

УДК 539.173.4:539.17.015

АНИЗОТРОПИЯ УГЛОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ОСКОЛКОВ ДЕЛЕНИЯ ^{232}Th , ^{233}U , ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{237}Np , ^{nat}Pb И ^{209}Bi НЕЙТРОНАМИ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ЭНЕРГИЙ 1–200 МэВ

© 2020 г. А. С. Воробьев^{1, *}, А. М. Гагарский¹, О. А. Щербаков¹, Л. А. Вайшнене¹,
А. Л. Барабанов^{2, 3}, Т. Е. Кузьмина⁴

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение

“Петербургский институт ядерной физики имени Б.П. Константинова
Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”, Гатчина, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение

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

³Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)”,
Долгопрудный, Россия

⁴Акционерное общество “Радиевый институт имени В.Г. Хлопина”, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: vorobyev_as@pnpi.nrcki.ru

Поступила в редакцию 11.05.2020 г.

После доработки 02.06.2020 г.

Принята к публикации 26.06.2020 г.

Представлены результаты измерений угловых распределения осколков деления тяжелых ядер нейтронами промежуточных энергий 1–200 МэВ. Исследована зависимость угловой анизотропии осколков деления $W(0^\circ)/W(90^\circ)$ от энергии нейтронов. Сравнение с результатами, полученными другими группами на аналогичных установках, указывает на отсутствие заметных систематических погрешностей в наших данных.

DOI: 10.31857/S0367676520100294

ВВЕДЕНИЕ

В последние два десятилетия в ведущих отечественных и зарубежных научных центрах ведутся работы по развитию ядерных технологий, связанных с использованием источников нейтронов на ускорителях с энергиями до 1 ГэВ, в таких областях, как ADS-системы (ADS – accelerator-driven systems) в ядерной энергетике, трансмутация ядерных отходов, радиационные испытания материалов, ядерная медицина. Поэтому задача создания баз ядерных данных, охватывающих диапазон энергий нейтронов вплоть до 1 ГэВ, является одним из приоритетных направлений исследований. Накопление экспериментальных данных стимулирует развитие новых теоретических моделей, в результате чего создаются расчетные коды (пакеты программ), применяемые как для анализа результатов экспериментов, так и для инженерно-технических расчетов. Угловое распределение осколков деления и угловая анизотропия, определяемая как отношение вероятности вылета осколков под углами 0° и 90° относительно направления падающих нейтронов, наряду с сечением деления отно-

сятся к основным характеристикам процесса деления. Тем не менее, объем имеющихся экспериментальных данных по угловым распределениям (анизотропии) осколков деления ядер-актинидов нейтронами с энергией выше 1 МэВ существенно меньше, чем аналогичный объем данных по сечениям, а в области выше 20 МэВ данные по угловым распределениям до недавнего времени практически отсутствовали.

Данная работа является продолжением исследований процесса деления ядер под действием нейтронов промежуточных энергий 1–200 МэВ [1, 2], ведущихся на времяпролетном спектрометре ГНЕЙС [3, 4] в НИЦ “Курчатовский институт” – ПИЯФ. На сегодняшний день нами получен большой объем новых уникальных экспериментальных данных для широкого набора ядер-мишеней при энергиях 1–200 МэВ [5–8]. В работе [8] представлены также первые результаты теоретического анализа этих данных, нацеленного на получение новой информации о механизме ядерных реакций при промежуточных энергиях и о процессе деления.

ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Измерения проводились в НИЦ “Курчатовский институт” – ПИЯФ на интенсивном источнике нейтронов, созданном на базе протонного синхроциклотрона с энергией пучка 1 ГэВ, на 36-метровой пролетной базе спектрометра по времени пролета ГНЕЙС. Экспериментальная установка и методика измерений угловых распределений осколков деления подробно описаны в наших предыдущих публикациях, указанных выше. Поэтому мы ограничимся лишь принципиальными особенностями установки, которые будут важны для дальнейшего изложения.

До недавнего времени практически все имеющиеся в литературе данные по угловым распределениям осколков деления в диапазоне энергий нейтронов ниже ~20 МэВ были получены с использованием пучков моноэнергетических нейтронов на ускорителях Ван-де-Граафа и Кокрофта–Уолтона. В области энергий нейтронов выше ~20 МэВ существовали только экспериментальные данные по угловой анизотропии осколков деления, полученные с использованием квази-моноэнергетического источника нейтронов в TSL (Университет Уппсала, Швеция) [9]. Для регистрации осколков деления использовались различные детекторы: ионизационные камеры деления, пропорциональные газовые и сцинтилляционные счетчики, полупроводниковые и “трековые” детекторы. Основная особенность подобных измерений энергетической зависимости угловой анизотропии осколков заключается в том, что для каждого значения (выбранного интервала) энергии нейтронов, вызывающих деление, должен быть выполнен отдельный эксперимент. При этом приходится использовать как разные реакции и мишени, так и проводить дополнительную настройку/подстройку (калибровку) всей детектирующей аппаратуры. Измерения, выполненные с использованием квази-моноэнергетического источника нейтронов, имеют удовлетворительное энергетическое разрешение, а при анализе данных приходится учитывать вклад от низкоэнергетического “хвоста” нейтронов [9].

Существенный шаг в методике экспериментальных исследований угловых распределений осколков деления был сделан в последнее время, когда такие исследования были начаты на времяпролетных спектрометрах с непрерывным нейтронным спектром ГНЕЙС (ПИЯФ, Россия) [5], n_TOF (ЦЕРН, Швейцария) [10] и LANSCE - Los Alamos Neutron Science Centre (ЛАНЛ – Лос-Аламоская Национальная Лаборатория, США) [11]. Импульсные высокоинтенсивные источники нейтронов этих установок позволяют проводить измерения сечений деления ядер и угловых распределений осколков деления с использованием методики времени пролета одновременно во всем

диапазоне энергий нейтронов, вызывающих деление, 1–300 МэВ. Импульс быстрых нейтронов получается в результате реакции расщепления при сбросе пучка протонов высокой энергии на свинцовую (ГНЕЙС, n_TOF) или вольфрамовую мишень (LANSCE). Спектрометр ГНЕЙС, как упоминалось выше, создан на базе синхроциклотрона с энергией 1 ГэВ, а n_TOF и LANSCE на базе протонного синхротрона в ЦЕРН на 20 ГэВ и линейного ускорителя протонов на 800 МэВ, соответственно. При этом отношение интенсивности нейтронов в одной вспышке в месте проведения измерений для ГНЕЙС, n_TOF и LANSCE составляет примерно 1 : 10 : 0.014, а длительность импульса быстрых нейтронов, определяемая как ширина пика, соответствующего фотоделению, во времяпролетном спектре нейтронов источника, составляет 10, 16 и 8 нс, соответственно. На времяпролетном спектрометре ГНЕЙС измерения проводились на пролетной базе 36 м, в то время как на установке n_TOF использовалась пролетная база 185 м, а в LANSCE измерения были выполнены на 8 м. Существующее различие как в конструкции указанных выше нейтронных источников, так и систем проводки нейтронного пучка, приводит к тому, что спектр нейтронов и структура нейтронного фона в месте размещения измерительных установок различны. Следует отметить, что на ГНЕЙС и n_TOF время между последовательными сбросами протонного пучка составляет 20 мс и 1.2 с, что при длине пролетных баз 36 и 185 м соответствует энергии рециклических нейтронов менее 0.017 и 0.00012 эВ. Нейтроны с такими энергиями убираются из пучка с помощью кадмиевого или борного фильтра. При измерениях в LANSCE минимальное время между сбросами протонов на мишень равно 1.8 мкс, что при длине пролетной базы 8 м соответствует энергии рециклических нейтронов менее 104 кэВ, поэтому в получаемые данные обязательно вносятся поправки, связанные с наличием таких нейтронов [15].

Двумя другими принципиально важными особенностями экспериментальных методик, используемых этими исследовательскими группами, являются использование многоканальных позиционно-чувствительных детекторов осколков деления различной степени сложности (MWPCs – Multi-Wire Proportional Counter, PPACs – Parallel Plate Avalanche Counters, TPC – Time Projection Chamber) и применение методов цифровой обработки импульсов с детектора. Несмотря на имеющиеся различия в способе идентификации событий деления и отделения их от событий, соответствующих сопутствующим реакциям, при использовании этих детекторов удалось получить практически идеальное отделение событий деления при пороге регистрации осколков деления, близком к нулю. Так, например, в экспериментах на ГНЕЙС реги-

стрировался только один из осколков деления, направление движения которого определялось при помощи двух позиционно-чувствительных MWPC, которые располагались на пучке нейтронов один за другим вблизи мишени делящегося вещества. Эффективное отделение осколков деления достигалось благодаря использованию “динамического” порога регистрации (например, [1, 6]). В экспериментах, ведущихся на n_TOF [10, 12–14] и LANSCE [11, 15], мишень делящегося вещества располагалась на пленке между двух позиционно-чувствительных PPAC и на центральном катоде TPC между двух анодов (позиционно-чувствительных детекторов типа MICROMEGAS, состоящих из 2976 независимых гексагональных ячеек регистрации), соответственно. В этом случае наличие совпадения импульсов от комлементарных осколков является естественным триггером события деления. Детекторы осколков деления были ориентированы таким образом, что ось нейтронного пучка проходила: ГНЕЙС – перпендикулярно к плоскости, в которой располагались MWPC, через их геометрические центры, n_TOF – под углом 45° к плоскости, в которой располагались PPAC, через их геометрические центры, LANSCE – перпендикулярно плоскости катода TPC вдоль ее оси. В силу этого, а также конструктивных особенностей упомянутых выше детекторов, эффективность регистрации осколков деления зависит от угла разлета осколков относительно оси нейтронного пучка. Поскольку в данных работах изучаются угловые зависимости, определение этой эффективности является одной из главных задач. Также следует обратить внимание на то, что нейтрон, вызывающий деление ядра, передает импульс всей делящейся системе и, следовательно, осколкам деления. Это приводит к тому, что осколки движутся преимущественно по направлению пучка и такой эффект должен учитываться при определении угловых распределений осколков. Для этого в настоящей работе измерения угловых распределений осколков проводились для двух положений последовательно расположенных счетчиков относительно падающего пучка нейтронов: “по пучку” – направление пучка и продольная составляющая импульса осколка совпадают и “против пучка” – направление пучка и продольная составляющая импульса осколка направлены противоположно. В работе, проводившейся в LANSCE с использованием TPC, “эффект переданного импульса” вычислялся на основе законов сохранения энергии и импульса для каждого события деления исходя из измеренных кинетических энергий и масс осколков, энергии нейтрона и определенных углов [15]. Как отмечалось в работах [10, 13], поправка на указанный эффект для измерений, выполненных n_TOF с использованием PPAC, расположенных с двух сторон относительно пленки с мишенью делящегося вещества, была рассчитана

с помощью метода Монте-Карло и оказалась пренебрежимо малой.

В настоящей работе так же, как и в работах, выполненных на n_TOF и LANSCE, измеренные угловые распределения осколков деления в системе центра масс (с. ц. м.), т.е. выходы осколков $W(\theta)$ под углом θ между осью нейтронного пучка и вектором импульса осколка деления в с. ц. м., описывались суммой четных полиномов Лежандра: до 4-й степени включительно – ГНЕЙС и n_TOF , 2-й степени – LANSCE. Область углов, доступных для исследований, задается конструкцией детектора и геометрией эксперимента. Для экспериментов, в которых ось пучка перпендикулярна плоскости расположения позиционно-чувствительных детекторов, диапазон углов, используемых для описания, является ограниченным и составляет $0.24 < \cos(\theta) < 1.0$ – MWPC (ГНЕЙС) и $0.20 < \cos(\theta) < 1.0$ – TPC (LANSCE). При описании данных n_TOF используется весь диапазон углов $0 < \cos(\theta) < 1.0$. Далее анизотропия определялась через коэффициенты A_2 и A_4 ($A_0 = 1$) при соответствующих полиномах Лежандра при помощи следующего выражения:

$$\frac{W(0^\circ)}{W(90^\circ)} = \frac{1 + A_2 + A_4}{1 - A_2/2 + 3A_4/8}. \quad (1)$$

Таким образом, на сегодняшний день имеется возможность выполнить сравнительный анализ имеющихся в литературе экспериментальных данных об угловых распределениях осколков деления во всем исследованном нами интервале энергий нейтронов и оценить возможные систематические ошибки.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

В табл. 1 приведен перечень выполненных в настоящее время работ, направленных на изучение угловых распределений осколков деления в широкой области энергий нейтронов.

Как видно, в рамках исследований, ведущихся на спектрометре ГНЕЙС, получен большой объем новых экспериментальных данных для широкого набора ядер мишеней: ^{nat}Pb , ^{209}Bi , ^{232}Th , ^{233}U , ^{235}U , ^{238}U , ^{237}Np и ^{239}Pu [1, 2, 5–8]. Можно предположить, что недостаточная проработанность существующих теоретических подходов, позволяющих вычислять угловые распределения осколков в указанной области энергий, в первую очередь, связана с отсутствием экспериментальных данных. Поэтому все полученные нами данные об энергетической зависимости угловой анизотропии осколков были переданы в библиотеку экспериментальных данных EXFOR [16]. Также нами были начаты работы по разработке модели, позволяющей вычислять эти угловые распределения [8].

Таблица 1. Статус экспериментов по изучению угловых распределений осколков в области энергий нейтронов больше 20 МэВ

Ядро	ГНЕЙС, КИ-ПИЯФ	<i>n</i> -TOF, ЦЕРН	LANSCE, ЛАНЛ	TSL, Уппсала университет
	Ссылка, номер в базе EXFOR			
²³² Th	[1, 2, 5] – EXFOR #41608	[10] – EXFOR #23209, [12]		[9] – EXFOR #22898
²³³ U	[1, 2, 6] – EXFOR #41616			
²³⁵ U	[1, 2, 5] – EXFOR #41608	[13, 14]	[11, 15]	
²³⁸ U	[1, 2, 5] – EXFOR #41608	[13]		[9] – EXFOR #22898
²³⁷ Np	[8]			
²³⁹ Pu	[7] – EXFOR #41658			
^{nat} Pb	[2, 7] – EXFOR #41658			
²⁰⁹ Bi	[1, 2, 6] – EXFOR #41616			

Сравнение угловых распределений осколков деления, полученных в данной работе, с имеющимися в литературе данными других авторов показывает, что в области энергий нейтронов ниже 20 МэВ в пределах ошибок измерений имеется

согласие между разными экспериментальными данными. Для примера на рис. 1 приведены угловые распределения осколков деления ²³³U и ²³⁹Pu в с. п. м. для двух энергий нейтронов, 1.49 ± 0.16 МэВ и 15.7 ± 1.4 МэВ, вместе с экспериментальными

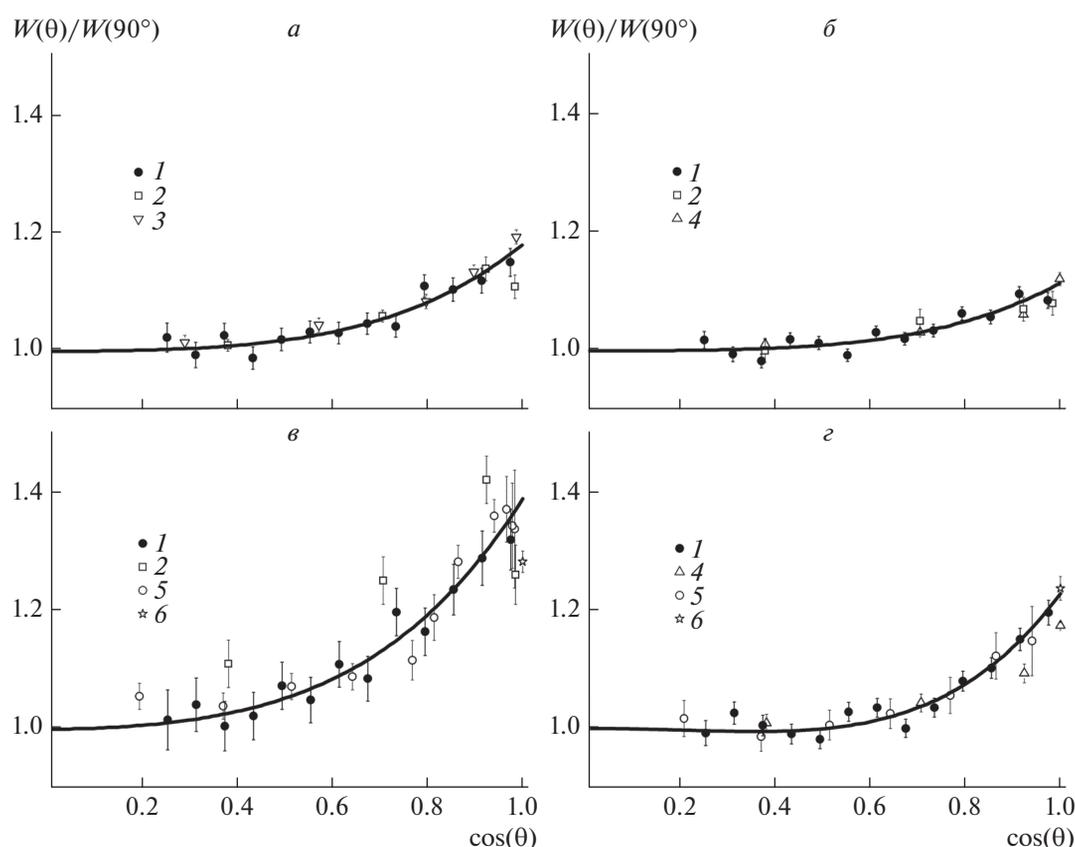


Рис. 1. Угловые распределения осколков деления ²³³U и ²³⁹Pu для двух энергий нейтронов: $E_n = 1.49 \pm 0.16$ МэВ – (а) ²³³U, (б) ²³⁹Pu; $E_n = 15.7 \pm 1.4$ МэВ – (в) ²³³U, (г) ²³⁹Pu. Приведены только статистические погрешности измерений. Экспериментальные данные: 1 – настоящая работа, 2 – [17], 3 – [19], 4 – [20], 5 – [18], 6 – [21]. Сплошные кривые – результат фитирования наших данных суммой четных полиномов Лежандра до 4-го порядка включительно.

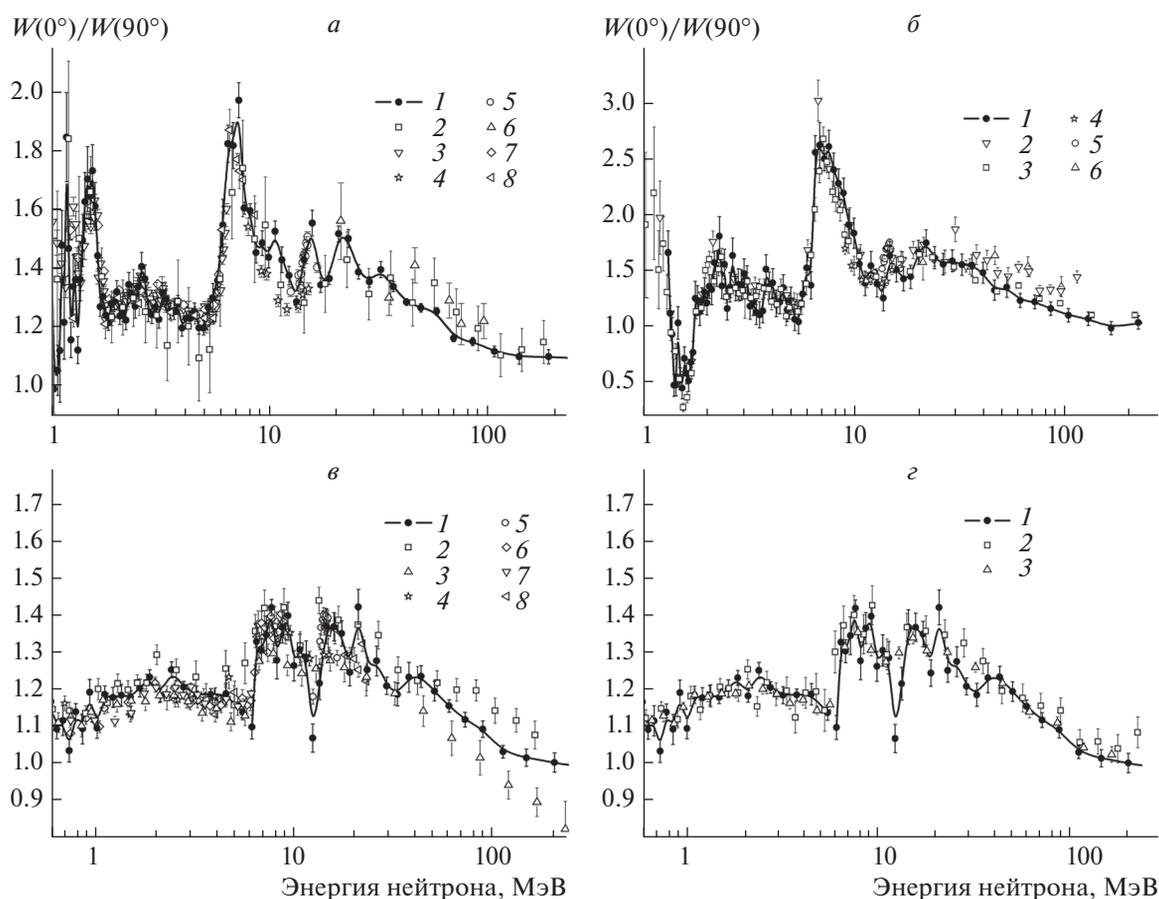


Рис. 2. Анизотропия угловых распределений осколков деления ^{238}U , ^{232}Th и ^{235}U нейтронами с энергией 1–200 МэВ. Результаты измерений настоящей работы – 1 и других авторов: (а) ^{238}U , 2 – [13], 3 – [22], 4 – [23], 5 – [21], 6 – [9], 7 – [24], 8 – [17]; (б) ^{232}Th , 2 – [10], 3 – [12], 4 – [23], 5 – [21], 6 – [9]; (в) ^{235}U , 2 – [13], 3 – [11], 4 – [23], 5 – [21], 6 – [25], 7 – [26], 8 – [17]; (г) ^{235}U , 2 – [14], 3 – [15]. Сплошные кривые на рисунках приведены исключительно для визуализации наших данных и не являются результатом подгонки.

данными других авторов [17–21]. На этом же рисунке приведены результаты фитирования полученных нами распределений суммой четных полиномов Лежандра до 4-й степени включительно. Отметим, что в работах [17, 20] выход осколков $W(90^\circ)$ измерялся непосредственно, тогда как в данной работе и в работах [18, 19, 21] величина $W(90^\circ)$ определялась посредством экстраполяции функции, полученной при фитировании измеренных угловых распределений осколков, к углу $\theta = 90^\circ$. При такой экстраполяции точность определения $W(90^\circ)$ в большей степени зависит от достоверности приближения, используемого при фитировании. Поскольку в результате фитирования суммой четных полиномов Лежандра до 6-й степени включительно описание полученных нами угловых распределений не улучшается (параметры χ^2 близки), в качестве оценки систематической ошибки угловых распределений принят разброс значений $W(90^\circ)$, полученных при экстраполя-

ции измеренных распределений при помощи суммы четных полиномов Лежандра вплоть до 4-й и 6-й степени, соответственно. Определенная таким образом систематическая ошибка в среднем составляет $\sim 0.5\%$ для ядер-актинидов и $\sim 2.6\%$ для ^{nat}Pb и ^{209}Bi .

Принимая во внимание, что в упомянутых работах экспериментальные методики существенно различаются, можно говорить об отсутствии каких-либо значительных систематических ошибок в измеренных угловых распределениях в области энергий нейтронов ниже 20 МэВ. Надежность применяемой в данной работе методики и процедуры обработки данных в указанной области энергий нейтронов также подтверждается тем фактом, что зависимости угловой анизотропии осколков деления от энергии нейтронов, вызывающих деление, имеют структуры, подобные наблюдаемым другими авторами (см. рис. 2, 3).

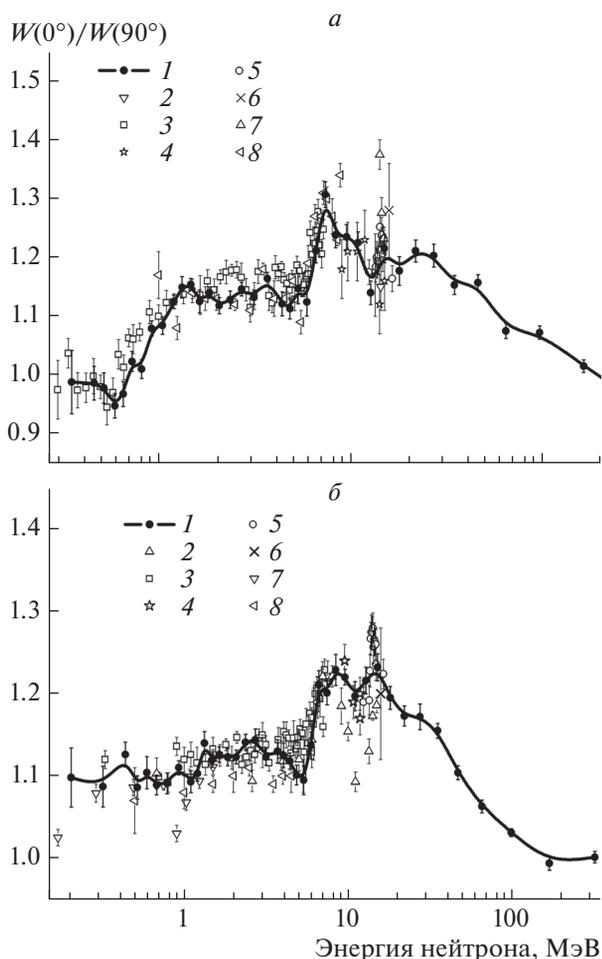


Рис. 3. Анизотропия угловых распределений осколков деления: (а) $^{237}\text{Np}(n, f)$: 1 – настоящая работа, 2 – [27], 3 – [28], 4 – [23], 5 – [21], 6 – [18], 7 – [29], 8 – [17]; (б) $^{239}\text{Pu}(n, f)$: 1 – настоящая работа, 2 – [20], 3 – [30], 4 – [23], 5 – [21], 6 – [18], 7 – [26], 8 – [17]. Сплошные кривые на рисунках приведены исключительно для визуализации наших данных и не являются результатом подгонки.

В области энергий нейтронов выше 20 МэВ для ядер ^{232}Th , ^{235}U и ^{238}U , как отмечалось выше, может быть выполнено сравнение с данными, измеренными на установках n_TOF и LANSCE. На рис. 2 представлены результаты измерений анизотропии осколков деления, выполненные на этих установках. Большая неопределенность данных по угловой анизотропии для ^{238}U , полученных на n_TOF [13] и в работе Рыжова и др. [9], не позволяет выполнить оценку возможных систематических ошибок, хотя, в целом, представленные на рис. 2а данные согласуются между собой. Что касается результатов n_TOF для ^{232}Th , то ситуация неоднозначна: в литературе имеется два набора данных [10] и [12], из которых в базе экс-

периментальных данных EXFOR представлены только данные Таррио и др. [10]. При этом приведенные в работах [10, 12] экспериментальные погрешности малы, но различия этих двух наборов данных значительны и выходят за пределы указанных погрешностей. На рис. 2б выполнено сравнение результатов настоящей работы с имеющимися в литературе экспериментальными данными. Поскольку в работе [12] экспериментальные данные в цифровом виде отсутствуют, представленные на рис. 2б данные были взяты с рисунка из этой работы. В области энергий нейтронов выше 20 МэВ один из двух наборов данных [12], полученных на n_TOF , согласуется в пределах экспериментальных погрешностей с нашими данными, в то время как результаты работы Рыжова и др. [9] и из работы [10] лежат существенно выше. Как отмечалось ранее [1, 2], между нашими данными для ^{235}U [5] и данными, полученными на n_TOF [13] и LANSCE [11], во всем диапазоне энергий нейтронов 1–200 МэВ имеется заметное отличие (рис. 2в). Это обстоятельство стимулировало упомянутые выше научные коллективы к поиску эффектов, которые могут искажать наблюдаемые угловые распределения. Недавно в литературе были опубликованы новые результаты, полученные на установках n_TOF [14] и LANSCE [15]. Сравнение этих и наших данных показывает, что в диапазоне энергий нейтронов 1–200 МэВ угловая анизотропия осколков, измеренная разными группами с использованием различных детекторов и источников нейтронов, совпадает с точностью не хуже чем 1–3% (рис. 2г). Следовательно, для энергий нейтронов выше 20 МэВ можно говорить о малости систематических погрешностей (не более 3%) в данных об энергетической зависимости угловой анизотропии, полученных в настоящей работе. Выполнить более точную оценку возможной систематической ошибки не представляется возможным, поскольку данные, представленные на рис. 2в, отсутствуют в базе данных EXFOR и были взяты с рисунков в упомянутых выше публикациях.

Последние полученные нами данные для $^{239}\text{Pu}(n, f)$ и $^{237}\text{Np}(n, f)$ приведены на рис. 3. В области энергий нейтронов выше 20 МэВ данные по угловой анизотропии осколков деления получены впервые.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках наших исследований, ведущихся на спектрометре ГНЕЙС, на сегодняшний день измерена анизотропия угловых распределений осколков деления ^{nat}Pb , ^{209}Bi , ^{232}Th , ^{233}U , ^{235}U , ^{238}U , ^{237}Np и ^{239}Pu нейтронами промежуточных энергий 1–200 МэВ. Сравнение с результатами, полученными другими группами на аналогичных уста-

новках, указывает на отсутствие в наших данных заметных систематических погрешностей, т.е. на их надежность. Для описания большого объема полученной информации требуется создание новых или совершенствование существующих теоретических подходов. Эти подходы позволяют получить новую информацию о протекании ядерных реакций при промежуточных энергиях и механизме деления.

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.

Работа частично поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-02-00571).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vorobyev A.S., Gagariski A.M., Shcherbakov O.A. et al. // EPJ Web Conf. 2017. V. 146. Art. № 04011.
2. Воробьев А.С., Гагарский А.М., Щербаков О.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. С. 1367; Vorobyev A.S., Gagariski A.M., Shcherbakov O.A. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. P. 1240.
3. Abrosimov N.K., Borukhovich G.Z., Laptev A.V. et al. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 1985. V. 242. P. 121.
4. Щербаков О.А., Воробьев А.С., Иванов Е.М. // ЭЧАЯ. 2018. Т. 49. С. 137; Shcherbakov O.A., Vorobyev A.S., Ivanov E.M. // Phys. Part. Nucl. 2018. V. 49. P. 81.
5. Воробьев А.С., Гагарский А.М., Щербаков О.А. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2015. Т. 102. № 4. С. 231; Vorobyev A.S., Gagariski A.M., Shcherbakov O.A. et al. // JETP Lett. 2015. V. 102. № 4. P. 203.
6. Воробьев А.С., Гагарский А.М., Щербаков О.А. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 104. № 6. С. 377; Vorobyev A.S., Gagariski A.M., Shcherbakov O.A. et al. // JETP Lett. 2016. V. 104. № 6. P. 365.
7. Воробьев А.С., Гагарский А.М., Щербаков О.А. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2018. Т. 107. № 9. С. 547; Vorobyev A.S., Gagariski A.M., Shcherbakov O.A. et al. // JETP Lett. 2018. V. 107. № 9. P. 521.
8. Воробьев А.С., Гагарский А.М., Щербаков О.А. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2019. Т. 110. № 4. С. 222; Vorobyev A.S., Gagariski A.M., Shcherbakov O.A. et al. // JETP Lett. 2019. V. 110. № 4. P. 242.
9. Ryzhov I.V., Onegin M.S., Tutin G.A. et al. // Nucl. Phys. A. 2005. V. 760. P. 19.
10. Tarrío D., Leong L.S., Audouin L. et al. (the n_TOF Collaboration) // Nucl. Data Sheets. 2014. V. 119. P. 35.
11. Kleinrath V. Fission fragment angular distributions in neutron-induced fission of ^{235}U measured with a time projection chamber. PhD Thesis. Vienna: Vienna University of Technology, 2015.
12. Tassan-Got L., Colonna N., Diakaki M. et al. (the n_TOF Collaboration) // EPJ Web Conf. 2019. V. 211. Art. № 03006.
13. Leal-Cidoncha E., Duran I., Paradela C. et al. (the n_TOF Collaboration) // EPJ Web Conf. 2016. V. 111. Art. № 10002.
14. Leal-Cidoncha E., Duran I., Paradela C. et al. (n_TOF Collaboration) // Workshop “Fission Experiments and Theoretical Advances” – FIESTA 2017 (Santa Fe, 2017).
15. Geppert-Kleinrath V., Tovesson F., Barrett J.S. et al. (NIFTE Collaboration). // Phys. Rev. C. 2019. V. 99. Art. № 064619.
16. Zerkin V.V., Pritychenko B. // Nucl. Instr. Meth. 2018. V. 888. P. 31.
17. Simmons J.E., Henkel R.L. // Phys. Rev. 1960. V. 120. P. 198.
18. Iyer R.H., Sagu M.L. // Nucl. Phys. 1970. V. 2. P. 57.
19. Musgrove A.R., Boldeman J.W., Cook J.L. et al. // J. Phys. G. 1981. V. 7. P. 549.
20. Blumberg L., Leachman R.B. // Phys. Rev. 1959. V. 116. P. 102.
21. Андросенко Х.Д., Королев Г.Г., Шпак Д.Л. // ВАНТ. Сер. Яд. конст. 1982. Т. 46. № 2. С. 9.
22. Шпак Д.Л. // ЯФ. 1989. Т. 50. С. 992; Shpak D.L. // Sov. J. Nucl. Phys. 1989. V. 50. P. 574.
23. Leachman R.B., Blumberg L. // Phys. Rev. B. 1965. V. 103. P. 814.
24. Vives F., Hambsch F.-J., Bax H., Oberstedt S. // Nucl. Phys. A. 2000. V. 662. P. 63.
25. Meadows J.W., Budtz-Jorgensen C., The fission-fragment angular distributions and total kinetic energy for $^{235}\text{U}(n, f)$ from 0.18 to 8.83 MeV. Reports № ANL/NDM-64. Illinois: Argonne National Laboratory, 1982.
26. Нестеров В.Г., Смиринкин Г.Н., Шпак Д.Л. // ЯФ. 1966. Т. 4. № 5. С. 399; Nesterov V.G., Smirenkin G.N., Shpak D.L. // Sov. J. Nucl. Phys. 1967. V. 4. P. 713.
27. Brolley J.E., Dickinson W.C. // Phys. Rev. 1954. V. 94. P. 640.
28. Шпак Д.Л., Фурсов Б.И., Смиринкин Г.Н. // ЯФ. 1970. V. 12. P. 35; Shpak D. L., Fursov B.I., Smirenkin G.N. // Sov. J. Nucl. Phys. 1971. V. 12. P. 19.
29. Ouichaoui S., Juhasz S., Varnagy M., Csikai J. // Acta Phys. Hung. 1988. V. 64. P. 209.
30. Шпак Д.Л., Остапенко Ю.Б., Смиринкин Г.Н. // ЯФ. 1971. Т. 13. С. 950; Shpak D.L., Ostapenko Yu.B., Smirenkin G.N. // Sov. J. Nucl. Phys. 1971. V. 13. P. 547.