Письма в ЖЭТФ, том 123, вып. 11, с. 753 – 766

Измерение сечений деления ^{239}Pu и ^{240}Pu нейтронами с энергиями 0.3–500 МэВ

А. С. Воробьев[+1)], *О. А. Щербаков*[+], *А. М. Тягельская*[+], *Н. М. Ольхович*[+], *А. Л. Барабанов*[*×], *Т. Е. Кузьмина*[°]

[+]*Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Петербургский институт ядерной физики имени Б. П. Константинова, 188300 Гатчина, Россия*

[*]*Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", 123182 Москва, Россия*

[×]*Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 115409 Москва, Россия*

[°]*Акционерное общество "Радиевый институт имени В. Г. Хлопина", 194021 С.-Петербург, Россия*

Поступила в редакцию 16 апреля 2026 г.
После переработки 28 апреля 2026 г.
Принята к публикации 28 апреля 2026 г.

В настоящей работе представлены результаты измерений сечений деления ^{239}Pu и ^{240}Pu нейтронами с энергиями 0.3–500 МэВ, выполненных на времяпролетном спектрометре нейтронного комплекса ГНЕЙС в НИЦ "Курчатовский институт" — ПИЯФ. Осколки деления регистрировались при помощи позиционно–чувствительных многопроволочных пропорциональных счетчиков низкого давления. Сечения деления ^{239}Pu(n,f) и ^{240}Pu(n,f) измерялись относительно сечения деления ^{235}U(n,f). Проведено сравнение полученных данных с результатами выполненных ранее экспериментальных работ, а также с сечениями из различных библиотек оцененных данных.

DOI: 10.7868/S3034576626060010

1. Введение. Сечение деления и угловое распределение осколков деления являются важными характеристиками процесса деления. Их совместный теоретический анализ позволяет получить подробную информацию о барьерах деления, характеристиках ядер на барьерах, энергиях переходных состояний, а также о роли предравновесных процессов во взаимодействии ядер с быстрыми нейтронами. В течение прошедшего десятилетия в НИЦ "Курчатовский институт" – ПИЯФ (г. Гатчина, Россия) на нейтронном комплексе ГНЕЙС [1, 2], действующем на базе протонного ускорителя СЦ-1000 с энергией пучка 1 ГэВ с использованием специально созданной оригинальной установки были измерены дифференциальные сечения деления целого ряда изотопов нейтронами с энергиями от 0.3 до 500 МэВ. Полученные данные обладают высокой ценностью для физики деления ядер как нейтронами, так и другими легкими частицами, поскольку существующие в этой области на сегодняшний день методы описания энергетической зависимости как сечений деления, так и угловых распределений осколков деления, в том числе опробованные нами (см., например, [3–5]), носят скорее описательный, нежели предсказательный характер.

Данные по сечениям деления обладают также высокой практической значимостью. Подробная информация об особенностях деления как ядер атомов, входящих в состав ядерного топлива, так и ядер минорных актинидов (основной компоненты ядерных отходов), необходима для совершенствования существующих реакторов и проектирования новых, более мощных и безопасных ядерных установок, в том числе основанных на использовании высокопоточных релятивистских ускорителей заряженных частиц. Подобные установки могут использоваться не только в энергетике, но и в качестве мощных источников нейтронов для проведения прикладных и фундаментальных физических исследований.

Так, например, в настоящее время существует повышенный интерес к данным по сечениям деления изотопов ^{239}Pu и ^{240}Pu [6, 7]. В частности, при проектировании реактора на быстрых нейтронах с натриевым охлаждением (SFR – the sodium-cooled fast reactor), а также реактора с приводом от ускорителя для выжигания минорных актинидов (ADMAB – the accelerator-driven minor actinide burner) [7], требуемая точность, с которой должно быть известно сече-

1)e-mail: vorobyev_as@pnpi.nrcki.ru

ние деления ^{240}Pu(n,f), составляет 2 % в интервале энергий 0.490–1.35 МэВ. При этом сравнение имеющихся в литературе экспериментальных данных обнаруживает ~ 6 % разброс. Приведенные выше целевые показатели точности являются очень жесткими. Поэтому любые попытки значительно снизить существующие погрешности сечений деления настоятельно приветствуются. Успешное продвижение в этой области повысит точность оценки интегральных параметров реакторов и, следовательно, улучшит как их экономические показатели, так и параметры безопасности.

В настоящей работе представлены результаты измерений сечений деления ядер ^{239}Pu и ^{240}Pu нейтронами с энергиями, лежащими в интервале 0.3–500 МэВ. Сечения реакций ^{239}Pu(n,f) и ^{240}Pu(n,f) измерялись последовательно на одной и той же установке, в одинаковой геометрии и при одинаковой средней интенсивности падающего нейтронного пучка. Неизменными были также измерительная система и процедура обработки данных. Идентичность условий проведения экспериментов обеспечила высокое качество полученных данных. Ранее на этой же установке в аналогичной геометрии нами были измерены сечения деления следующих ядер: ^{236}U [4], ^{243}Am [5], ^{238}U [8], ^{237}Np [9] и ^{242}Pu [10].

Кроме того, в данной работе выполнено сравнение полученных нами данных по сечениям реакций ^{239}Pu(n,f) и ^{240}Pu(n,f) как с результатами ранее выполненных экспериментов, так и оценками, представленных в библиотеках оцененных данных.

2. Эксперимент. Измерения сечений деления были произведены на пролетной базе 36.50(5) м пучка # 5 на времяпролетном спектрометре ГНЕЙС. Диаметр нейтронного пучка составлял 90 мм. Для исключения рециклических нейтронов использовался Cd фильтр толщиной 0.5 мм. Сечения деления ^{239}Pu и ^{240}Pu измерялись поочередно относительно сечения деления ядра ^{235}U.

Мишени, содержащие ядра ^{239}Pu, ^{240}Pu и ^{235}U, были изготовлены в АО “Радиевый институт им. В. Г. Хлопина” (г. Санкт-Петербург) методом “намазывания” на алюминиевые подложки толщиной 0.1 мм. Мишени ^{239}Pu и ^{240}Pu толщиной 325(16) мкг/см^2 и 153(8) мкг/см^2, соответсвенно, представляли собой круги диаметром 82 мм, а мишень ^{235}U обогащением 99.992(1) % и толщиной 203(11) мкг/см^2 – прямоугольник со сторонами 50 на 100 мм. Изотопный состав мишеней ^{239}Pu и ^{240}Pu приведен в табл. 1, а для мишени ^{235}U в работе [4]. Однородность активного слоя исследовалась путем сканирования α-активности площади мишени при помощи кремниевых полупроводниковых детекторов малого размера и составляла 10 %.

Таблица 1. Изотопный состав мишеней

		^{239}Pu	^{240}Pu
Isotope	$T_{1/2}$ (yr) [11]	Mass percentage (%)	
^{238}Pu	87.7(1)	0.063(2)	<0.0001
^{239}Pu	2.411(3)× 10^4	99.764(5)	0.6154(38)
^{240}Pu	6561(7)	0.167(4)	99.1835(62)
^{241}Pu	14.329(29)β^-	0.003(1)	0.1171(26)
^{242}Pu	3.73(2)× 10^5	0.003(1)	0.0605(35)
^{241}Am	432.6(6)		0.0235(60)

Для обеспечения идентичности условий эксперимента при измерениях сечений деления на мишенях ^{239}Pu, ^{240}Pu и ^{235}U со стороны активного слоя размещалась “маска” из алюминиевой фольги толщиной 0.1 мм с вырезанным в ней отверстием в виде круга диаметром 48.0 мм. Далее в НИЦ “Курчатовский институт” – ПИЯФ при помощи кремниевых полупроводниковых детекторов в хорошо определенной геометрии были проведены измерения полной α-активности мишеней с наложенной на них “маской”. Расчет телесного угла регистрации был выполнен с использованием метода Монте-Карло. Далее, используя данные по изотопному составу мишеней из табл. 1, пересчитанному на дату проведения эксперимента, по измеренным α-активностям были найдены массы (число ядер) основного изотопа в исследуемых мишенях. Периоды полураспада изотопов, входящих в состав мишеней, были взяты из библиотеки оцененных данных о структуре ядра ENSDF (Evaluated Nuclear Structure Data File) [11]. Статистическая точность определения масс изотопов ^{239}Pu, ^{240}Pu и ^{235}U составила 0.09, 0.08 и 0.9%, соответственно. Определенное таким образом отношение N_x/N_5 (x – индекс, обозначающий исследуемое ядро) числа ядер основного изотопа в мишенях ^{239}Pu и ^{235}U составило 1.352(19), а в мишенях ^{240}Pu и ^{235}U – 0.839(13).

Осколки деления регистрировались сборкой из двух позиционно-чувствительных многопроволочных пропорциональных счетчиков низкого давления (Multiwire Proportional Counters – MWPCs), находившейся между мишенями ^{239}Pu или ^{240}Pu (со стороны счетчика MWPC2) и ^{235}U (со стороны счетчика MWPC1) с наложенными на них “масками”. Таким образом осколки деления, испускаемые этими мишенями, регистрировались в одном и том же сеансе измерений. Вся сборка целиком помещалась в центр цилиндрической камеры диаметром 30 см с боковыми стенками толщиной 2 мм, заполненной изобутаном при давлении 8 мбар. Ось пучка нейтронов, вызывающих деление, проходила через центр цилиндрической камеры вдоль ее оси перпендикулярно плоскостям, в которых раположены электроды MWPCs (схема аналогичной установки представлена на рис. 1 в [9]). В основаниях цилиндрической камеры там, где проходит пучок нейтронов, были сделаны круглые, диаметром 20 см, входное и выходное окна из нержавеющей стали толщиной 0.5 мм.

Эффективность регистрации осколков деления, которая полностью определяется геометрией MWPCs и проницаемостью проволочных электродов, была рассчитана с использованием метода Монте-Карло ($\approx 45\%$). Взаимное влияние двух счетчиков MWPC друг на друга отсутствовало.

Поскольку нейтрон, вызывающий деление, передает импульс делящемуся ядру, измеренное угловое распределение осколков в л.с. отличается от углового распределения осколков в системе центра масс (с.ц.м.) делящегося ядра. Чтобы учесть данный эффект, измерения были выполнены при двух ориентациях установки относительно падающего пучка нейтронов. При этом для двух ориентаций флюенс нейтронов был примерно одинаков. Изменение ориентации достигалось поворотом цилиндрической камеры, в которой размещалась сборка с MWPCs, на 180° вокруг оси, проходящей через ее центр и перпендикулярной направлению движения нейтронов в пучке. Такой поворот позволяет учесть анизотропию угловых распределений осколков при определении сечения, а также позволяет свести к минимуму эффекты, связанные как с ослаблением потока нейтронов на мишенях и конструкции MWPC, так и с имеющимися незначительными неоднородностями толщины мишеней и потока нейтронов.

Система накопления данных была организована на основе двух 8-ми битовых оцифровщиков сигналов с частотой выборки 500 МГц (Acqiris DC-270). Запуск цифровых преобразователей осуществлялся при каждом сбросе протонного пучка на свинцовую мишень спектрометра ГНЕЙС. Временной диапазон оцифровки сигналов составлял 8 мкс, что соответствует энергиям нейтронов от ~ 0.1 МэВ до 1 ГэВ. В результате анализа получаемых волновых форм сигналов с анодов и катодов MWPCs для каждого события деления были определены энергия нейтрона, вызывающего деление, координаты и углы разлета регистрируемых осколков. Следует отметить, что особенности работы детектора осколков (MWPCs) и реализованная процедура отбора событий позволили надежно (с эффективностью $\approx 100\,\%$) отделять события деления от фоновых реакций, индуцированных нейтронами в подложке мишени и на других материалах детектора, а также от α-частиц и шума. Подробное описание экспериментальной установки и процедуры предварительной обработки данных представлены в наших предыдущих публикациях (см., например, [12, 13]).

3. Обработка данных. В процессе измерений сборка из двух позиционно-чувствительных детекторов, MWPC2 и MWPC1, регистрировала осколки деления из мишеней, содержащих как исследуемые ядра, ^{239}Pu или ^{240}Pu, так и ядра ^{235}U, располагавшихся по обе стороны от сборки. Для идентификации мишени, из которой вылетел регистрируемый сборкой осколок, использовалась разность $\Delta t = t_2 - t_1$ времен срабатывания детекторов MWPC2 и MWPC1: положительная величина Δt соответствует пролету осколка деления из мишени ^{235}U от MWPC1 к MWPC2, тогда как случай $\Delta t < 0$ соответствует пролету осколка деления из мишени ^{239}Pu или ^{240}Pu от MWPC2 к MWPC1. В качестве примера на рис. 1 представлены времяпролетные спектры осколков деления, полученные в одной из серий измерений. Канал с номером 500 соответствует $\Delta t = 0$. Справа и слева от этой отметки хорошо видны события, соответствующие делениям ядер ^{235}U и ^{239}Pu. При этом справа и слева события разделены на четыре группы, каждая из которых соответствует определенному интервалу углов между осью установки и направлением движения осколка.

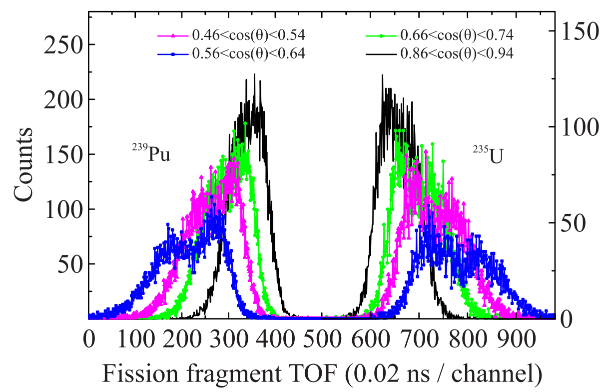

Рис. 1. (Цветной онлайн) Времяпролетный спектр осколков деления ^{235}U (справа от ~ 500 канала) и ^{239}Pu (слева от ~ 500 канала) для выделенных углов между направлением движения осколка деления и нормалью к плоскости электродов MWPCs, полученный в течение одного измерительного сеанса. Ширина канала составляет 0.02 нс

Отношение R_x сечений деления исследуемого ядра и ^{235}U (где $x = 1, 2$ – индекс, соответствующий измерениям с ^{239}Pu и ^{240}Pu) вычислялось по формуле:

$$R_x(E_n) = \frac{S_x(E_n)}{S_5(E_n)}\frac{N_5}{N_x}C_1(E_n)C_2(E_n), \qquad (1)$$

где E_n – энергия нейтрона, вызывающего деление; S_x и S_5 – сумма событий деления (после вычитания фоновых событий делений), зарегистрированных при двух ориентациях относительно направления импульса нейтронов, вызывающих деление, для исследумого ядра (^{239}Pu или ^{240}Pu) и для ^{235}U, соответственно (см. выражение (10) в [4]); C_1 – поправка на анизотропию угловых распределений осколков деления и ограниченный телесный угол регистрации; C_2 – поправка, учитывающий вклад событий деления, обусловленных примесями материала мишени; N_x/N_5 – нормировочный множитель (отношение числа ядер в исследуемых мишенях).

Доля фоновых событий деления оценивалась при помощи измеренных времяпролетных спектров с мишенями исследуемых ядер путем подсчета событий деления в 100 нс временном окне, предшествующем пику во времяпролетном спектре, который соответствовал событиям фотоделения. Это было возможным, поскольку вклад рецикличных нейтронов был полностью исключен из пучка первичных нейтронов при помощи кадмиевого фильтра. Определенный таким образом вклад фоновых событий деления был насколько малым, что в дальнейшем анализе данных не учитывался.

Величина фона спонтанных делений ядер ^{240}Pu, ^{242}Pu и ^{238}U вычиталась из измеренных распределений. Число таких спонтанных делений в мишени ^{240}Pu составляло 40(3) событий/мин и вычислялось с использованием эффективности регистрации осколков деления, изотопного состава мишени, периодов полураспада к спонтанному делению указанных ядер, взятых из библиотеки ENSDF [11], и массы ^{240}Pu, измеренной в настоящей работе с наложенной на мишень “маской”. Зависимость доли спонтанных делений от энергии нейтронов, вызывающих деление, приведена на рис. 2. Так, при энергии нейтронов вблизи 300 кэВ на спонтанное деление указанных ядер в мишени ^{240}Pu приходилось около 1 % от общего числа зарегистрированных событий деления, а при энергии нейтров выше 1 МэВ – не более 0.01 %. В случае измерений с мишенью ^{239}Pu доля спонтанных делений составляла не более 0.0001 %.

На рисунке 3 представлена рассчитанная нами зависимость поправки C_1 от энергии падающих нейтронов для измерений с мишенями ^{239}Pu и ^{240}Pu. В вычислениях, выполненных так же, как описано в работе [4], были использованы как данные по анизотропии осколков деления, ранее полученные для ^{239}Pu [14], ^{240}Pu [3] и ^{235}U [15, 4], так и данные настоящей работы, согласующиеся в пределах погрешностей с результатами прежних измерений. Величина поправки C_1 в интервале энергий нейтронов 1–500 МэВ составляет не более 1 %.

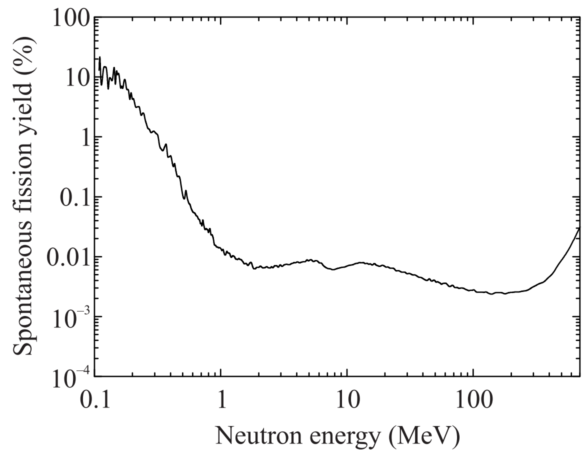

Рис. 2. Доля спонтанных делений от общего числа зарегистрированных событий деления для мишени ^{240}Pu при выбранном в данной работе энергетическом шаге

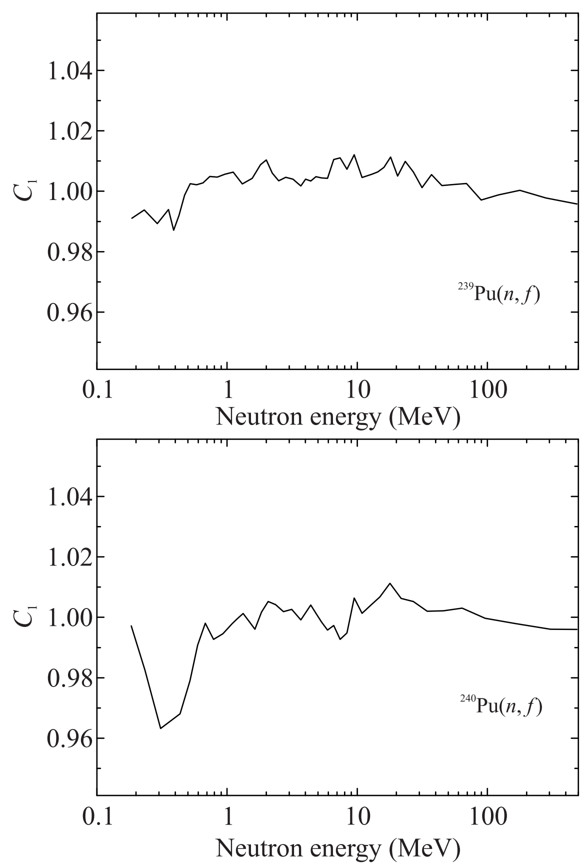

Рис. 3. Поправка, учитывающая анизотропию угловых распределений осколков деления, и ограниченный телесный угол регистрации сборки с MWPCs

В расчете поправки C_2, представленной на рис. 4, для нейтронов с энергиями ниже 20 МэВ использовались значения сечений деления ядер, входящих в состав мишеней, взятые из библиотеки ENDF/B-VIII.0 [16]. Для нейтронов с энергиями выше 20 МэВ полагалось, что отношение сечений деления ядра примеси и ядра ^{235}U является постоянным и равным значению отношения в окрестности 15 МэВ, взятому из библиотеки ENDF/B-VIII.0. Определенная таким образом поправка C_2 в интервале энергий нейтронов 1–500 МэВ составила 0.9975-0.9979 и 0.9901-0.9919 для мишеней ^{239}Pu и ^{240}Pu, соответственно.

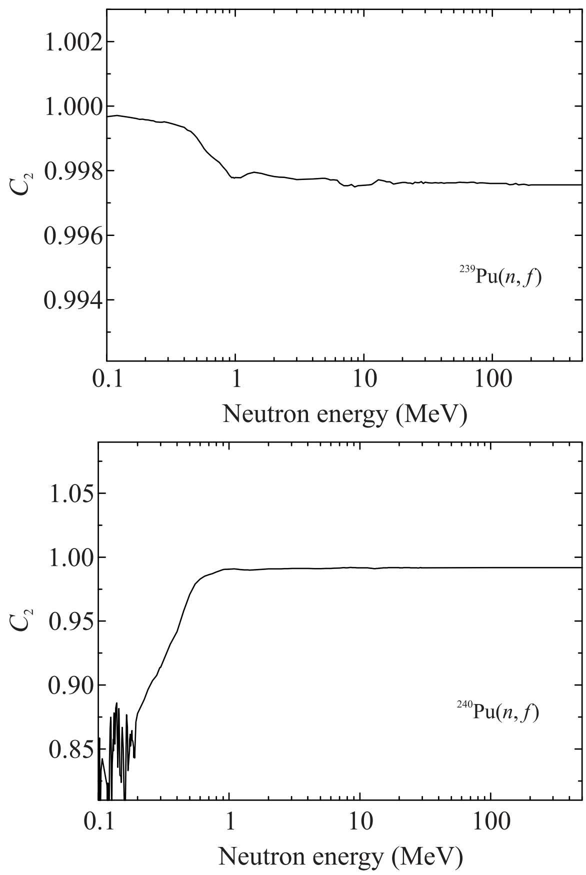

Рис. 4. Поправка, учитывающая изотопный состав мишеней

Относительные ошибки полученных в настоящей работе отношений $R_1 = \sigma_f(^{239}\text{Pu})/\sigma_f(^{235}\text{U})$ и $R_2 = \sigma_f(^{240}\text{Pu})/\sigma_f(^{235}\text{U})$ приведены в табл. 2. Можно видеть, что полная средняя систематическая ошибка измерений составляет $\sim 1.5\,\%$ и в основном определяется неопределенностью нормировочного множителя N_x/N_5.

4. Результаты по ^{239}Pu(n, f) и обсуждение. На рисунке 5 представлены результаты наших измерений отношения R_1 сечений деления ядер ^{239}Pu и ^{235}U в зависимости от энергии падающих нейтронов, а также результаты (взятые из базы данных EXFOR [17]) аналогичных измерений [18–26], выполненных методом времени пролета с использованием источников нейтронов с непрерывным спектром. Для наглядности на рис. 5 приведены только статистические ошибки экспериментальных данных. Отметим также, что авторами [25] были выполнены повторные измерения [27], в целом подтвердившие ранее полученные результаты. Поэтому новые данные на рис. 5 не представлены, тем более что статистическая погрешность новых данных ниже, чем полученная ранее.

Таблица 2. Относительные погрешности измерений отношений R_1, R_2 сечений деления ^{239}Pu, ^{240}Pu и ^{235}U

	R_1	R_2
Counting statistic	0.8 – 1.5 %	1.2 – 2.2 %
Neutron flux attenuation	<0.3 %	<0.3 %
Spontaneous fission	<0.0001 %	<0.01 %
Anisotropy	0.3 %	0.3 %
Impurities of the target	<0.01 %	<0.02 %
Effeciency (MWPCs geometry)	0.3 %	0.3 %
Normalization N_2/N_5	1.4 %	1.5 %
Total uncertainty	1.8 %	2.5 %

Почти все данные по R_1, представленные на рис. 5, за исключением результатов [21, 23], являются абсолютными и неопределенность нормировки для них составляет 1–4 %. В статье [21] были представлены предварительные результаты, нормированные в области энергий 1–10 МэВ на экспериментальные данные [28]; позднее авторы разместили в EXFOR окончательные результаты; при этом сведения о парциальных ошибках и процедуре нормировки отсутствуют. В работе [23] измеренное отношения R_1 было нормировано на отношение, взятое из библиотеки JENDL-3.2 [29].

На рисунке 5 приведено также отношение R_1 оцененных сечений деления ядер ^{239}Pu и ^{235}U нейтронами, представленых в авторитетной работе международного коллектива специалистов [30] для широкого интервала энергий падающих нейтронов, до 200 МэВ включительно. Отметим, в частности, что оценка сечения реакции ^{235}U(n, f), представленная в [30], является признанным стандартом в интервале энергий падающих нейтронов от 0.15 до 200 МэВ (неопределенность оценки в интервале энергий 0.15–20 МэВ составляет 1.3–1.5 %, а для энергий 20–200 МэВ – 1.5–4.8 %). При этом в интервале 200–1000 МэВ широко используется оценка сечения этой же реак-

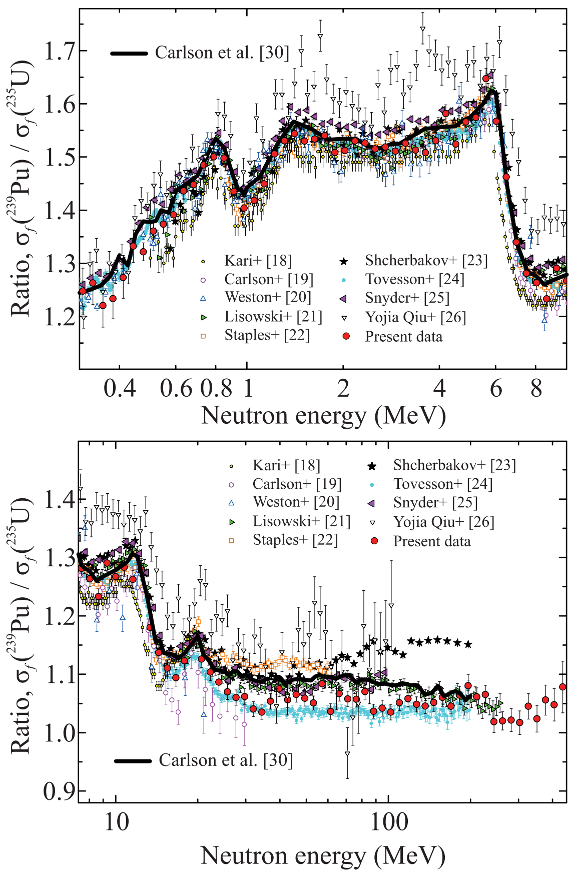

Рис. 5. (Цветной онлайн) Отношение сечений деления ^{239}Pu и ^{235}U, полученное в настоящей работе и в ранее выполненных работах с использованием метода времени пролета, в сравнении с оценкой из [30] в области энергий нейтронов ниже (сверху) и выше 10 МэВ (снизу). Приведенные на рисунке ошибки – статистические

ции, выполненная в работе [31] (неопределенность оценки 5–7 %). Заметим также, что в библиотеке ENDF/B-VIII.0 приведены оцененные сечения реакций ^{235}U(n,f) и ^{239}Pu(n,f) для нейтронов с энергией до 30 и 20 МэВ, соответственно; при этом в интервалах от 0.1 МэВ до указанных значений эти сечения практически совпадают с оценками из [30]. Поэтому в интервале 0.1–20 МэВ оценка по [30] фактически является также оценкой по ENDF/B-VIII.0.

Рисунок 5 наглядно демонстрирует, что для нейтронов с энергиями ниже 20 МэВ наши данные согласуются с большей частью результатов, полученных другими авторами, а также с оценкой из [30] (или ENDB/B-VIII.0). О расхождениях экспериментальных данных ниже 20 МэВ скажем, что в настоящее время едва ли можно установить причину значительных отклонений результатов [18] от основной части данных, которые наиболее наглядно проявляются в области энергий нейтронов, где происходит резкое изменение отношения R_1 (вблизи 6 и 11 МэВ). Авторы недавней публикации [26] отметили, что их результаты, по-видимому, не свободны от систематических ошибок, попытка улучшить ситуацию будет предпринята в повторных измерениях. Заслуживают также внимания расхождения между результатами нашего исследования и работы [25], которые наиболее заметно проявляются в области 1.5–5 МэВ и выходят за пределы заявленной авторами [25] неопределенности нормировки.

Интересно, что авторы [25] провели новую серию измерений [27] именно для того, чтобы подтвердить или опровергнуть превышение полученнного ими отношения R_1 над оценкой ENDF/B-VIII.0 ($\sim 2\,\%$). В [27] использовались хорошо охарактеризованные по составу мишени ^{239}Pu и ^{235}U; в этой работе также представлен детальный анализ возможных ошибок предыдущих и новых измерений. В результате было установлено, что новые данные практически совпадают с ранее опубликованными (см. обсуждение ниже) при том, что все они являются абсолютными. При этом учет большего числа факторов привел к увеличению полной ошибки данных, полученных в [27]. Как следствие, в пределах этой ошибки они согласуются с нашими данными.

Что же касается области выше 20 МэВ, то в отдельных энергетических интервалах расхождения между результатами различных измерений, а также с оценкой из [30], достигают 10 %, что выше полной неопределенности каждого отдельного набора экспериментальных данных. Так, например, неопределенность нормировки измеренных отношений, декларируемая авторами указанных работ, составляет: [22] – 0.7 %, [24] – 2.0 %, [25] – 0.3 %.

Сравнение отношения R_1, измеренного в настоящей работе, с оценкой из [30] и результатами работ [28, 32–41], выполненных с использованием моноэнергетических нейтронов, полученных в различных реакциях на ускорителях, приведено на рис. 6. Видно, что полученное отношение R_1 в интервале энергий нейтронов ниже ~ 2 МэВ согласуется со всеми экспериментальными данными, кроме [35]. Выше 2 МэВ имеется некоторое отличие между данными настоящей работы и [28, 36, 37, 41]. Как и в случае работ, выполненных на источниках нейтронов с непрерывным спектом (см. рис. 5), оценка из [30] (ENDF/B-VIII.0) в целом описывает экспериментальные данные.

Сечение деления ядра ^{239}Pu нейтронами, полученное нами как произведение измеренного отношения R_1 и стандарта $\sigma_f(^{235}\mathrm{U})$ [30], приведено на рис. 7 вместе с оценкой $\sigma_f(^{239}\mathrm{Pu})$ из [30], а также с

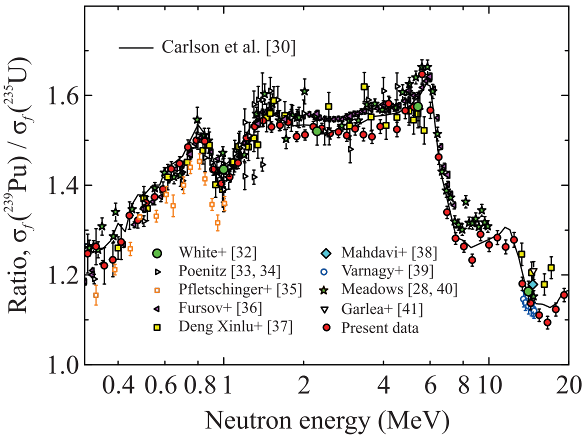

Рис. 6. (Цветной онлайн) Отношение сечений деления ^{239}Pu и ^{235}U в интервале энергий 0.3–20 МэВ. Приведенные на рисунке ошибки – статистические

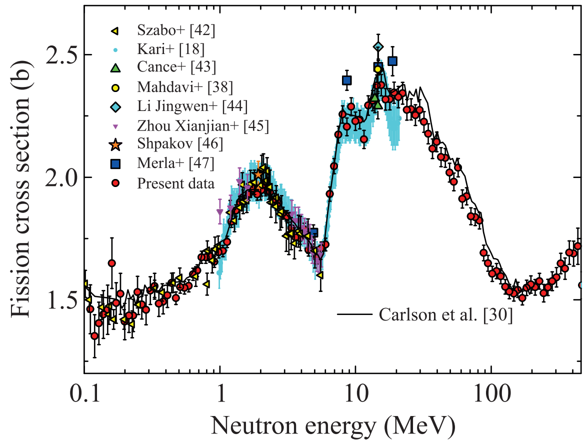

Рис. 7. (Цветной онлайн) Сечение деления ^{239}Pu(n, f), полученное в настоящей работе, в сравнении с экспериментальными данными из EXFOR. Приведенные на рисунке ошибки – полные

некоторыми экспериментальными данными, доступными в цифровом виде (EXFOR) лишь в виде сечения деления [18, 38, 42–47]. Во всех упомянутых работах, за исключением [18], измерения были выполнены с использованием моноэнергетических нейтронов, полученных в различных реакциях на ускорителях. Как говорилось выше, в [18] измерения проводились с использованием методики по времени пролета. При этом для измерения сечения деления в работах [44, 46, 47] использовался прямой метод – коррелированных во времени сопутствующих частиц, а в [43] и [42] для определения абсолютного потока нейтронов использовались метод сопутствующих частиц и BF_3-нейтронные счетчики с хорошо определенными характеристиками, соответственно. В работах [18, 45] и [38] сечение деления измерялось относительно сечения реакции ^{1}H(n, p) и ^{27}Al$(n, \alpha)^{24}$Na, ^{56}Fe$(n, p)^{56}$Mn, соответственно.

Сравнение экспериментальных данных, представленных на рис. 7, показывает, что сечение деления ^{239}Pu, полученное в настоящей работе, согласуется в пределах экспериментальных неопределенностей с данными из [18, 38, 42, 43, 45, 46]. В тоже время результаты прямых измерений [44, 47] расположены выше данных настоящей работы и оценки из [30]. Проведенный анализ данных [47] показывает, что отношение сечений деления ^{239}Pu и ^{235}U, рассчитанное по результатам прямых измерений [47], в пределах ошибок экспериментальных данных находится в хорошем согласии как с оценками из библиотек, так и с данными настоящей работы. По-видимому, в результатах [47] присутствует некоторый систематический эффект, который приводит к завышению полученных сечений и частично компенсируется при определении их отношения.

Детальное сравнение результатов настоящей работы по сечению деления ^{239}Pu и аналогичных результатов по этому же сечению, полученных из данных работ [24, 25, 27], выполненных относительно недавно, умножением R_1 на стандарт $\sigma_f(^{235}\mathrm{U})$ [30], выполнено на рис. 8. Там приведены отношения сечений ^{239}Pu к оценке этого же сечения из работы [30] в зависимости от энергии нейтронов. На рисунке 8 также представлены аналогичные отношения, полученные для сечений ^{239}Pu, взятых из библиотек оцененных данных РОСФОНД-2010 [48], JENDL-5 [49], JEFF-3.3 [50] и CENDL-3.2 [51]. Оценка из ENDF/B-VIII.0 не приводится поскольку, как говорилось выше, в интервале энергий 0.1–20 МэВ она практически совпадает с оценкой из [30].

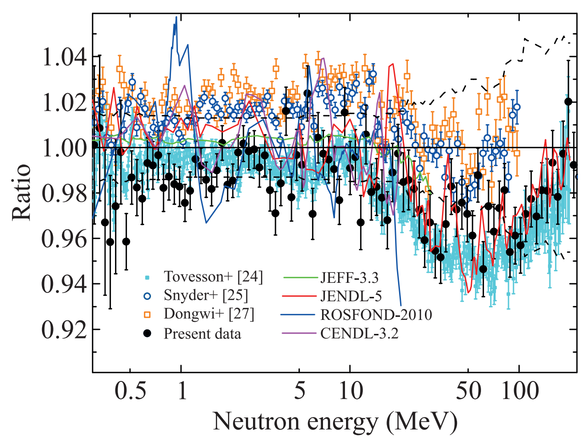

Рис. 8. (Цветной онлайн) Отношение сечения деления ^{239}Pu, полученного в работах [24, 25, 27], и оценки из [30]. Прерывистые линии относительно 1 – коридор ошибок оценки сечения деления ^{239}Pu из [30]. Приведенные на рисунке ошибки – статистические

Как можно видеть на рис. 8, сечение деления ^{239}Pu, полученное в настоящей работе, в области энергий нейтронов ниже 20 МэВ в общем согласуется с результатами оценок из библиотек РОСФОНД-2010, ENDF/B-VIII.0, JEFF-3.3, JENDL-5 и CENDL-3.2. В тоже время разброс представленных оценок достигает 2–5 %. Также можно отметить, что форма энергетической зависимости сечения, полученная в настоящей работе, согласуется с результатами работ [24, 25, 27] и с оценкой из JENDL-5 во всем исследованном интервале энергий, но отличается от оценки из [30]. Наблюдающееся отклонение от оценки из [30] достигает своего максимального значения 3–5 % в интервале энергий 20–150 МэВ.

5. Результаты по ^{240}Pu(n, f) и обсуждение. Результаты измерений отношения R_2 сечений деления ядер ^{240}Pu и ^{235}U, полученные в настоящей работе, приведены на рис. 9 вместе с результатами экспериментальных работ [18, 20, 22, 52–54], выполненных в широком интервале энергий на различных источниках нейтронов с использованием методики по времени пролета. Там же приведена оценка R_2 из библиотеки JENDL-5, в которой сечения деления представлены в интервале энергий нейтронов до 200 МэВ. Отдельно отметим, что в очень широком интервале энергий нейтронов от 1 эВ до 200 МэВ отношение R_2 было также измерено в работе [55]. Однако ни в самой работе [55], ни в EXFOR нет цифровых данных по измеренному отношению, а есть только данные по сечению деления ^{240}Pu, полученному авторами указанной работы в результате сложной процедуры нормировки из измеренного отношения. При этом неопределенность нормировки полученного сечения составила ~ 3 %. Соответственно результаты работы [55] представлены ниже вместе с другими данными по энергетической зависимости сечения реакции ^{240}Pu(n, f).

Полученное в настоящей работе отношение в целом согласуется во всем исследованном диапазоне энергий нейтронов как с оценкой из библиотеки JENDL-5, так и с результатами приведенных работ как по абсолютному значению, так и по форме. Отметим, что в работах [18, 53] имеренное отношение нормировалось на библиотечные данные. В [18] нормировка была выполнена в интервале энергий нейтронов вблизи 14 МэВ на значение 1.035, а в работе [53] – на оценку из библиотеки ENDF/B-VII.0 для трех интервалов энергий: вблизи 1, 5 и 10 МэВ. Поскольку в EXFOR результаты работы [20] представлены в виде отношений сечений деления ^{240}Pu/^{239}Pu и ^{239}Pu/^{235}U, на рис. 9 приведены точки, полученные как произведение указанных отношений. При этом в работе [20] указывается, что в этом случае неопределенность нормировки составляет 2.1 %.

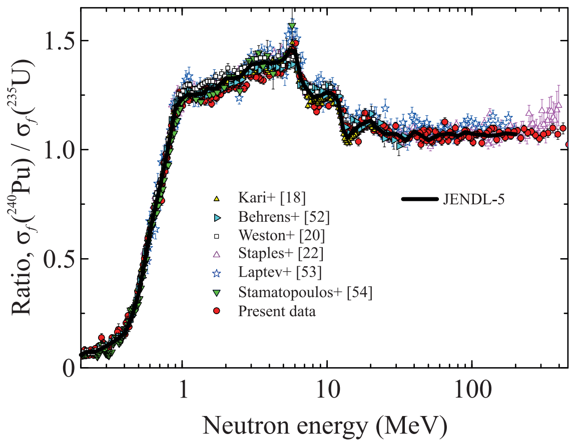

Рис. 9. (Цветной онлайн) Отношение сечений деления ^{240}Pu и ^{235}U, полученное в настоящей работе и в ранее выполненных работах с использованием метода времени пролета. Приведенные на рисунке ошибки – статистические

Сравнение отношения R_2, измеренного в настоящей работе, с оценкой из JENDL-5 и результатами работ [28, 32, 56–59], выполненных с использованием моноэнергетических нейтронов, полученных в различных реакциях на ускорителях, приведено на рис. 10. Наблюдающееся между экспериментальными данными расхождение по абсолютному значению находится в пределах неопределенности экспериментальных данных. Форма полученного в настоящей работе отношения хорошо согласуется с результатами [57].

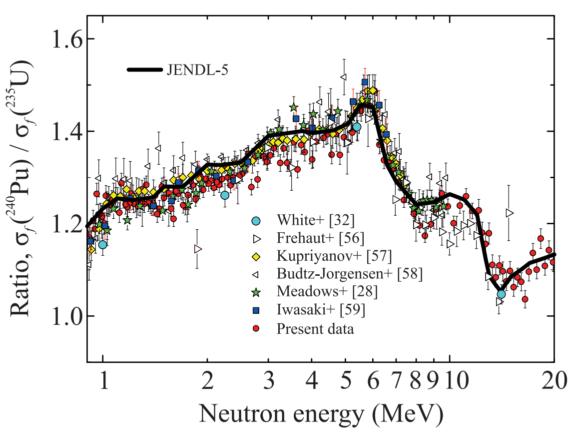

Рис. 10. (Цветной онлайн) Отношение сечений деления ^{240}Pu и ^{235}U в интервале энергий нейтронов 1–20 МэВ. Приведенные на рисунке ошибки – статистические

Сечение деления ^{240}Pu(n,f), полученное как произведение измеренного нами отношения R_2 и стандарта $\sigma_f(^{235}\mathrm{U})$, приведено на рис. 11 вместе с оценками из библиотек РОСФОНД-2010, ENDF/B-VIII.0, JENDL-5 и JEFF-3.3, а также с некоторыми экспериментальными данными, взятыми из EXFOR.

В области энергий нейтронов выше 1 МэВ (верхняя часть рис. 11) выполнено сравнение с результатами работ [55, 60–63], предствленными в EXFOR в виде сечения деления ^{240}Pu. При этом измерения [55] были выполнены на источнике нейтронов с непрерывным спектром с использованием метода времени пролета, а во всех остальных представленных работах – с использованием моноэнергетических нейтронов. Можно видеть, что в пределах полных ошибок измерений имеется согласие между результатами настоящей работы и всеми представленными даными. Отметим, что в указанных работах сечение деления ^{240}Pu измерялось относительно сечения реакции: ^{1}H(n,p) [60, 63], ^{27}Al$(n,\alpha)^{24}$Na [61], ^{235}U [55], ^{238}U(n,f) [63]. В работе [60] измерения также проводились с использованием BF_3-счетчиков, а в [62] сечение деления ^{240}Pu было получено в результате усреднения измеренных отношений сечений деления ^{240}Pu/^{235}U, ^{240}Pu/^{238}U и ^{240}Pu/^{237}Np.

Полученное сечение деления ^{240}Pu(n,f) для энергий нейтронов выше 1 МэВ также согласуется с оценками ENDF/B-VIII.0, JENDL-5, РОСФОНД-2010. Тем не менее, между оценками имеется некоторое отличие. Так, оценка из ENDF/B-VIII.0 дает в среднем большее на $\sim 2\,\%$ значение, чем оценка JENDL-5. Оценка JEFF-3.3 в области энергий нейтронов 1–6 МэВ дает в среднем завышенное значение, а для энергий выше 6 МэВ – проходит существенно ниже экспериментальных данных и других оценок.

На рисунке 11 (нижняя часть) выполнено сравнение данных настоящей работы для ^{240}Pu с результатами некоторых упомянутых выше работ [28, 52, 54, 55, 57, 58, 62], в которых выполнены детальные измерения в области энергий нейтронов 0.3–1 МэВ. Поскольку в EXFOR результаты работ [28, 52, 54, 57, 58] представлены в виде отношения сечений деления ^{240}Pu и ^{235}U, на рис. 11 приводится экспериментальное отношение из этих работ, умноженное на стандарт $\sigma_f(^{235}\mathrm{U})$ [30]. Видно, что оценка из РОСФОНД-2010, с которой практически совпадает оценка JENDL-5, лучше описывает экспериментальные данные, тогда как оценка ENDF/B-VIII.0 дает большее на $\sim 4\,\%$ значение в интервале энергий нейтронов 0.5–0.9 МэВ и следует данным [55], а оценка JEFF-3.3 демонстрирует некоторые структуры в

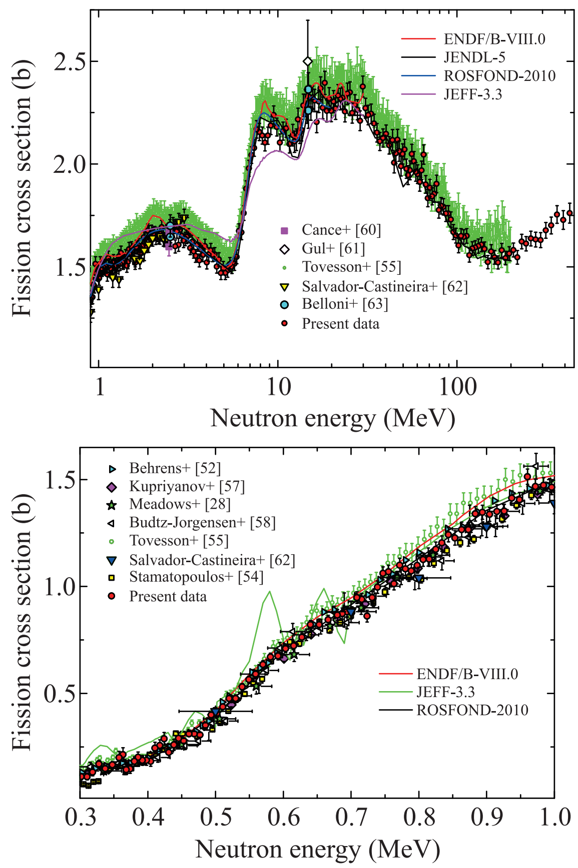

Рис. 11. (Цветной онлайн) Сечение деления ^{240}Pu(n,f), полученное в настоящей работе, в сравнении с экспериментальными данными других авторов для энергий нейтронов выше (вверху) и ниже 1 МэВ (внизу). Приведенные на рисунке ошибки – полные

сечении деления ^{240}Pu, которые не подтверждаются экспериментальными данными.

Отметим, что в даной работе, как и в наших предыдущих [4, 5, 8–10], при проведении измерений отношений сечения деления исследуемых ядер и ядер ^{235}U использовалась одна и та же мишень ^{235}U. Это позволило нам оценить возможное влияние точности определения числа ядер ^{235}U в мишени на измеренные сечения. Для этого мы рассчитали отношения сечений деления из библиотеки ENDF/B-VIII.0 и измеренных нами сечений деления ядер ^{236}U, ^{238}U, ^{237}Np, ^{239}Pu, ^{240}Pu и ^{243}Am в интервале энергии 2–5 МэВ. Сечение деления ^{242}Pu [10] не использовалось, так как его оценка из библиотеки ENDF/B-VIII.0 завышена относительно экспериментальных данных и, по-видимому, в скором времени будет пересмотрена. В результате установлено, что измеренные нами сечения в среднем лишь на $0.8\,\%$ меньше оценок из ENDF/B-VIII.0. Это среднее отклонение находится в пределах неопределенности, с которой было измерено число ядер ^{235}U. Поэтому мы полагаем, что число ядер ^{235}U в использовавшейся нами мишени было определено с достаточной точностью, не требующей пересмотра.

6. Заключение. На нейтронном времяпролетном спектрометре ГНЕЙС в НИЦ "Курчатовский институт" – ПИЯФ проведены измерения сечения деления ^{239}Pu(n, f) и ^{240}Pu(n, f) в диапазоне энергий нейтронов 0.3–500 МэВ. Сечение деления исследуемых ядер измерялось относительно сечения деления ^{235}U(n, f). Неопределенность полученных данных составила 2–3 %.

В целом полученные нами данные согласуются с результатами, полученными другими авторами с использованием различных экспериментальных методик и источников нейтронов, что свидетельствует о надежности использованного метода измерений и точности полученных в настоящей работе результатов.

Отметим, что в области энергий нейтронов выше 200 МэВ имеющиеся в литературе экспериментальные данные по сечениям деления ограничиваются результатами, представленными в работах [21] для ^{239}Pu (до 300 МэВ) и [22] для ^{240}Pu (до 400 МэВ). Соответственно результаты, полученные в настоящем исследовании для ^{239}Pu(^{240}Pu), на сегодняшний день являются единственными в интервале энергий от 300(400) до 500 МэВ. При этом под сечением деления всюду в этой статье подразумевается полное сечение деления, включающее в себя не только сечения процессов (n, f), $(n, n'f)$, (n, xnf) и т.д., но и, при энергиях выше 200 МэВ, процессы $(n, xn\pi f)$ и т.д., т.е. сечения деления ядер, образующихся после испускания π-мезонов.

Полученное в данной работе сечение деления ^{239}Pu в области энергий нейтронов ниже 20 МэВ, в целом согласуется с результатами оценок из библиотек РОСФОНД-2010, ENDF/B-VIII.0, JEFF-3.3, JENDL-5 и CENDL-3.2. При этом разброс оценок составляет 2–5 %. Также можно отметить, что форма энергетической зависимости сечения деления ^{239}Pu, полученная в настоящей работе, согласуется с результатами других экспериментальных работ [24, 25, 27], выполненных в последнее время, и с оценкой из JENDL-5 во всем исследованном интервале энергий, но отличается от оценки [30]. Оценка [30] дает завышенное на 3–5 % значение в интервале энергий 20–150 МэВ и поэтому требуется ее уточнение.

Сравнение данных настоящей работы для ^{240}Pu с результатами оценок показывает, что оценка из РОСФОНД-2010, с которой практически совпадает оценка JENDL-5, лучше описывает экспериментальные данные, тогда как оценка ENDF/B-VIII.0 дает в среднем большее на ~ 2 % значение для энергий нейтронов выше 1 МэВ, а в интервале энергий 0.5–0.9 МэВ, важном с точки зрения проектирования новых быстрых реакторов и реакторов с приводом от ускорителя, – на ~ 4 %. В то же время оценка JEFF-3.3 дает неправильный ход энергетической зависимости сечения деления ^{240}Pu. Так в области энергий нейтронов 1–6 МэВ данная оценка дает в среднем завышенное значение, выше 6 МэВ – проходит существенно ниже экспериментальных данных и других оценок, а в интервале энергий ниже 1 МэВ демонстрирует некоторые структуры в сечении деления ^{240}Pu, которые не подтверждаются экспериментальными данными. Таким образом оценки сечения деления ^{240}Pu из библиотек ENDF/B-VIII.0 и JEFF-3.3, по-видимому, должны быть пересмотрены.

Авторы выражают искреннюю благодарность Е. М. Иванову и всему персоналу Ускорительного отдела НИЦ "Курчатовский институт" – ПИЯФ за постоянную дружескую поддержку и стабильную работу синхроциклотрона во время проведения эксперимента, а также Л. С. Фалеву за помощь при создании экспериментальной установки и выполнении эксперимента.

Финансирование работы. Данная работа финансировалась за счет средств бюджета "Петербургского института ядерной физики им. Б. П. Константинова Национального исследовательского центра "Курчатовский институт".

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

---

1. O. A. Shcherbakov, A. S. Vorobyev, A. M. Gagarski, L. A. Vaishnene, E. M. Ivanov, V. S. Anashin, L. R. Bakirov, and A. E. Koziukov, "ISNP/GNEIS facility in Gatchina for neutron testing with atmospheric-like spectrum", IEEE Trans. Nucl. Sci. **63**(4), 2152 (2016).
2. О. А. Щербаков, А. С. Воробьев, Е. М. Иванов, "Испарительный источник нейтронов ГНЕЙС", Физика элементарных частиц и атомного ядра (ЭЧАЯ) **49**(1), 137 (2018) [O. A. Shcherbakov, A. S. Vorobyev, and E. M. Ivanov, "Spallation neutron source GNEIS", Phys. Part. Nuclei **49**, 81 (2018)].
3. А. С. Воробьев, А. М. Гагарский, О. А.Щербаков, Л. А. Вайшнене, А. Л. Барабанов, "Измерение угловых распределений осколков деления ^{240}Pu нейтронами с энергиями 1–200 МэВ и их модельный анализ", Письма в ЖЭТФ **112**(6), 343 (2020) [A. S. Vorobyev, A. M. Gagarski, O. A. Shcherbakov, L. A. Vaishnene, and A. L. Barabanov, "Measurement of the angular distributions of fission fragments from

neutron-induced fission of ^{240}Pu in energy range 1–200 MeV and their model analysis", JETP Lett. **112**(6), 323 (2020)].

4. A. S. Vorobyev, A. M. Gagarski, O. A. Shcherbakov, L. A. Vaishnene, A. L. Barabanov, and T. E. Kuz'mina, "Measurement of the ^{236}U fission cross section and angular distributions of fragments from fission of ^{235}U and ^{236}U in the neutron-energy range of 0.3–500 MeV", Phys. Rev. C **108**, 014621 (2023).
5. A. S. Vorobyev, A. M. Gagarski, O. A. Shcherbakov, L. A. Vaishnene, and A. L. Barabanov, "Measurement of the neutron-induced fission cross section of ^{243}Am relative to ^{235}U in the neutron energy range of 0.3–500 MeV and its analysis", Eur. Phys. J. A **60**, 117 (2024).
6. NEA Nuclear Data High Priority Request List – HPRL. https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_68746/hprlapp.
7. Uncertainty and target accuracy assessment for innovative system using recent covariance data evaluations, Nuclear Science/WPEC-26, NEA # 6410. OECD-NEA, 2008; ISBN 978-92-64-99053-1.
8. А. С. Воробьев, А. М. Гагарский, О. А. Щербаков, Л. А. Вайшнене, А. Л. Барабанов, "Измерение сечения деления ядер ^{238}U нейтронами с энергиями 0.3–500", Письма в ЖЭТФ **117**(8), 561 (2023) [A. S. Vorobyev, A. M. Gagarski, O. A. Shcherbakov, L. A. Vaishnene, and A. L. Barabanov, "Measurement of the cross section for the neutron-induced fission of ^{238}U nuclei in the energy range of 0.3–500 MeV", JETP Lett. **117**(8), 557 (2023)].
9. А. С. Воробьев, А. М. Гагарский, О. А. Щербаков, Л. А. Вайшнене, А. М. Тягельская, Н. М. Ольхович, А. Л. Барабанов, "Измерение сечения деления ядер ^{237}Np нейтронами с энергиями 0.3–500 МэВ", Письма в ЖЭТФ **120**(6), 385 (2024) [A. S. Vorobyev, A. M. Gagarski, O. A. Shcherbakov, L. A. Vaishnene, A. M. Tyagelskaya, N. M. Olkhovich, and A. L. Barabanov, "Measurement of the cross section for neutron-induced fission of ^{237}Np nuclei in the energy range of 0.3–500 MeV", JETP Lett. **120**(6), 373 (2024)].
10. А. С. Воробьев, А. М. Гагарский, О. А. Щербаков, Л. А. Вайшнене, А. М. Тягельская, Н. М. Ольхович, А. Л. Барабанов, Т. Е. Кузьмина, "Измерение анизотропии угловых распределений осколков и сечения деления ^{242}Pu нейтронами с энергиями 0.3–500 МэВ", Письма в ЖЭТФ **121**(7), 525 (2025) [A. S. Vorobyev, A. M. Gagarski, O. A. Shcherbakov, L. A. Vaishnene, A. M. Tiagelskaia, N. M. Olkhovich, A. L. Barabanov, and T. E. Kuz'mina, "Measurement of the anisotropy of the angular distributions of fragments and the cross section for the neutron-induced fission of ^{242}Pu nuclei in the energy range of 0.3–500 MeV", JETP Lett. **121**(7), 497 (2025)].
11. Evaluated Nuclear Structure Data File, https://www.nndc.bnl.gov/ensdf.
12. А. С. Воробьев, А. М. Гагарский, О. А. Щербаков, Л. А. Вайшнене, А. Л. Барабанов, "Угловые распределения и анизотропия осколков деления ^{233}U и ^{209}Bi, индуцированного нейтронами промежуточных энергий 1–200 МэВ", Письма в ЖЭТФ **104**(6), 377 (2016) [A. S. Vorobyev, A. M. Gagarski, O. A. Shcherbakov, L. A. Vaishnene, and A. L. Barabanov, "Angular distributions and anisotropy of the fragments from neutron-induced fission of ^{233}U and ^{209}Bi", JETP Lett. **104**(6), 365 (2016)].
13. А. С. Воробьев, А. М. Гагарский, О. А. Щербаков, Л. А. Вайшнене, А. Л. Барабанов, "Угловые распределения и анизотропия осколков деления ^{239}Pu и ^{nat}Pb нейтронами промежуточных энергий 1–200 МэВ", Письма в ЖЭТФ **107**(9), 547 (2018) [A. S. Vorobyev, A. M. Gagarski, O. A. Shcherbakov, L. A. Vaishnene, and A. L. Barabanov, "Angular Distributions and Anisotropy of the Fragments from Neutron-Induced Fission of ^{239}Pu and ^{nat}Pb in the Energy Range of 1–200 MeV", JETP Lett. **107**(9), 521 (2018)].
14. A. S. Vorobyev, A. M. Gagarski, O. A. Shcherbakov, L. A. Vaishnene, T. E. Kuz'mina, and A. L. Barabanov, "Angular distributions and anisotropy of fission fragments from neutron-induced fission of ^{239}Pu, ^{237}Np and ^{nat}Pb in energy range 1–200 MeV", EPJ Web Conf. **239**, 05007 (2020).
15. А. С. Воробьев, А. М. Гагарский, О. А. Щербаков, Л. А. Вайшнене, А. Л. Барабанов, "Anisotropy of the fission fragments from neutron-induced fission in intermediate energy range 1–200 MeV", Письма в ЖЭТФ **102**(3–4), 231 (2015) [A. S. Vorobyev, A. M. Gagarski, O. A. Shcherbakov, L. A. Vaishnene, and A. L. Barabanov, "Anisotropy of the fission fragments from neutron-induced fission in intermediate energy range 1–200 MeV", JETP Lett. **102**(4), 203 (2015)].
16. D. A. Brown, M. B. Chadwick, R. Capote et al. (Collaboration), "ENDF/B-VIII.0: The 8th major release of the nuclear reaction data library with CIELO-project cross sections, new standards and thermal scattered data", Nuclear Data Sheets **148**, 1 (2018).
17. N. Otuka, E. Dupont, V. Semkova et al. (Collaboration), "Towards a more complete and accurate experimental nuclear reaction data library (EXFOR): international collaboration between Nuclear Reaction Data Centres (NRDC)", Nuclear Data Sheets **120**, 272 (2014); https://www-nds.iaea.org/exfor/.
18. K. Kari and S. Cierjacks, "Measurement of the ^{239}Pu and ^{240}Pu fission cross-sections relative to the ^{235}U fission cross-section and the scattering cross-section H(n,p) in the neutron energy range from 0.5–20 MeV", IAEA Report. # INDC(Ger)-20/L (1978), p. 6; EXFOR 20786004, 20786005.

19. G. W. Carlson and J. W. Behrens, "Measurement of the fission cross sections of Uranium-233 and Plutonium-239 relative to uranium-235 from 1 keV to 30 MeV", Nucl. Sci. Eng. **66**, 205 (1978); EXFOR 10562002.
20. L. W. Weston and J. H. Todd, "Neutron fission cross section of ^{239}Pu and ^{240}Pu relative to the ^{235}U", Nucl. Sci. Eng. **84**, 248 (1983); EXFOR 12766002 (^{239}Pu), 12766003 (^{240}Pu).
21. P. W. Lisowski, J. L. Ullmann, S. J. Balestrini, A. D. Carlson, O. A. Wasson, and N. W. Hill, "Neutron induced fission cross section ratios for ^{232}Th, ^{235,238}U, ^{237}Np and ^{239}Pu from 1 to 400 MeV", in Proc. Int. Conf. Nuclear Data for Science and Technology, Mito, Japan, May 30–June 3, 1988 (Saikon Publishing Company Limited, Japan, 1988) p. 97; EXFOR 14016004.
22. P. Staples and K. Morley, "Neutron-induced fission cross-section ratios for ^{239}Pu, ^{240}Pu, ^{242}Pu and ^{244}Pu relative to ^{235}U from 0.5 to 400 MeV", Nucl. Sci. Eng. **129**, 149 (1998); EXFOR 13801002 (^{239}Pu), 13801003 (^{240}Pu).
23. O. Shcherbakov, A. Donets, A. Evdokimov, A. Fomichev, T. Fukahori, A. Hasegawa, A. Laptev, V. Maslov, G. Petrov, S. Soloviev, Yu. Tuboltsev, and A. Vorobyev, "Neutron-induced fission of ^{233}U, ^{238}U, ^{232}Th, ^{239}Pu, ^{237}Np, ^{nat}Pb and ^{209}Bi relative to ^{235}U in the energy range 1–200 MeV", J. Nucl. Sci. Technol. **39**, Suppl. 2, 230 (2002); EXFOR 41455005.
24. F. Tovesson and T. S. Hill, "Cross sections for ^{239}Pu(n,f) and ^{241}Pu(n,f) in the range En = 0.01 eV to 200 MeV", Nucl. Sci. Eng. **165**, 224 (2010); EXFOR 14271003.
25. L. Snyder, M. Anastasiou, N.S. Bowden et al. (Collaboration), "Measurement of the ^{239}Pu(n,f)/^{235}U(n,f) cross-section ratio with the NIFFTE fission Time Projection Chamber", Nuclear Data Sheets **178**, 1 (2021); EXFOR 14721002.
26. Y. Qiu, Ch. Lan, Y. Chen et al. (Collaboration), "Measurement of the ^{239}Pu(n,f) cross section from 4 keV to 100 MeV using the white neutron source at the CSNS Back-n facility", Phys. Rev. C **107**, 024606 (2023); EXFOR 32894002.
27. D. H. Dongwi, L. Snyder, V. Aguilar et al. (Collaboration), "Remeasurement of the ^{239}Pu(n,f)/^{235}U(n,f) cross-section ratio with the NIFFTE fission Time Projection Chamber using vapor-deposited targets", Nuclear Data Sheets **202**, 30 (2025); EXFOR 14851002.
28. J. W. Meadows, "The fission cross sections of some Thorium, Uranium, Neptunium and Plutonium isotopes relative to ^{235}U", Argonne National Laboratory, Report # ANL/NDM-83 (Argonne, Illinois 60439, USA, 1983), 64 p.; EXFOR 10734003 (^{239}Pu), 12714002 (^{240}Pu).
29. T. Nakagawa, K. Shibata, S. Chiba et al. (Collaboration), "Japanese evaluated nuclear data library Version 3 Revision-2: JENDL-3.2", J. Nucl. Sci. Technol. **32**(12), 1259 (1995).
30. A. D. Carlson, V. G. Pronyaev, R. Capote et al. (Collaboration), "Evaluation of the neutron data standards", Nuclear Data Sheets **148**, 143 (2018).
31. B. Marcinkevicius, S. Simakov, and V. Pronyaev, "^{209}Bi(n,f) and ^{nat}Pb(n,f) cross section as a new reference and extension of the ^{235}U, ^{238}U and ^{239}Pu(n,f) standards up to 1 GeV", IAEA Report # INDC(NDS)-0681 (IAEA, 2015); https://nds.iaea.org/standards/.
32. P. H. White and G. P. Warner, "The fission cross sections of ^{233}U, ^{234}U, ^{236}U, ^{238}U, ^{237}Np, ^{239}Pu and ^{241}Pu relative to that of ^{235}U for neutrons in the energy range 1–14 MeV", J. Nucl. Energy **21**, 671 (1967); EXFOR 21195007.
33. W. P. Poenitz, "Measurement of the ratios of capture and fission neutron cross sections of ^{235}U, ^{238}U, and ^{239}Pu at 130 to 1400 keV", Nucl. Sci. Eng. **40**, 383 (1970); EXFOR 10086008.
34. W. P. Poenitz, "'Additional measurements of the ratio of the fission cross sections of Plutonium-239 and Uranium-235", Nucl. Sci. Eng. **47**, 228 (1972); EXFOR 10253002.
35. E. Pfletschinger and F. Kaeppeler, "A measurement of the fission cross sections of ^{239}Pu and ^{233}U relative to ^{235}U", Nucl. Sci. Eng. **40**, 375 (1970); EXFOR 20363003.
36. Б. И. Фурсов, В. М. Куприянов, В. И. Иванов, Г. Н. Смиренкин, "Измерение отношения сечений деления ^{239}Pu и ^{235}U нейтронами 0.024–7.4 МэВ", Атомная энергия **43**, 261 (1977) [B. I. Fursov, V. M. Kupriyanov, V. I. Ivanov, and G. N. Smirenkin, "Measurement of the ratio of the ^{239}Pu and ^{235}U fission cross sections for 0.024–7.4 MeV neutrons", At. Energy **43**, 894 (1977)]; EXFOR 40824003.
37. D. Xinlu, Y. Wuguang, Zh. Xianjian, Y. Zongyuan, W. Jingxia, R. Chaofan, Y. Hanrong, Y. Chuntang, and Zh. Huiming, "Measurement of ^{239}Pu(n,f)/^{235}U(n,f) cross section ratio at the fast neutron energy region", Atomic Energy Science and Technology **15**, 12 (1981); EXFOR 32724002.
38. M. Mahdavi, G. F. Knoll, and J. C. Robertson, "Measurements of the 14 MeV fission cross-sections for ^{235}U and ^{239}Pu", in Proc. Int. Conf. Nuclear Data for Science and Technology, Antwerpen, Belgium, 6-10 September, 1982 (Springer, Dordrecht, 1983), p. 58; EXFOR 12826003, 12826004.
39. M. Varnagy and J. Csikai, "A new approach to measuring fission cross-section ratios", Nucl. Instr. and Meth. **196**, 465 (1982); EXFOR 30588005.
40. J. W. Meadows, "The fission cross sections of ^{230}Th, ^{232}Th, ^{233}U, ^{234}U, ^{236}U, ^{238}U, ^{237}Np, ^{239}Pu and ^{242}Pu relative to ^{235}U at 14.74 MeV neutron energy", Ann. Nucl. Energy **15**, 421 (1988); EXFOR 13134009.
41. I. Garlea, C. Miron, D. Dobrea, C. Roth, T. Musat, and H. N. Rosu, "Measuring of the integral cross sections at 14 MeV, for reactions ^{115}In(n,n), ^{197}Au(n,2n), ^{98}Nb(n,2n), ^{27}Al(n,α), ^{56}Fe(n,p), ^{239}Pu(n,f), ^{238}U(n,f),

^{232}Th(n,f) and ^{237}Np(n,f)", Rev. Roum. Physique **9**, 421 (1984); EXFOR 30813014.

42. I. Szabo and J.P. Marquette, "Measurement of the neutron induced fission cross sections of Uranium 235 and Plutonium 239 in the MeV energy range", Argonne National Laboratory, Report # ANL-76-90 (Argonne, Illinois 60439, USA, 1976), p. 208; EXFOR 20567003, 20570003, 20618003.
43. M. Cance and G. Grenier, "Absolute neutron fission cross sections of ^{235}U, ^{238}U, and ^{239}Pu at 13.9 and 14.6 MeV", Nucl. Sci. Eng. **68**, 197 (1978); EXFOR 20779006.
44. L. Jingwen, L. Anli, R. Chaofan, Y. Zhongyuan, W. Jingxia, and H. Xiuhong, "Absolute measurements of ^{235}U and ^{239}Pu fission cross section induced by 14.7 MeV neutrons", in Proc. Int. Conf. Nuclear Data for Science and Technology, Antwerpen, Belgium, 6–10 September, 1982 (Springer, Dordrecht, 1983), p. 55; EXFOR 30634003.
45. Zh. Xianjian, Y. Wuguang, Zh. Huiming, D. Xinlu, R. Chaofan, W. Jingxia, S. Zhongfa, Y. Zhongyuan, and Zh. Shuhua, "Fast neutron induced fission cross section for ^{239}Pu", in Proc. Int. Conf. Nuclear Data for Science and Technology, Antwerpen, Belgium, 6–10 September, 1982 (Springer, Dordrecht, 1983), p. 36; EXFOR 30670002.
46. В. И. Шпаков, "Абсолютные измерения сечений деления важнейших нуклидов", ВАНТ, Сер.: Ядерные константы **4**, 19 (1986) [V. I. Shpakov, "Absolute measurements of the fission cross-sections for important nuclides", IAEA Report. No. INDC(CCP)-302/L (IAEA, 1989), p. 33]; EXFOR 40927006.
47. K. Merla, P. Hausch, C.M. Herbach, G. Musiol, G. Pausch, U. Todt, L.V. Drapchinskiy, V.A. Kalinin, and V.I. Shpakov, "Absolute measurements of neutron induced fission cross-sections of ^{235}U, ^{238}U, ^{237}Np and ^{239}Pu using the time correlated associated particle method (TCAPM)", in Proc. Inter. Conf. Nuclear Data for Science and Technology, Juelich, Germany, May 13–17, 1991 (Springer-Verlag, Germany, 1992), p. 510; EXFOR 22304005, 22304009.
48. С. В. Забродская, А. В. Игнатюк, В. Н. Кощеев, В. Н. Манохин, М. Н. Николаев, В. Г. Проняев, "РОСФОНД – Российская национальная библиотека оцененных нейтронных данных", ВАНТ, Сер.: Ядерные константы **1–2**, 3 (2007) [S. V. Zabrodskaya, A. V. Ignatyuk, V. N. Koscheev, V. N. Manohin, M. N. Nikolaev, and V. G. Pronyaev, "RUSFOND – Russian national library of evaluated neutron data", Vopr. At. Nauki Tekh., Ser.: Yadernye Konstanty **1–2**, 3 (2007)]; https://www-nds.iaea.org/exfor/endf.htm.
49. O. Iwamoto, N. Iwamoto, S. Kunieda et al. (Collaboration), "Japanese evaluated nuclear data library version 5: JENDL-5", J. Nucl. Sci. Technol. **60**(1), 1 (2023); https://www-nds.iaea.org/exfor/endf.htm.
50. OECD and NEA, The Joint Evaluated Fission and Fusion File JEFF, Version 3.3 (OECD-NEA, Paris, 2018); https://www.oecd-nea.org/dbdata/jeff/jeff33/.
51. Zh. Ge, R. Xu, H. Wu, et al. (Collaboration), "CENDL-3.2: The new version of Chinese general purpose evaluated nuclear data library", EPJ Web Conf. **239**, 09001 (2020); https://www-nds.iaea.org/exfor/endf.htm.
52. J.W. Behrens, R.S. Newbury, and J.W. Magana, "Measurements of the Neutron-Induced Fission Cross Sections of ^{240}Pu, ^{242}Pu, and ^{244}Pu Relative to ^{235}U from 0.1 to 30 MeV", Nuc. Sci. Eng. **66**, 433 (1978); EXFOR 10597002.
53. A.B. Laptev, O.A. Shcherbakov, A.S. Vorobyev, R.C. Haight, and A.D. Carlson, "Fast neutron-induced fission of some actinides and sub-actinides", in Proc. Int. Conf. Fission and Properties of Neutron-Rich Nuclei, Sanibel Island, USA, November 11–17, 2007 (World Scientific, Singapore, 2008), p. 462; EXFOR 41487014.
54. A. Stamatopoulos, A. Tsinganis, N. Colonna et al. (Collaboration), "Investigation of the ^{240}Pu(n,f) reaction at the n_TOF/EAR2 facility in the 9 meV–6 MeV range", Phys. Rev. C **102**, 014616 (2020); EXFOR 23458006.
55. F. Tovesson, T.S. Hill, M. Mocko, J.D. Baker, C.A. McGrath, "Neutron induced fission of ^{240,242}Pu from 1 eV to 200 MeV", Phys. Rev. C **79**, 014613 (2009); EXFOR 14223002.
56. J. Frehaut, G. Mosinski, R. Bois, and M. Soleilhac, "Measurement of the average prompt neutron number nu-p emitted during fission of ^{240}Pu and ^{235}U induced by neutrons with energy between 1.5 and 15 MeV", in Proc. 2nd All-Union Conf. on Neutron Physics, Kiev, USSR, 28 May–1 June, 1973 (IPPE, Obninsk, 1974), v. 3, p. 153 (1974); EXFOR 20488002
57. В. М. Куприянов, Б. И. Фурсов, Б. К. Масленников, В. М. Сурин, Г. Н. Смиренкин, "Измерение отношений сечений деления ^{240}Pu/^{235}U и ^{242}Pu/^{235}U нейтронами 0.127-7.4-МэВ", Атомная энергия **46**, 35 (1979) [V. M. Kupriyanov, B. I. Fursov, B. K. Maslennikov, V. M. Surin, and G. N. Smirenkin, "Measurement of the ^{240}Pu/^{235}U and ^{242}Pu/^{235}U fission cross-section ratios for 0.127-7.4-MeV Neutrons", Atomic Energy **46**, 35 (1979)]; EXFOR 40509002.
58. C. Budtz-Jorgensen and H.-H. Knitter, "Neutron-Induced Fission Cross Section of Plutonium-240 in the Energy Range from 10 keV to 10 MeV", Nucl. Sci. Eng. **79**, 380 (1981); EXFOR 21764004.
59. T. Iwasaki, F. Manabe, M. Baba, S. Matsuyama, H. Kimiyama, and N. Hirakawa, "Measurement of fast neutron induced fission cross section ratios of Pu-240 and Pu-242 relative to U-235", J. Nucl. Sci. Technol. **27**, 885 (1990); EXFOR 22211003.
60. M. Cance and G. Grenier, "Mesures absolues de ^{240}Pu(n,f), ^{242}Pu(n,f) et ^{237}Np(n,f) a l'energie incidente

de 2,5 MeV", in Proc. Int. Conf. Nuclear Data for Science and Technology, Antwerpen, Belgium, 6-10 September, 1982 (Springer, Dordrecht, 1983), p. 51; EXFOR 21821004.

61. K. Gul, M. Ahmad, M. Anwar, and S. M. Saleem, "Measurements of neutrons fission cross sections of ^{237}Np, ^{240}Pu, ^{241}Pu, ^{242}Pu, ^{244}Pu, and ^{241}Am at 14.7 MeV", Nucl. Sci. Eng. **94**, 42 (1986); EXFOR 31711006.

62. P. Salvador-Castineira, T. Brys, R. Eykens, F.-J. Hambsch, A. Gook, A. Moens, S. Oberstedt, G. Sibbens, D. Vanleeuw, M. Vidali, and C. Pretel, "Neutron-induced fission cross section of ^{240}Pu from 0.5 MeV to 3 MeV", Phys. Rev. C **92**, 014620 (2015); EXFOR 23281005.

63. F. Belloni, R. Eykens, J. Heyse, C. Matei, A. Moens, R. Nolte, A. J. M. Plompen, S. Richter, G. Sibbens, D. Vanleeuw, and R. Wynants, "Neutron induced fission cross section measurements of ^{240}Pu and ^{242}Pu relative to the neutron-proton scattering cross section at 2.5 and 14.8 MeV", Eur. Phys. J. A **58**, 227 (2022); EXFOR 23653003.