

Измерение сечения деления ядер ^{237}Np нейтронами с энергиями 0.3–500 МэВ

А. С. Воробьев^{ID+1)}, А. М. Гагарский^{ID+}, О. А. Щербаков^{ID+}, Л. А. Вайшнене^{ID+}, А. М. Тягельская⁺,
Н. М. Ольхович⁺, А. Л. Барабанов^{ID*×}

⁺ Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова, 188300 Гатчина, Россия

* Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, 123182 Москва, Россия

× Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, 115409 Москва, Россия

Поступила в редакцию 12 августа 2024 г.

После переработки 12 августа 2024 г.

Принята к публикации 28 августа 2024 г.

В настоящей работе представлены результаты измерений сечения деления ядер ^{237}Np нейтронами с энергиями 0.3–500 МэВ, выполненных на времяпролетном спектрометре нейтронного комплекса ГНЕЙС в НИЦ “Курчатовский институт” – ПИЯФ. Сечение деления $^{237}\text{Np}(n, f)$ измерялось относительно сечения деления $^{235}\text{U}(n, f)$, осколки деления регистрировались при помощи позиционно-чувствительных многопроволочных пропорциональных счетчиков низкого давления. Проведено сравнение полученных данных с результатами выполненных ранее экспериментальных работ, а также оценок из различных библиотек оцененных данных.

DOI: 10.31857/S0370274X24090127, EDN: НВАРКУ

1. Введение. Несколько лет назад на нейтронном времяпролетном спектрометре ГНЕЙС [1, 2], созданном на базе синхроциклотрона СЦ-1000 с энергией протонов 1 ГэВ в НИЦ “Курчатовский институт” – ПИЯФ (г. Гатчина, Россия), нами была начата программа исследований, направленная на получение новой информации о процессе деления ядер, индуцированного нейтронами с энергиями от нескольких сотен кэВ до 500 МэВ. На начальном этапе наших исследований особое внимание было уделено угловым распределениям осколков деления. Это связано с тем, что такая информация очень важна для верификации параметров моделей, используемых для адекватного описания процесса деления в диапазоне энергий нейтронов выше 20 МэВ, тогда как имеющиеся в литературе экспериментальные данные очень скудны. Также стоит отметить, что все более точные данные по делению ядер необходимы для конструирования современных и будущих ядерных реакторов, а также для проектирования установок на базе ускорителей (Accelerator-Driven Systems – ADS), в том числе мощных источников нейтронов.

В результате, на первом этапе исследований на нейтронном времяпролетном спектрометре ГНЕЙС были измерены угловые распределения осколков де-

ления для широкого набора ядер: ^{232}Th , ^{233}U , ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{237}Np , ^{nat}Pb и ^{209}Bi [3, 4]. При этом измерения проводились с использованием одной и той же экспериментальной установки, что повышает степень достоверности данных. Для большинства исследованных ядер в области энергий нейтронов выше 20 МэВ угловые распределения осколков деления были измерены впервые. Сравнение полученных нами данных в области энергий нейтронов ниже 20 МэВ с результатами работ, выполненных ранее с использованием различных экспериментальных методик и источников нейтронов, демонстрирует общее согласие данных. Это свидетельствует о надежности использованного метода измерений и полученных результатов.

Для описания полученных данных нами был разработан теоретический подход на основе модели Хаузера–Фешбаха, позволяющий рассчитывать угловые распределения осколков в широком диапазоне энергий возбуждения с помощью кода Talys 1.9 [5, 6]. Интерес к таким расчетам обусловлен тем, что совместный анализ сечения деления и угловых распределений осколков расширяет возможности получения новой информации о барьерах деления, характеристиках ядер на барьерах и энергиях переходных состояний. Поэтому экспериментальная установка была модернизирована таким образом, чтобы

¹⁾e-mail: vorobyev_as@npfi.nrcki.ru

можно было проводить одновременные измерения сечений деления и угловых распределений осколков деления.

В настоящее время с использованием модернизированной установки проведены одновременные измерения сечения деления и угловых распределений осколков для следующих ядер: ^{236}U [7], ^{238}U [8] и ^{243}Am [9]. В настоящей работе приводятся результаты измерений сечения деления $^{237}\text{Np}(n, f)$.

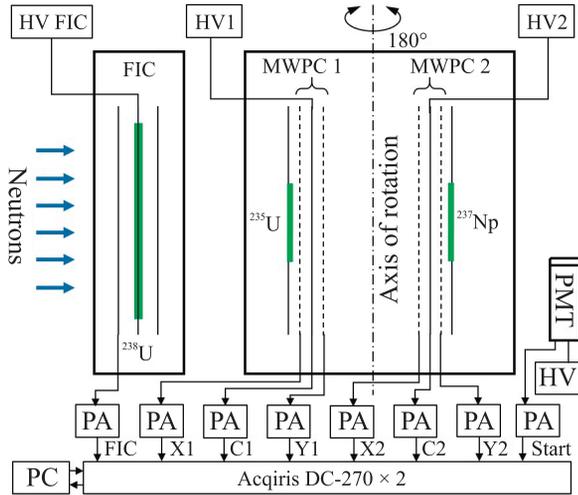


Рис. 1. (Цветной онлайн) Общий вид установки: PC – ПК; PMT – старт детектор, ФЭУ, формирующий триггерный сигнал для системы сбора данных каждый раз, когда протоны сбрасываются на нейтронобразующую свинцовую мишень спектрометра ГНЕЙС; FIC – ионизационная камера деления с мишенями ^{238}U для относительного мониторинга потока нейтронов; PA – предусилители; HV1, HV2, HV и HV FIC – источники высоковольтного напряжения; X1 и X2 – аноды детекторов MWPCs 1 и 2, отвечающие за определение координаты x ; Y1 и Y2 – аноды детекторов MWPCs 1 и 2, отвечающие за определение координаты y ; C1 и C2 – катоды детекторов MWPCs 1 и 2

2. Эксперимент. Экспериментальная установка и методика проведения одновременных измерений сечений деления и угловых распределений осколков деления подробно описаны в наших предыдущих публикациях, указанных выше. Общий вид установки представлен на рис. 1. Остановимся на основных моментах.

Измерения проводились на пролетной базе 36.50(5) м пучка # 5 на времяпролетном спектрометре ГНЕЙС. Для исключения рециклических нейтронов использовался Cd фильтр толщиной 0.5 мм. Сечение деления $^{237}\text{Np}(n, f)$ измерялось относительно сечения деления $^{235}\text{U}(n, f)$, поскольку

сечение деления $^{235}\text{U}(n, f)$ в исследуемой области энергий нейтронов известно с хорошей точностью и является принятым международным стандартом в области энергий 0.15–200 МэВ [10], а в области энергий 200–1000 МэВ – рекомендованным [11] для использования в измерениях, подобных нашим. Осколки деления, испускаемые мишенями ^{237}Np и ^{235}U , регистрировались сборкой из двух позиционно-чувствительных многопроволочных пропорциональных счетчиков низкого давления (MWPCs) размером 140×140 мм². Для обеспечения идентичности измерений мишени исследуемых ядер размещались на противоположных сторонах этой сборки, и осколки деления, испускаемые этими мишенями, регистрировались в одном и том же сеансе измерений. Эффективность регистрации осколков деления составляла $\approx 45\%$. Для того, чтобы определить влияние на измеряемое угловое распределение осколков импульса, передаваемого падающим нейтроном делящейся системе, и учесть анизотропию осколков при определении сечений, измерения проводились для двух ориентаций установки относительно направления нейтронного пучка. При этом флюенс нейтронов был примерно одинаков для этих двух ориентаций. Ориентация изменялась путем поворота установки на 180° вокруг оси, перпендикулярной направлению движения нейтронов в пучке. Такое вращение позволяет также минимизировать эффекты, связанные как с ослаблением потока нейтронов на мишенях и конструкцией MWPC, так и с имеющимися незначительными неоднородностями толщины мишеней и потока нейтронов.

Волновые формы сигналов с анодов и катодов каждого MWPC и с относительного монитора нейтронного пучка – ионизационной камеры с мишенями ^{238}U (Fast Ionization Chamber – FIC), а также сигнал со старт детектора (Photomultiplier Tube – PMT) регистрировались двумя 8-ми битовыми оцифровщиками сигналов с частотой выборки 500 МГц (Acqiris DC-270). Оцифровщики запускались синхронно сигналом от старт детектора, регистрирующего γ -кванты и нейтроны, испускаемые из нейтронобразующей свинцовой мишени нейтронного источника спектрометра ГНЕЙС. Временной интервал для оцифровки сигналов составлял 8 мкс, что соответствует энергиям падающих нейтронов от 0.1 МэВ до 1 ГэВ. Полученные таким образом волновые формы считывались в компьютер (ПК) и сохранялись на жестком диске.

Мишени, содержащие ^{235}U и ^{237}Np , были изготовлены в АО “Радиевый институт им. В. Г. Хлопина” (г. Санкт-Петербург, Россия) методом “намазыва-

ния” на алюминиевые подложки толщиной 0.1 мм. Мишень, содержащая ^{237}Np (NpO_2) обогащением 99.999(1) % и толщиной 318(16) мкг/см², представляла собой круг диаметром 80 мм, а мишень, содержащая ^{235}U (U_3O_8) обогащением 99.992(1) % и толщиной 203(11) мкг/см², представляла собой прямоугольник со сторонами 50 и 100 мм. Однородность активного слоя составляла около 10 %.

Для обеспечения идентичных условий при измерении сечения деления ^{237}Np относительно сечения деления ^{235}U на соответствующих мишенях со стороны активного слоя размещались одинаковые круглые “маски”, непрозрачные для α -частиц и осколков деления, из алюминиевой фольги толщиной 0.1 мм и диаметром 48.0 мм. Масса исследуемого изотопа (число ядер) в выделенной с помощью “маски” области мишени определялась нами из полной α -активности мишеней с наложенной на них “маской”, измеренной с помощью кремниевых полупроводниковых детекторов в хорошо определенной геометрии. Расчет телесного угла регистрации был выполнен с использованием метода Монте-Карло. Поскольку в мишени ^{237}Np , кроме основного изотопа, не было других примесей (обогащение 99.999(1) %), считалось, что весь наблюдаемый счет обусловлен α -активностью ^{237}Np , а его период полураспада принимался равным $2.144(7) \times 10^6$ [12]. В данном эксперименте, как и в наших предыдущих работах [7, 8, 9], при проведении измерений использовалась одна и та же мишень ^{235}U с наложенной “маской”. Изотопный состав мишени ^{235}U и результаты измерения числа ядер приведены в работе [7]. Определенное таким образом отношение N_7/N_5 числа ядер основного изотопа в мишенях ^{237}Np и ^{235}U составило 1.630(22).

3. Обработка данных. Особенности работы детектора осколков (MWPCs) и реализованная процедура отбора событий, аналогичная той, которая описана в наших предыдущих работах (см., например, [13, 14]), 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. Для примера на рис. 2 представлены двумерные распределения зарегистрированных событий до и после выделения событий деления $^{237}\text{Np}(n, f)$.

В данной работе измерения отношения сечений деления ядер ^{235}U и ^{237}Np проводились одновременно с использованием одной и той же экспериментальной установки в одинаковой геометрии. Поэтому при обработке данных необходимо идентифицировать делящуюся мишень, из которой выле-

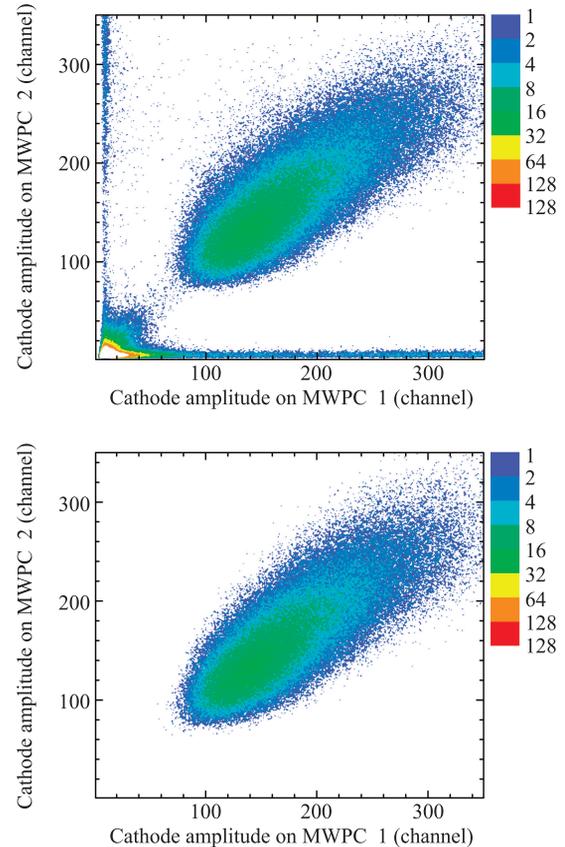


Рис. 2. (Цветной онлайн) Двумерное распределение зарегистрированных событий до (сверху) и после (снизу) отделения событий деления $^{237}\text{Np}(n, f)$

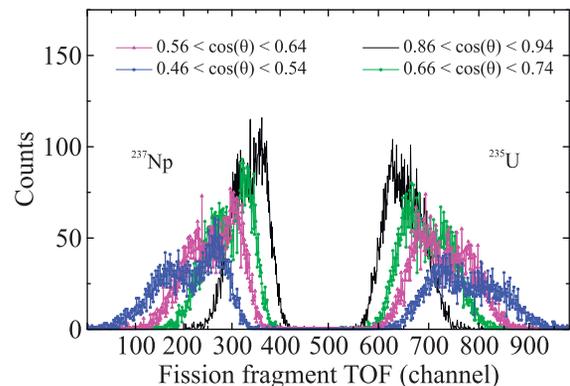


Рис. 3. (Цветной онлайн) Времяпролетный спектр осколков деления ^{235}U (справа от ~ 500 канала) и ^{237}Np (слева от ~ 500 канала) для выделенных углов между направлением движения осколка деления и нормалью к плоскости электродов MWPCs, полученный в течение одного измерительного сеанса. Ширина канала составляет 0.02 нс

тел зарегистрированный осколок. Для такой идентификации использовались времяпролетные спектры

осколков деления, представленные на рис. 3, где показан результат измерения времени пролета осколка деления от катода MWPC2 до катода MWPC1. Хорошо видны две группы событий, которые соответствуют делению $^{237}\text{Np}(n, f)$ и $^{235}\text{U}(n, f)$.

Принимая во внимание все выше сказанное и тот факт, что мишени исследуемых ядер (однородность активного слоя 10 %) полностью находились в пучке нейтронов (неоднородность потока нейтронов на мишенях была около 7 %) и доля делящихся ядер в них, отличных от основного изотопа, мала (не более 0.008 %), отношение сечений деления исследуемых ядер $R = \sigma(^{237}\text{Np})/\sigma(^{235}\text{U})$ может быть найдено при помощи следующего выражения:

$$R(E_n) = \frac{S_7(E_n) N_5}{S_5(E_n) N_7} C_1(E_n), \quad (1)$$

где E_n – энергия нейтрона, вызывающего деление; S_7 и S_5 – зарегистрированные события деления ^{237}Np и ^{235}U соответственно; C_1 – поправка на анизотропию угловых распределений осколков деления и ограниченный телесный угол регистрации (рис. 4); N_7/N_5 – нормировочный множитель (отношение числа ядер в исследуемых мишенях).

Поправка C_1 определялась аналогично тому, как это было описано в нашей работе [7] с использованием зависимостей анизотропии осколков деления ядер ^{237}Np и ^{235}U от энергии нейтронов, полученных ранее [3]. Величина данной поправки в среднем составляет ~ 1 % и достигает ~ 4 % в области энергий нейтронов около 0.6 МэВ.

Относительные ошибки полученного в настоящей работе отношения сечений деления ^{237}Np и ^{235}U приведены в табл. 1. Можно видеть, что полная средняя систематическая ошибка измерений составляет 1.7 % и в основном определяется неопределенностью нормировочного множителя N_7/N_5 – 1.4 %.

4. Результаты и обсуждение. На сегодняшний день во всем мире выполнен большой объем экспериментальных работ по измерениям сечения деления ^{237}Np [15-35].

При этом использовались как моноэнергетические нейтроны [15–17, 19–31, 33, 35], полученные в различных реакциях на ускорителях, так и пучки нейтронов с непрерывным спектром [18, 32, 34].

В указанных работах для регистрации осколков деления использовались различные типы детекторов: ионизационные камеры [15, 17, 18, 20–23, 25, 27–31, 34, 35], трековые детекторы [17, 24], пробойные счетчики [19], поверхностно-барьерные детекторы [16, 26], плоскопараллельные лавинные счетчики [32, 33]. Информацию о деталях проведения эксперимен-

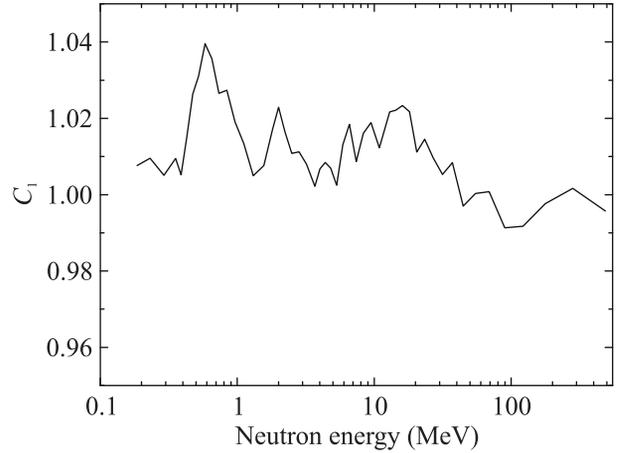


Рис. 4. Поправка, учитывающая анизотропию угловых распределений осколков деления

Таблица 1. Относительные погрешности измерений отношения сечений деления ^{237}Np и ^{235}U

Статистическая точность	15–1.5 % (0.3–1.0 МэВ) 1.5–1.0 % (выше 1.0 МэВ)
Ослабление потока нейтронов	менее 0.3 %
Анизотропия	0.6 %
Чистота мишеней	< 0.01 %
Эффективность MWPCs (геометрическая неопределенность)	0.3 %
Нормировочный множитель N_7/N_5	1.4 %
Полная погрешность	2.1 %
Неопределенность ^{235}U стандарта [10, 11]	
$\sigma_f(^{235}\text{U})$	1.3–1.5 % (ниже 20 МэВ)
	1.5–4.8 % (20–200 МэВ)
	5–7 % (выше 200 МэВ)

тов и результаты измерений в цифровой форме можно найти в международной библиотеке экспериментальных ядерных данных EXFOR [36].

Результаты измерений отношения R сечений деления ядер ^{237}Np и ^{235}U , полученные в настоящей работе, приведены на рис. 5 вместе с оценкой из библиотеки JENDL-5 [37] и с результатами работ [18, 21, 32], в которых указанное отношение было измерено в достаточно широкой области энергий нейтронов. Детальное сравнение полученного отношения R для области энергий 1–17 МэВ выполнено на рис. 6, где также приведены результаты других работ и оценки из библиотек JENDL-5, ENDF/B-VIII.0 [38] и CENDL-3.2 [39]. В качестве оценки из соответствующей библиотеки на рис. 5, 6 приведено отношение сечения деления $^{237}\text{Np}(n, f)$, взятого из указанных библиотек,

и стандарта $\sigma_f(^{235}\text{U})$ – сечения деления ^{235}U [10], которое практически совпадает с сечением деления $^{235}\text{U}(n, f)$ из библиотеки ENDF/B-VIII.0. Отметим, что оценки из библиотек JEFF-3.3 [40] и ROSFOND-2010 [41] не приводятся, поскольку первая полностью идентична оценке из ENDF/B-VIII.0, а вторая в области энергий нейтронов ниже и выше 14 МэВ практически совпадает с оценками ENDF/B-VIII.0 и CENDL-3.2 соответственно. Между представленными оценками наблюдается некоторое отличие, составляющее в среднем 3–4 %, и достигающее наибольшего значения $\sim 6\%$ для оценки из CENDL-3.2 в диапазоне энергий нейтронов 8–12 МэВ.

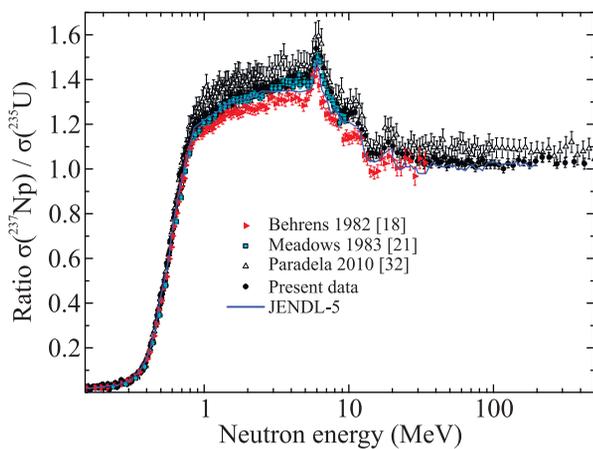


Рис. 5. (Цветной онлайн) Отношение сечений деления ^{237}Np и ^{235}U (сравнение результатов измерений настоящей работы с экспериментальными данными других авторов [18, 21, 32], взятыми из библиотеки EXFOR [36]). Приведенные на рисунке ошибки – полные

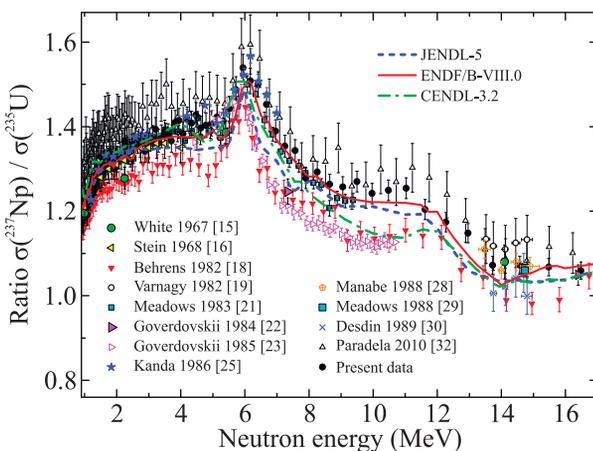


Рис. 6. (Цветной онлайн) Отношение сечений деления ^{237}Np и ^{235}U в области энергий нейтронов 1–17 МэВ. Приведенные на рисунке ошибки – полные

Можно видеть, что в области энергий нейтронов ниже 10 МэВ в пределах полной погрешности экспериментальных данных наблюдается согласие данных настоящей работы как с результатами других авторов [15, 16, 21, 25, 34], за исключением работ [18, 22, 23, 32], так и оценки из ENDF/B-VIII.0. Отметим, для работ [18], [22, 23] и [32] наблюдаемое отличие от оценки из ENDF/B-VIII.0 находится за пределами заявленной авторами неопределенности нормировочного множителя 1, 2 и 4 % соответственно. При энергии нейтронов около 14.5 МэВ результат настоящей работы согласуется в пределах экспериментальных неопределенностей со всеми представленными экспериментальными данными [15, 19, 28–30, 32], кроме данных [18].

Выше 30 МэВ в литературе можно найти только один набор данных [32]. Но при этом стоит отметить, что имеется также ряд экспериментальных работ по измерению отношения сечений деления ^{237}Np и ^{235}U [42–44] в области энергий нейтронов вплоть до нескольких сотен МэВ с использованием метода времени пролета, в которых нормировочный множитель N_7/N_5 не определялся и соответствующая поправка в измеренные отношения не вносилась. Поэтому при представлении своих данных авторы указанных работ выполняли произвольную нормировку измеренных отношений. Так, в работе [42] полученные отношения были нормированы на данные из работы [21] в области энергий нейтронов 1–10 МэВ. В работе [43], также выполненной на спектрометре ГНЕЙС, нормировка проводилась в области энергий 1.75–4.0 МэВ на отношение сечений деления ^{237}Np и ^{235}U , взятых из библиотеки JENDL-3.2 [45], и в [44] – в области энергий около 14.8 МэВ на отношение сечений деления из библиотеки ENDF/B-VII [46]. На рисунке 7 выполнено сравнение этих данных с результатами настоящей работы и [32], которые также получены в широком интервале энергий нейтронов с использованием метода времени пролета. Видно, что форма кривой отношения сечений деления ^{237}Np и ^{235}U , полученная на различных источниках нейтронов с непрерывным спектром при помощи разных экспериментальных установок в общем согласуется во всем измеренном диапазоне энергий.

Сечение деления $^{237}\text{Np}(n, f)$, полученное нами как произведение измеренного отношения R и стандарта $\sigma_f(^{235}\text{U})$ – сечения деления $^{235}\text{U}(n, f)$, приведено на рис. 8 вместе с оценками из библиотек ENDF/B-VIII.0 и JENDL-5.

Сравнение полученного нами сечения деления ^{237}Np с результатами работ, выполненных ранее [17, 19, 20, 24, 26, 27, 31, 33–35], для области энергий

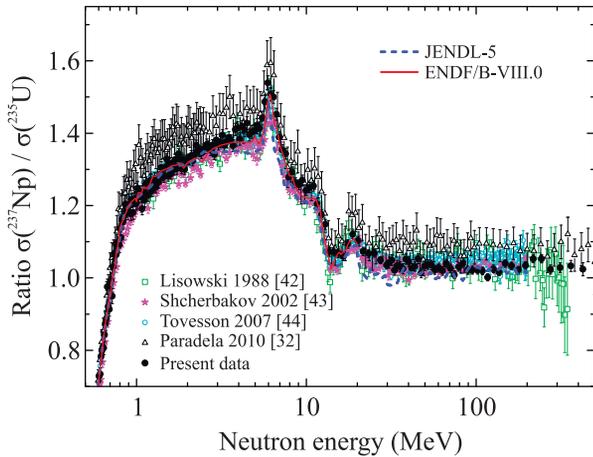


Рис. 7. (Цветной онлайн) Сравнение экспериментальных данных, полученных с использованием метода времени пролета. Приведенные на рисунке ошибки – статистические, за исключением работы [42], в которой информация об источнике приведенных ошибок отсутствует

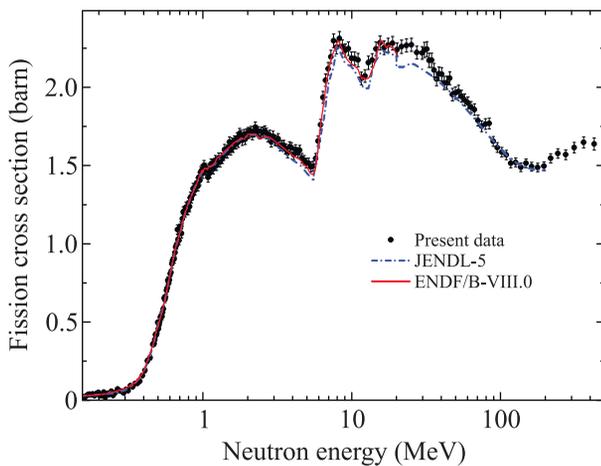


Рис. 8. (Цветной онлайн) Сечение деления $^{237}\text{Np}(n, f)$, полученное в настоящей работе, в сравнении с оценками из библиотек ENDF/B-VIII.0 и JENDL-5. Приведенные на рисунке ошибки – полные (неопределенность стандарта – сечения деления $^{235}\text{U}(n, f)$ – не учитываются)

нейтронов выше 1 МэВ представлено на рис. 9. Все упомянутые работы были выполнены с использованием моноэнергетических нейтронов, полученных в различных реакциях на ускорителях. Исключение составляет [34], в которой измерения проводились на нейтронном пучке с непрерывным спектром по методу времени пролета. В работах [27, 31] использовался прямой метод измерений сечения деления – метод коррелированных во времени сопутствующих частиц, а в [20, 35] для определения абсолютного по-

тока нейтронов использовался BF_3 -счетчик с хорошо определенными характеристиками. Во всех остальных работах сечение деления измерялось относительно сечения реакции, известного с большой точностью (стандарта): $^{239}\text{Pu}(n, f)$ [17], $^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$ [24], $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ [26], $^{238}\text{U}(n, f)$ [19, 33, 34]. Для данных [17] и [19, 33, 34] сечение деления ^{237}Np , представленное на рис. 9, определялось как произведение измеренного отношения и рекомендованного сечения $^{239}\text{Pu}(n, f)$ и $^{238}\text{U}(n, f)$ [10], соответственно. Все остальные данные представлены без изменений, так как они приведены в публикациях авторов.

Видно, что сечение деления ^{237}Np , полученное в настоящей работе, согласуется в пределах экспериментальных неопределенностей с результатами всех приведенных на рис. 9 работ, за исключением [26], в которой сечение деления существенно недооценивается. Отдельно на рис. 10 выполнено сравнение данных настоящей работы с результатами некоторых упомянутых выше работ в области энергий нейтронов ниже 1 МэВ.

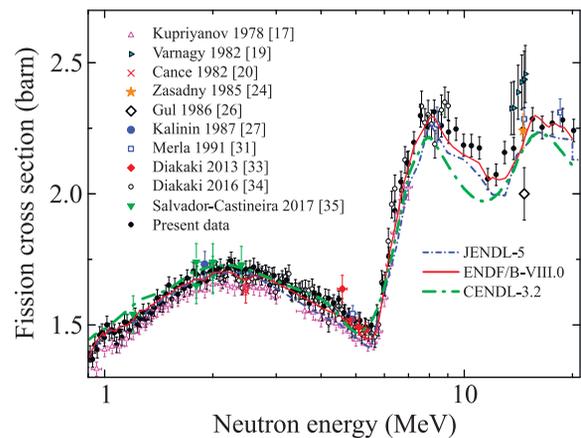


Рис. 9. (Цветной онлайн) Сечение деления $^{237}\text{Np}(n, f)$, полученное в настоящей работе, в сравнении с экспериментальными данными других авторов для энергий нейтронов выше 1 МэВ. Приведенные на рисунке ошибки – полные

5. Заключение. На нейтронном времяпролетном спектрометре ГНЕЙС в НИЦ “Курчатовский институт” – ПИЯФ проведены измерения сечения деления $^{237}\text{Np}(n, f)$ в диапазоне энергий нейтронов до 500 МэВ.

Сечение деления $^{237}\text{Np}(n, f)$ измерялось относительно сечения деления $^{235}\text{U}(n, f)$, которое является рекомендованным при проведении подобных экспериментов. Неопределенность полученных данных составила 2–3 %.

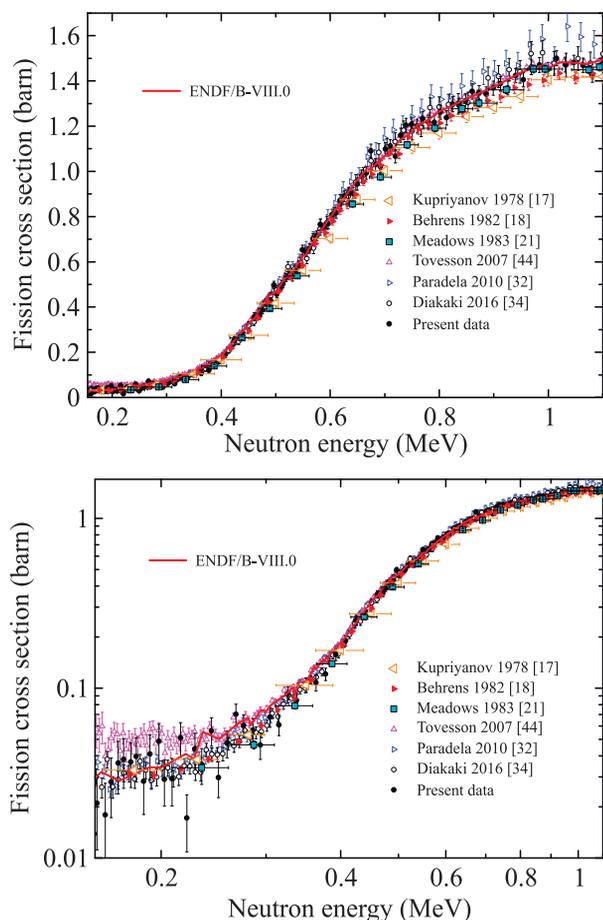


Рис. 10. (Цветной онлайн) Сечение деления $^{237}\text{Np}(n, f)$, полученное в настоящей работе, в сравнении с экспериментальными данными других авторов для энергий нейтронов ниже 1 МэВ в линейном (вверху) и дважды логарифмическом (внизу) масштабе. Приведенные на рисунке ошибки – полные (неопределенность стандарта – сечения деления $^{235}\text{U}(n, f)$ – не учитывается)

Форма энергетической зависимости сечения деления, полученная в данной работе, в основном согласуется с результатами всех работ, выполненных ранее на других времяпролетных установках с использованием различных источников нейтронов, а также с оценкой из ENDF/B-VIII.0 в области энергий ниже 20 МэВ и с оценкой из JENDL-5 – выше 40 МэВ.

Также в данной работе были измерены угловые распределения осколков деления ^{237}Np в исследуемом диапазоне энергий нейтронов. В настоящее время ведется обработка данных.

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 Национального исследовательского центра “Курчатовский институт” – Петербургский институт ядерной физики. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

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

1. O. A. Shcherbakov, A. S. Vorobyev, A. M. Gagarski, L. A. Vaishnena, E. M. Ivanov, V. S. Anashin, L. R. Bakirov, and A. E. Koziukov, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **63**(4), 2152 (2016).
2. O. A. Shcherbakov, A. S. Vorobyev, and E. M. Ivanov, *Phys. Part. Nuclei* **49**, 81 (2018).
3. A. S. Vorobyev, A. M. Gagarski, O. A. Shcherbakov, L. A. Vaishnena, A. L. Barabanov, and T. E. Kuz'mina, *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **84**(10), 1245 (2020).
4. A. S. Vorobyev, A. M. Gagarski, O. A. Shcherbakov, L. A. Vaishnena, and A. L. Barabanov, *JETP Lett.* **112**(6), 323 (2020).
5. A. L. Barabanov, A. S. Vorobyev, A. M. Gagarski, O. A. Shcherbakov, and L. A. Vaishnena, *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **84**(4), 397 (2020).
6. A. L. Barabanov, A. S. Vorobyev, A. M. Gagarski, O. A. Shcherbakov, and L. A. Vaishnena, *EPJ Web Conf.* **256**, 0003 (2021).
7. A. S. Vorobyev, A. M. Gagarski, O. A. Shcherbakov, L. A. Vaishnena, A. L. Barabanov, and T. E. Kuz'mina, *Phys. Rev. C* **108**, 014621 (2023).
8. A. S. Vorobyev, A. M. Gagarski, O. A. Shcherbakov, L. A. Vaishnena, and A. L. Barabanov, *JETP Lett.* **117**(8), 557 (2023).
9. A. S. Vorobyev, A. M. Gagarski, O. A. Shcherbakov, L. A. Vaishnena, and A. L. Barabanov, *Eur. Phys. J. A* **60** 117 (2024).
10. A. D. Carlson, V. G. Pronyaev, R. Capote et al. (Collaboration), *Nuclear Data Sheets* **148**, 143 (2018).
11. B. Marcinkевичius, S. Simakov, and V. Pronyaev, IAEA Report #INDC(NDS)-0681(2015); <https://nds.iaea.org/standards/>.
12. Evaluated Nuclear Structure Data File, <https://www.nndc.bnl.gov/ensdf>.
13. A. S. Vorobyev, A. M. Gagarski, O. A. Shcherbakov, L. A. Vaishnena, and A. L. Barabanov, *JETP Lett.* **104**(6), 365 (2016).
14. A. S. Vorobyev, A. M. Gagarski, O. A. Shcherbakov, L. A. Vaishnena, and A. L. Barabanov, *JETP Lett.* **107**(9), 521 (2018).

15. P.H. White and G.P. Warner, *Journal of Nuclear Energy* **21**, 671 (1967); EXFOR 21195006.
16. W.E. Stein, R.K. Smith, and H.L. Smith, Los Alamos National Laboratory Reports, #LA-DC-9205 (1968); EXFOR 12452004.
17. V.M. Kupriyanov, B.I. Fursov, V.I. Ivanov, and G.N. Smirenkin, *Soviet Atomic Energy* **45**, 1176 (1978); EXFOR 40507004.
18. J.W. Behrens, J.C. Browne, and J.C. Walden, *Nucl. Sci. Eng.* **80**, 393 (1982); EXFOR 10647002.
19. M. Varnagy and J. Csikai, *Nuclear Instruments and Methods* **196**, 465 (1982); EXFOR 30588003 (U5); EXFOR 30588004 (U8).
20. M. Cance and G. Grenier, *Proceeding of the International Conference Nuclear Data for Science and Technology*, Antwerp, Belgium, 6–10 September, 1982, Springer, Dordrecht (1983), p.51; EXFOR 21821006, 21821007.
21. J.W. Meadows, *Nucl. Sci. Eng.* **85**, 271 (1983); EXFOR 12852002.
22. A. A. Goverdovskij, A. K. Gordyushin, B. D. Kuz'minov, V. F. Mitrofanov, A. I. Sergachev, S. M. Solov'ev, and P. S. Soloshenkov, IAEA Report, #INDC(CCP)-281/L, 17 (1988) [Engl. translation of *Jour: Vop. At. Nauki i Tekhn.*, Ser. Yaderno-Reak. Konstanty **3/57**, 13 (1984), Russia]; EXFOR 40835003.
23. A. A. Goverdovskiy, A. K. Gordyushin, B. D. Kuzminov, V. F. Mitrofanov, A. I. Sergachev, S. M. Soloviev, and G. M. Stepchenkova, *Soviet Atomic Energy* **58**, 163 (1985); EXFOR 40861004.
24. K. R. Zasadny, H. M. Agrawal, M. Mahdavi, and G. F. Knoll, IAEA Report, #INDC(USA)-96, 113 (1985); EXFOR 12910003.
25. K. Kanda, T. Iwasaki, M. Terayama, Y. Karino, M. Baba, and N. Hirakawa, IAEA Report, #INDC(JPN)-108/U, 99 (1986); EXFOR 22024003.
26. K. Gul, M. Ahmad, M. Anwar, and S. M. Saleem, *Nucl. Sci. Eng.* **94**, 42 (1986); EXFOR 31711002.
27. V. A. Kalinin, S. S. Kovalenko, V. N. Kuz'min, Yu. A. Nemilov, L. M. Solin, and V. I. Shpakov, IAEA Report, #INDC(CCP)-284, 3 (1987); EXFOR 40927004.
28. F. Manabe, K. Kanda, T. Iwasaki, H. Terayama, Y. Karino, M. Baba, and N. Hirakawa, Faculty of Engineering, Tohoku University Technical Report, **52**(2), 97 (1988); EXFOR 22282007.
29. J.W. Meadows, *Ann. Nucl. Energy* **15** 421 (1988); EXFOR 13134008.
30. L. Desdin, S. Szegedi, and J. Csikai, *Acta Physica Hungarica* **65**(2-3), 271 (1989); EXFOR 31425002.
31. K. Merla, P. Hausch, C.M. Herbach, G. Musiol, G. Pausch, U. Todt, L.V. Drapchinskiy, V. A. Kalinin, and V. I. Shpakov, *Proceeding of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology*, Juelich, Germany, May 13-17, 1991, Springer-Verlag, Germany (1992), p. 510; EXFOR 22304004, 22304008.
32. C. Paradela, L. Tassan-Got, L. Audouin et al. (n_TOF Collaboration), *Phys. Rev. C.* **82**, 034601 (2010); EXFOR 23126003.
33. M. Diakaki, M. Kokkoris, A. Kyrtos, E. Skordis, C. T. Papadopoulos, R. Vlastou, A. Lagoyannis, and S. Andriamonje, *Eur. Phys. J. A* **49**, 62 (2013); EXFOR 23189002.
34. M. Diakaki, D. Karadimos, R. Vlastou et al. (n_TOF Collaboration); *Phys. Rev. C* **93**, 034614 (2016); EXFOR 22742004.
35. P. Salvador-Castineira, F.-J. Hamsch, A. Gook, M. Vidali, N.P. Hawkes, N.J. Roberts, G.C. Taylor, and D.J. Thomas, *EPJ Web. Conf.* **146** 04050 (2017); EXFOR 23736003.
36. N. Otuka, E. Dupont, V. Semkova et al. (Collaboration), *Nuclear Data Sheets* **120**, 272 (2014); <https://www-nds.iaea.org/exfor/>.
37. O. Iwamoto, N. Iwamoto, K. Shibata, A. Ichihara, S. Kunieda, F. Minato, and S. Nakayama, *EPJ Web. Conf.* **239**, 09002 (2020); <https://www-nds.iaea.org/exfor/endlf.htm>.
38. D. A. Brown, M. B. Chadwick, R. Capote et al. (Collaboration), *Nuclear Data Sheets* **148**, 1 (2018).
39. Zh. Ge, R. Xu, H. Wu et al. (Collaboration), *EPJ Web of Conference* **239**, 09001 (2020); <https://www-nds.iaea.org/exfor/endlf.htm>.
40. 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/>.
41. S. V. Zabrodskaia, A. V. Ignatyuk, V. N. Koscheev, V. N. Manohin, M. N. Nikolaev, and V. G. Pronyaev, *VANT. Ser.: Yadernye konstanty 1–2*, 3 (2007) (in Russian); <https://www-nds.iaea.org/exfor/endlf.htm>.
42. P. W. Lisowski, J. L. Ullman, S. J. Balestrini, A. D. Carlson, O. A. Wasson, and N. W. Hill, *Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology*, Mito, Japan, 30 May – 3 June, 1988, p.97; EXFOR 14176003.
43. 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, *J. Nucl. Sci. Technol.* **39**, 230 (2002); EXFOR 41455004.
44. F. Tovesson and T. S. Hill, *Phys. Rev. C.* **75**, 034610 (2007); EXFOR 14130002.
45. T. Nakagawa, K. Shibata, S. Chiba, T. Fukahori, Y. Nakajima, Y. Kikuchi, T. Kawano, Y. Kanda, T. Ohsawa, H. Matsunobu, M. Kawai, A. Zukeran, T. Watanabe, S. Igarasi, K. Kosako and T. Asami, *J. Nucl. Sci. Technol.* **32**, 1259 (1995).
46. M. B. Chadwick, P. Oblozinsky, M. Herman et al. (Collaboration), *Nuclear Data Sheets* **107**, 2931 (2006).