяющих требованиям современной ядерной энергетики, и совершенствования базы ядерных данных (например, [58]) необходимы дополнительные эксперименты с хорошим разрешением в широком диапазоне энергии нейтронов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает глубокую признательность сотрудникам ИЯИ РАН и ГНЦ РФ – ФЭИ, принимавших участие в реализации работ, результаты которых нашли отражение в предлагаемом обзоре. Высокое качество образцов актиноидов, изготовленных из материалов особой чистоты (РФЯЦ–ВНИИЭФ, Саров), обеспечило значимость и достоверность полученных данных. Серию исследований на СВЗ-100 ИЯИ РАН осуществляли при поддержке академика В.А. Матвеева.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор работы заявляет отсутствие конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пикельнер Л.Б., Попов Ю.П., Щарапов Э.И. // Нейтрон. К пятидесятилетию открытия. М.: Наука, 1983. С. 80.
2. Лазарева Л.Е., Фейнберг Е.Л., Шапиро Ф.Л. // ЖЭТФ. 1955. Т. 29. С. 381.
3. Попов Ю.П. // ЭЧАЯ. 1995. Т. 26. С. 1503.
4. Попов Ю.П. // ЭЧАЯ. 2003. Т. 34. С. 448.
5. Игнатюк А.В., Николаев М.Н., Фурсов Б.И. // Атомная энергия. 2014. Т. 116. № 4. С. 209.
6. РОСФОНД – Российская библиотека Файлов Оцененных Нейтронных Данных. АО “ГНЦ РФ–ФЭИ”. <https://ippe.ru>
7. The International Network of Nuclear Reaction Data Centers: <https://www-nds.iaea.org/nrdc/>
8. Исаков А.И., Казарновский М.В., Медведев Ю.А., Метелкин Е.В. Нестационарное замедление нейтронов. Основные закономерности и некоторые приложения. М.: Наука, 1984. 264 с.
9. Коптелов Э.А. Сечения деления изотопов америция и кюрия при энергиях нейтронов до 100 кэВ. Препринт ИЯИ РАН № 1451/2023. М.: ИЯИ РАН, 2023. 56 с.
10. Алексеев А.А., Бергман А.А., Берлев А.И., Коптелов Э.А., Самылин Б.Ф., Труфанов А.М., Фурсов Б.И., Шорин В.С. // Атомная энергия. 2009. Т. 106. № 2. С. 106. <https://doi.org/10.1007/s10512-009-9142-1>
11. Алексеев А.А., Бергман А.А., Берлев А.И., Коптелов Э.А., Самылин Б.Ф., Труфанов А.М., Фурсов Б.И., Шорин В.С. // Атомная энергия. 2009. Т. 107. № 2. С. 86. <https://doi.org/10.1007/s10512-009-9204-4>
12. Alekseev A.A., Bergman A.A., Berlev A.I., Koptelov E.A., Samylin B.F., Trufanov A.M., Fursov B.I., Shorin V.S. Neutron-Induced Fission Cross Section of Uranium, Americium and Curium Isotopes. Progress Report on Research Contract 14485. Coordinated Research Project on Minor Actinide Neutron Reaction Data (MANREAD). IAEA: December, 2009. 22 p. <https://www-nds.iaea.org/publications/indc/indc-csr-0451>
13. Алексеев А.А., Бергман А.А., Берлев А.И., Коптелов Э.А., Самылин Б.Ф., Свиринов М.И., Труфанов А.М., Фурсов Б.И., Шорин В.С. // Ядерная физика. 2010. Т. 73. № 9. С. 1533. <https://doi.org/10.1134/S1063778810090036>
14. Алексеев А.А., Бергман А.А., Берлев А.И., Коптелов Э.А., Самылин Б.Ф., Свиринов М.И., Труфанов А.М., Фурсов Б.И., Шорин В.С. // Ядерная физика. 2010. Т. 73. № 10. С. 1693. <https://doi.org/10.1134/S1063778810100029>
15. Алексеев А.А., Бергман А.А., Берлев А.И., Коптелов Э.А., Егоров А.С., Самылин Б.Ф., Фурсов Б.И., Шорин В.С. // Атомная энергия. 2010. Т. 109. № 6. С. 332. <https://doi.org/10.1007/s10512-011-9376-6>
16. Алексеев А.А., Бергман А.А., Берлев А.И., Коптелов Э.А., Егоров А.С., Самылин Б.Ф., Фурсов Б.И., Шорин В.С. // Атомная энергия. 2011. Т. 110. № 1. С. 41. <https://doi.org/10.1007/s10512-011-9390-8>
17. Alekseev A.A., Bergman A.A., Berlev A.I., Koptelov E.A., Egorov A.S., Samylin B.F., Trufanov A.M., Fursov B.I., Shorin V.S. Neutron-induced Fission Cross Sections of Am and Cm Isotopes. (Final Report of RC-14485). Resonance and Fast Neutron Induced Fission Cross Sections of Americium and Curium Nuclides (Third-year Report of RC-14485) under the CRP on Minor Actinide Neutron Reaction Data (MANREAD). IAEA: January, 2012. 30 p. <https://www-nds.iaea.org/publications/indc/indc-csr-0454>
18. Silbert M.G. Fission Cross Section of ^{243}Cm . Los Alamos Scientific Lab. Reports. LA: 1976. № 6239-MS.
19. Bemis C.E., Jr., Oliver J.H., Eby R., Halperin J. // Nucl. Sci. Eng. 1977. V. 63. P. 413. <https://doi.org/10.13182/NSE77-A27058>
20. Журавлев К.Д., Крошкин Н.И. // Атомная энергия. 1977. Т. 47. Вып. 1. С. 55.
21. Chadwick M.B., Oblozinsky P., Herman M. et al. // Nucl. Data Sheets. 2006. V. 107. P. 2931. <https://doi.org/10.1016/j.nds.2006.11.001>
22. Mughabghab S.F. Atlas of Neutron Resonances. Resonance Parameters and Thermal Cross Sections. $Z = 1-100$. Elsevier Science, 2006. 1372 p.
23. Ануфриев В.А., Бабич С.И., Кочерыгин Н.Г. и др. // Атомная энергия. 1981. Т. 51. Вып. 5. С. 330.
24. Berreth J.R., Simpson F.B., Rusche B.C. // Nucl. Sci. Eng. 1972. V. 49. P. 145. <https://doi.org/10.13182/NSE72-A35502>
25. Бор О., Моттelson Б. Структура атомного ядра. Т. 2. Гл. 6. М.: Мир, 1977. 663 с.
26. Moore M.S., Keyworth G.A. // Phys. Rev. C. 1971. V. 3. P. 1656. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.3.1656>
27. Maguire H.T., Stora C.R.S., Block R.C., Slovacek R.E., Dabbs J.W.T., Dougan R.J., Hoff R.W., Loughheed R.W. // Nucl. Sci. Eng. 1985. V. 89. P. 293. <https://doi.org/10.13182/NSE85-A18621>
28. Experimental Nuclear Reaction Data (EXFOR/CSISPS). IAEA-NDS. Vienna, 2008. <https://www.nndc.bnl.gov>
29. Browne J.C., Benjamin R.W., Karraker D.G. // Nucl. Sci. Eng. 1978. V. 65. P. 166. <https://doi.org/10.13182/NSE78-A27138>
30. White R.M., Browne J.C., Howe R.E. et al. Fission Cross Sections of ^{245}Cm // Proc. Int. Conf. on Nucl. Cross Sections for Technol. Knoxville: 1979. P. 469.
31. Игнатюк А.В., Кононов В.Н., Кузьминов Б.Д. и др. // ВАИТ. Сер. Ядерные константы. 1996. Вып. 1. С. 3.
32. Bjornholm S., Lynn J.E. // Rev. Mod. Phys. 1980. V. 52. P. 725. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.52.725>
33. Журавлев К.Д., Крошкин Н.И., Четвериков А.П. // Атомная энергия. 1975. Т. 39. № 4. С. 285.
34. Беланова Т.С., Колесов А.Г., Клинов А.Г. и др. // Атомная энергия. 1979. Т. 47. Вып. 3. С. 206.
35. Danon Y., Slovacek R., Block R. et al. // Nucl. Sci. Eng. 1991. V. 109. P. 341. <https://doi.org/10.13182/NSE91-A23859>
36. Danon Y., Moore M., Keohler P. et al. Measurement and Analysis of the Neutron-Induced Fission Cross

- Sections of ^{247}Cm , ^{254}Es and ^{250}Cf // Proc. Conf. on Nucl. Data for Sci. and Technol. Gatlinburg, USA. 1994. P. 245.
37. Фомушкин Э.Ф., Новоселов Г.Ф., Виноградов Ю.И. и др. // Атомная энергия. 1987. Т. 62. Вып. 4. С. 279.
 38. Benjamin R., Mac Murdo K., Spencer J. // Nucl. Sci. Eng. 1972. V. 47. P. 203.
<https://doi.org/10.13182/NSE72-A22397>
 39. Алексеев А.А., Бергман А.А., Берлев А.И., Коптелов Э.А. Нейтронный комплекс ИЯИ РАН. Спектрометр нейтронов по времени замедления в свинце (СВЗ-100). Препринт ИЯИ РАН № 1258/2010. М.: ИЯИ РАН, 2010. 52 с.
 40. Алексеев А.А., Бергман А.А., Берлев А.И., Коптелов Э.А., Самылин Б.Ф., Труфанов А.М., Фурсов Б.И., Шорин В.С. // Ядерная физика 2008. Т. 71. № 8. С. 1379.
<https://doi.org/10.1134/S1063778808080048>
 41. Шорин В.С. // ВАНТ. Сер. Ядерные константы. 2008. Вып. 1–2. С. 60.
 42. Chadwick M.B., Herman M., Obložinsky P. et al. // Nucl. Data Sheets. 2011. V. 112. Iss. 12. P. 2887.
<https://doi.org/10.1016/j.nds.2011.11.002>
 43. Латышева Л.Н., Соболевский Н.М., Коптелов Э.А., Илич Р.Д. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2015. № 11. С. 9.
<https://doi.org/10.1134/S1027451015060142>
 44. Popescu L., Heyse J., Wagemans J., Wagemans C. // Nucl. Sci. Eng. 2012. V. 171. P. 204.
<https://doi.org/10.13182/NSE11-85>
 45. Беланова Т.С. // ВАНТ. Сер. Ядерные константы. 1993. Вып. 1. С. 22.
 46. Hulet E.K., Hoff R.W., Bowman H.R., Mitchell M.C. // Phys. Rev. 1957. V. 107. Iss. 5. P. 1294.
<https://doi.org/10.1103/PhysRev.107.1294>
 47. Герасимов В.Ф., Даничев В.В., Дементьев В.Н., Зенкевич В.С., Мозолев Г.В. // Нейтронная физика. Матер. I Междунар. конф. по нейтронной физике. Киев, 14–18 сентября 1987. М.: ЦНИИАтоминформ, 1988. Т. 3. С. 84.
 48. Hirose K., Ohtsuki T., Shibasaki Y. et al. // J. Nucl. Sci. Technol. 2012. V. 49. № 11. P. 1057.
<https://doi.org/10.1080/00223131.2012.730895>
 49. Block R.C., Slovacek R.E., Hoff R.W., Nakagome Y. Technique for Fission Measurements of Highly Active and Weak Cross Section Actinides // Proc. Int. Conf. on Fifty Years with Nuclear Fission. American Nuclear Society. Inc., La Grange Park, Illinois, 1989. CONF-890406. V. 1. P. 354.
 50. Gerasimov V.F., Danichev V.V., Dement'ev V.N., Zenkevich V.S., Mozolev G.V. Measurement of Transuranium Isotopes Fission Cross Section with Lead Neutron Slowing-Down Spectrometer // Proc. Int. Sem. on Interactions of Neutrons with Nuclei (ISINN-5). JINR: Dubna, 1997. № e3-97-213. P. 348.
 51. Calviani M., Meaze M.H., Colonna N. et al. // Phys. Rev. C. 2012. V. 85. P. 034616.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevC.85.034616> PACS
 52. Letourneau A., Dupont E., Mutti P., Panebianco S. // Proc. 2nd EFNUDAT Workshop on Neutron Measurements, Theory and Applications. Budapest, Hungary, 2009. P. 81.
 53. Popescu L., Heyse J., Wagemans J., Wagemans C. // AIP Conf. Proc. 2009. V. 1175. P. 401.
<https://doi.org/10.1063/1.3258262>
 54. Browne J.C., Benjamin R.W., Karraker D.G. // Nucl. Sci. Eng. 1978. V. 65. P. 166.
<https://doi.org/10.13182/NSE78-A27138>
 55. White R.M., Browne J.C., Howe R.E. et al. Fission Cross Sections of ^{245}Cm // Proc. Int. Conf. on Nucl. Cross Sections for Technol. Knoxville, 1979. P. 469.
 56. Serot O., Wagemans C., Vermote S., Van Gils J. // J. Korean Phys. Soc. 2011. V. 59. № 23. P. 1896.
<https://doi.org/10.3938/jkps.59.1896>
 57. Colonna N., Tsinganisa A., Vlastou R. et al. // Eur. Phys. J. A. 2020. V. 56. P. 48.
<https://doi.org/10.1140/epja/s10050-020-00037-8>
 58. Plompen A.J.M., Cabellos O., De Saint Jean C. et al. // Eur. Phys. J. A. 2020. V. 56. P. 181.
<https://doi.org/10.1140/epja/s10050-020-00141-9>

Lead Slowing-Down Neutron Spectrometry II: Cross-Section Data for $^{243}\text{Cm}(n, f)$, $^{244}\text{Cm}(n, f)$, $^{245}\text{Cm}(n, f)$, $^{246}\text{Cm}(n, f)$, $^{247}\text{Cm}(n, f)$, $^{248}\text{Cm}(n, f)$ at Energies up to 100 keV

E. A. Koptelov*

Institute for Nuclear Research RAS, Moscow, 117312 Russia

**e-mail: koptelov@inr.ru*

The possibilities of lead slowing-down neutron spectrometry have been demonstrated. We present a review of the results of a series of works on measuring the fission cross-sections of curium isotopes ^{243}Cm , ^{244}Cm , ^{245}Cm , ^{246}Cm , ^{247}Cm , ^{248}Cm by neutrons with energies below 100 keV, performed by a joint group of researchers of INR RAS and SSC RF IPPE on the SVZ-100 neutron spectrometer. This third-generation spectrometer has a high luminosity, which made it possible to study neutron-nuclear processes in microgram samples of radioactive nuclides, which is not available in experiments using time-of-flight spectrometry. The results of work at the INR RAS–SSC RF IPPE are reflected in international nuclear databases, complement the known experimental data and in some cases indicate the need to adjust the recommended values.

Keywords: nuclear neutron fission, minor actinides, microgram radioactive samples, data from time-of-flight experiments, epithermal neutrons, databases, subbarrier fission.