



МРНТИ 29.15.29, 29.03.47

<https://doi.org/10.32523/2616-6836-2025-150-1-111-126>

Научная статья

Перспективы исследования тройного деления ядер на горизонтальном канале №1 реактора ВВР-К

Д. Бериков*^{1,2}, С. Нуруев^{2,3,4}, Г. Ахмадов^{2,3}, К. Мендибаев^{1,2}, Б. Мухаметулы^{1,2},
К. Ковальчук¹, Т. Жолдыбаев¹, Ю. Копач², К. Назаров^{1,2}, Д. Алимов¹,
Б. Садыков¹, А. Темиржанов^{1,5}

¹Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

²Объединенный Институт ядерных исследований, Дубна, Россия

³Институт радиационных проблем, Баку, Азербайджан

⁴Университет Хазар, Баку, Азербайджан

⁵Satbayev University, Алматы, Казахстан

*Автор для корреспонденции: daniyar.berikov@gmail.com

Аннотация. В статье обсуждаются исследования редких механизмов деления ядер, таких как тройное и четверное деление, возникающие как при спонтанном, так и при вынужденном делении нейтронами. Наша группа ранее провела эксперименты по изучению тройного и четверного спонтанного деления изотопа ^{252}Cf . Следующий этап – исследование тройного деления при вынужденном делении нейтронами.

Подготовлены этапы для проведения исследований тройного деления под нейтронным воздействием, включая создание экспериментальной установки и разработку методик регистрации частиц. Тестовые измерения осуществлялись на реакторе ВВР-К в Алматы. Эксперименты с мишенью ^{239}Pu дали ценные методические результаты, оказывающие значительное влияние на точность последующих исследований. Выводы эксперимента подтверждают необходимость пересмотра технических решений для достижения высоких стандартов точности и надежности исследований.

Ключевые слова: деление ядра, телескопический детектор, легкие заряженные частицы, позиционно-чувствительный кремниевый детектор

Поступила 28.01.2025 После доработки 27.02.2025 Принята к печати 28.02.2025. Доступно онлайн 25.03.2025

¹ *автор для корреспонденции

1. Введение

В настоящее время во многих лабораториях по всему миру активно проводятся исследования редких мод деления ядер, включая тройные и четверные деления [1-3]. Этот растущий интерес объясняется тем, что путем изучения легких заряженных частиц, образующихся в момент разрыва, можно получить ценную информацию о конфигурации делящейся системы в этот критический момент. Анализ таких частиц предоставляет уникальную возможность более глубоко понять динамику процесса деления ядер, включая механизмы, которые лежат в основе образования различных фрагментов. Изучение легких заряженных частиц не только помогает в понимании самого процесса деления, но и открывает новые горизонты для исследования фундаментальных законов ядерной физики. Например, такие исследования могут способствовать определению условий, при которых возможно образование нестабильных изотопов и более сложных фрагментов, что имеет значение как для теоретической физики, так и для практических приложений, таких как ядерная энергетика и безопасность.

Деление атомного ядра с образованием легкой заряженной частицы (ЛЗЧ) называется тройным. При тройном делении в основном (90%) образуются альфа-частицы. Кроме того, наиболее распространенными тройными частицами являются изотопы водорода: протоны, дейтроны и тритоны, которые составляют 1%, 0.5% и 6% соответственно от общего выхода ЛЗЧ. В качестве тройных частиц также наблюдаются изотопы лития, бериллия, бора и углерода. Энергия тройных альфа-частиц достигает 10-40 МэВ, а их пробег в воздухе превышает 10 см, что обуславливает их название длиннопробежных [4, 5].

Следует подчеркнуть, что тройное деление энергетически даже более выгодно, чем бинарное деление, что видно из кривой зависимости средней энергии связи на нуклон в ядре от массового числа A . В действительности, общее энерговыделение при тройном делении на 10-15 МэВ выше, чем при бинарном. Тем не менее, тройное деление происходит гораздо реже (вероятность примерно $3 \cdot 10^{-3}$ от обычного бинарного деления) из-за низкой вероятности образования необходимой начальной деформации ядра.

Деление ядра на четыре и более осколка становится менее выгодным с энергетической точки зрения по сравнению с бинарным делением. Однако с увеличением энергии возбуждения исходного ядра вероятность такого "многоосколочного" деления возрастает. Несмотря на это, четверное деление наблюдается крайне редко, с вероятностью около 10^{-7} - 10^{-6} . Можно выделить два вида четверного деления ядер: истинное, когда все четыре появляющиеся легкие и тяжелые частицы вылетают в узком интервале времени порядка нескольких ядерных времен ($\sim 10^{-21}$ сек), и псевдо четверное, когда происходит тройное деление ядра с вылетом нестабильной ЛЗЧ [5, 6]. Известный пример нестабильной тройной частицы – ${}^8\text{Be}$ с временем жизни порядка 10^{-16} сек для распада ${}^8\text{Be} \rightarrow (\alpha + \alpha)$. Способом отделения истинных четверных $(\alpha + \alpha)$ событий от событий из последовательного распада береллия на $(\alpha + \alpha)$ является анализ угловых корреляций между двумя альфа частицами [7]. В псевдо четверном делении две альфа-частицы попадают в детектор под очень малым углом.

Наша исследовательская группа нацелена на проведение комплексного исследования редких мод деления ядер, которое будет охватывать как спонтанное деление, так и вынужденное деление ядер, вызванное нейтронами. В данном контексте уже была

проведена работа по изучению тройного и четверного спонтанного деления изотопа ^{252}Cf в лаборатории нейтронной физики Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ), где использовались современные позиционно-чувствительные пиксельные детекторы Timerix. В результате этого исследования были получены данные о выходах и энергетических распределениях легких заряженных частиц, которые, как ожидается, значительно расширят существующие знания о процессах деления ядер. Результаты работы скоро будут опубликованы в высокорейтинговых научных журналах, что подчеркивает их значимость. В данной работе также представлены итоги подготовительных этапов, связанных с исследованием тройного деления ядер под воздействием нейтронов. Для этого была разработана и создана экспериментальная установка, а также была отработана методика регистрации и идентификации легких заряженных частиц. Дополнительно было проведено тестовое измерение на первом канале реактора ВВР-К, который расположен в Институте ядерной физики в Алматы.

2. Постановка эксперимента

Для проведения полноценного эксперимента по исследованию тройного деления ядер под воздействием нейтронов сначала необходимо было выполнить методические работы. Следовало проверить, как ведут себя детекторы в условиях пучка, какие фоновые условия существуют, а также увидеть, регистрируем ли мы продукты деления от мишени ^{239}Pu .

Тестовые измерения проводились на первом горизонтальном канале исследовательского реактора ВВР-К [8]. Нейтронный пучок из этого канала сначала проходил через монокристаллический сапфировый фильтр для фильтрации быстрых нейтронов и гамма-лучей. Затем нейтроны проходили через первичную систему коллимации и формировались в пучок размером $200 \times 200 \text{ мм}^2$, который по вакуумной трубе попал в экспериментальный зал. Плотность потока нейтронов на выходе вакуумного нейтронновода составляла $(7.1 \pm 0.5) \cdot 10^6$ тепловых и $(2.9 \pm 0.2) \cdot 10^5$ быстрых нейтронов. После нейтронновода использовался еще один коллиматор из борированного полиэтилена и кадмия, формировавший пучок размером $20 \times 20 \text{ мм}^2$.

Исследуемой мишенью была ^{239}Pu , нанесенная на обе стороны круглой алундовой подложки диаметром 20 мм и толщиной 55 мкг/см^2 . Толщина каждого слоя плутония составляла 45 мкг/см^2 . Мишень была установлена под углом 45 градусов относительно направления падающего пучка нейтронов.

В детекторную часть установки входили три ΔE -E телескопа на основе полупроводниковых кремниевых детекторов, позволяющие идентифицировать и измерить энергии ЛЗЧ тройного и четверного деления. Данный метод основан на одновременном измерении удельных потерь энергии заряженной частицы в веществе dE/dx и ее полной кинетической энергии E . В качестве ΔE -детектора применяются тонкие кремниевые детекторы площадью $10 \times 10 \text{ мм}^2$ и толщиной 15 и 140 мкм, а в качестве E – пиксельные кремниевые детекторы Timerix [9] площадью $14 \times 14 \text{ мм}^2$ и толщиной 300 и 600 мкм. Детектор Timerix состоит из двух основных компонентов: чувствительного сенсора и чипа Timerix. В сенсоре заряженная частица оставляет след в виде свободных носителей заряда, количество которых пропорционально энергии, выделяемой в сенсоре. Эти заряды усиливаются в чипе Timerix, где происходит их анализ, оцифровка и передача

на ПК. Timerix состоит из 65536 независимых пикселей, расположенных в матрице 256×256 . Размер каждого пикселя составляет 55×55 мкм, и каждый из них включает усилитель, дискриминатор с регулируемым порогом и счетчик сигналов. Одним из ключевых преимуществ детектора является то, что позволяет точно визуализировать, в каких именно пикселях был зарегистрирован сигнал.

Для защиты детекторов от осколков деления и от альфа-частиц естественного распада ^{239}Pu перед телескопами были помещены алюминиевые фольги толщиной 27 мкм. Таким образом, телескопы регистрируют только длинопробежные легкие заряженные частицы от редких мод делений. Энергетические спектры частиц получается путем суммирования оцифрованных сигналов от детекторов ΔE и E , с учетом потери энергии в алюминиевой фольге, рассчитанный с помощью компьютерной программы SRIM [10]. Программный пакет SRIM (Stopping Power and Range of Ions into Matter), используя полное квантово-механическое описание столкновений ионов и атомов, позволяет определять тормозную способность вещества и длины пробега ионов (с энергией на нуклон в диапазоне $10 \text{ эВ} \div 2 \text{ ГэВ}$).

Электроника для телескопов ΔE - E базируется на устройстве FITPix COMBO, разработанном Техническим университетом Праги (Чехия) [11, 12]. Вся необходимая электроника, включая компаратор, усилитель и дискриминатор, интегрирована в это устройство, что делает его портативным и компактным. FITPix может использоваться как считывающее устройство Timerix (в том числе для получения импульсов с обратной стороны) или как простое спектрометрическое устройство – Spectrig, при подключении внешнего детектора, например, ΔE -детектора. Вся электроника подключается к компьютеру через USB, включая управление детекторами. Также предусмотрена шина синхронизации для управления сигналом запуска и сигналом «занято», что позволяет эффективно фильтровать непарные события во время измерения совпадений [13]. На рисунке 1 изображен фото ΔE - E телескопа со считывающей электроникой.

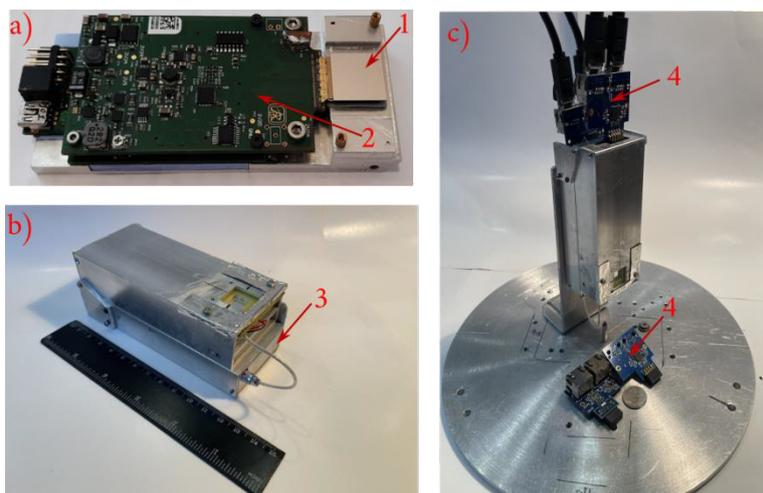


Рисунок 1. а) Детектор Timerix: 1 – пиксельный сенсор детектора, 2 – плата с электроникой FITPix; б) ΔE - E телескоп на основе Timerix детектора: 3 – считывающее устройство Spectrig для ΔE детектора; в) ΔE - E телескоп с шиной синхронизации: 4 – плата с электроникой для синхронизации

Исследуемая мишень, детекторы и вся электроника заключены в вакуумную камеру из нержавеющей стали. Размеры камеры – 425×300×300 мм. Камера была откачена до давления 0.1 мбар.

Калибровка детекторов

Детекторы Timerix могут функционировать в разных режимах: измерение амплитуды, режим счетчика и измерение времени. В данном эксперименте использовался режим измерения амплитуды (Time Over Threshold – TOT), схематически показанный на рисунке 2. Когда выходной сигнал предусилителя превышает порог, дискриминатор создает импульс, длительность которого соответствует времени, когда сигнал выше этого порога. Счетчик отслеживает количество отсчетов встроенного генератора в те моменты, когда сигнал превышает порог. Поскольку ширина сигнала напрямую связана с его амплитудой, число отсчетов, зафиксированных в пиксельном счетчике, пропорционально амплитуде и, следовательно, собранному заряду, оставшемуся от частицы в пикселе. Таким образом, для нахождения связи между отсчетами ToT и энергией E , выделяемой при прохождении частицы, требуется энергетическая калибровка.

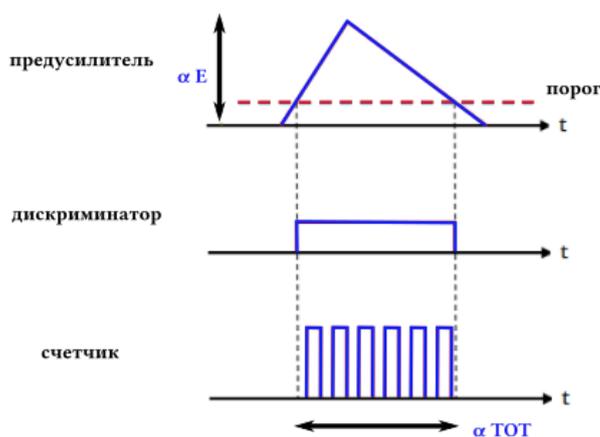


Рисунок 2. Режим измерения амплитуды TOT

Отклик 65536 независимых пикселей детектора Timerix не может быть одинаковым, поскольку каждый пиксель оснащен собственным предусилителем, а параметры усиления варьируются. В режиме ToT объемы кластеров от частиц с одинаковой энергией будут различаться в зависимости от положения детектора. Чтобы решить эту проблему, необходимо провести энергетическую калибровку для каждого пикселя. Калибровка была выполнена с использованием альтернативного метода с источником α -частиц ^{226}Ra [14]. В отличие от стандартной попиксельной калибровки, где анализируются только одинопиксельные треки низкоэнергетических гамма- и рентгеновских лучей, новый метод основывается на оценке распределения заряда в многопиксельных треках альфа-частиц. Более подробную информацию о методе можно найти в [14].

Калибровка ΔE детекторов была проведена для установления зависимости между номером канала амплитудно-цифрового преобразователя (АЦП) и энергией регистрируемой частицы. В качестве калибровочного источника использовался альфа-источник ^{226}Ra , в спектре которого наблюдались шесть отчетливых линий α -распадов в диапазоне 4.5-8 МэВ (рис. 3 а). Во время измерений каждый Si-детектор находился на расстоянии 8 см от источника. В полученном спектре были определены пики, а также установлена связь между номером канала и соответствующей пиковой энергией. Для подгонки точек калибровки использовался полином первой степени с двумя коэффициентами (наклон и смещение), как показано на рисунке 3 б. Из результатов видно, что все детекторы обеспечивают хорошую линейность в диапазоне измеренных энергий. Полученная функция была использована для преобразования каналов в энергию.

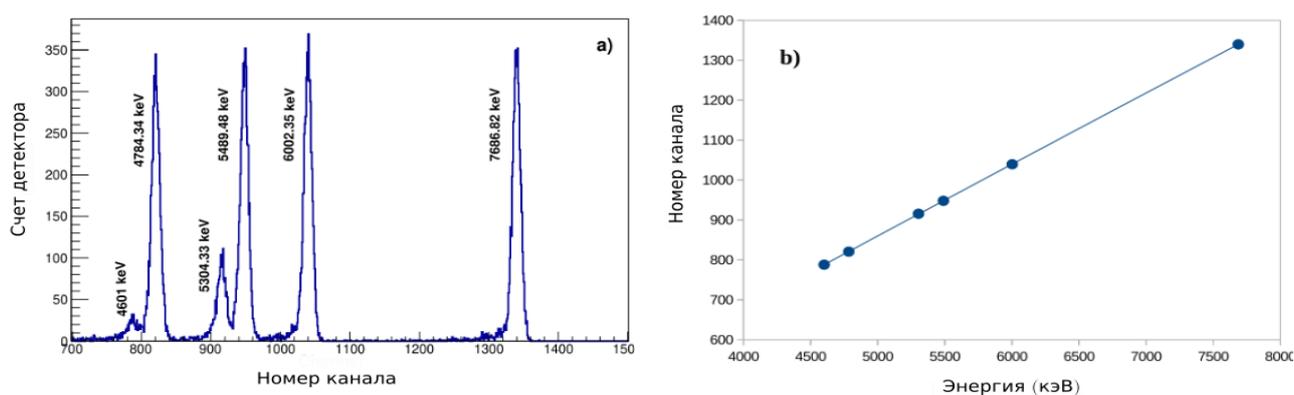


Рисунок 3. а) – Спектральные линии источника ^{226}Ra в вакууме. б) – калибровочная кривая кремниевого детектора

Оценочные результаты

^{239}Pu преимущественно делится под воздействием тепловых нейтронов. На рисунке 4 представлено сечение деления ^{239}Pu , полученное из библиотеки ENDF (Evaluated Nuclear Data File). Используя характеристики делящейся мишени и поток нейтронов, можно оценить количество событий деления по формуле:

$$N_f = \sigma \cdot N_0 \cdot \Phi$$

где σ – сечение деления, N_0 – количество делящихся ядер, Φ – поток нейтронов. Принимая, что вероятность тройного деления составляет $3 \cdot 10^{-3}$ от обычного бинарного деления, мы оцениваем, что в секунду происходит 7 событий тройного деления. Учитывая телесный угол наших детекторов (≈ 0.5 п), мы можем ожидать регистрацию 1 события на три телескопа в 1.2 секунды.

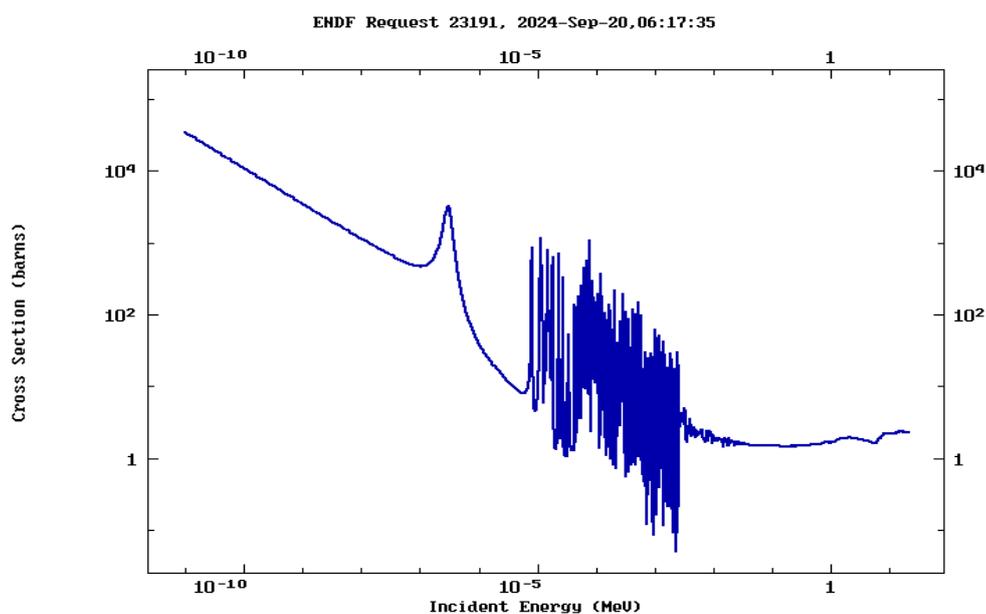


Рисунок 4. Сечение деление ^{239}Pu . Пример из онлайн библиотеки ENDF

Таблицы пробега, полученные с помощью программы SRIM, использовались в качестве входных данных для моделирования эксперимента. Поскольку программа SRIM рассчитывает таблицы для дискретных значений энергий, была проведена интерполяция данных для определения R и ΔE для любой заданной начальной энергии. Таблицы пробегов были созданы для p, d, t, He(4,6,8) в алюминиевой фольге и кремниевых детекторах, с интерполяцией данных с помощью сплайнов. В расчетах вводились толщины всех слоев веществ, которые частица должна пройти до детектора, а затем последовательно рассчитывались ионизационные потери во всех слоях от мишени до детекторов. Эти данные использовались для построения ΔE -E спектров. Результаты представлены на рисунке 5.

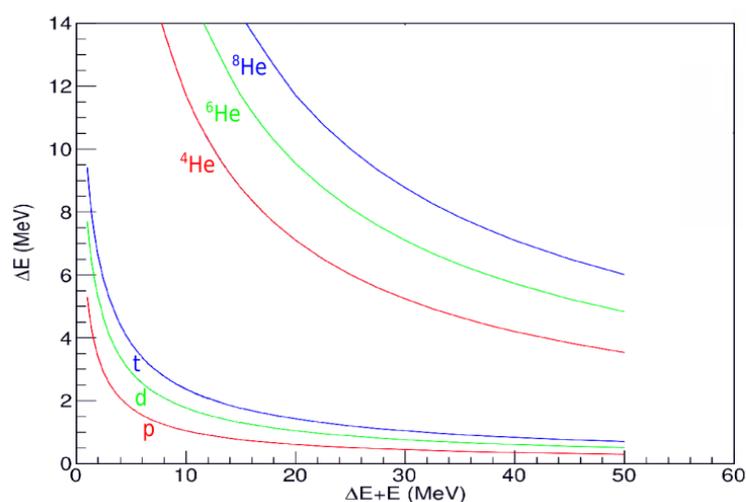


Рисунок 5. ΔE -E спектры легких заряженных частиц полученный с помощью программы SRIM

3. Предварительные результаты и обсуждения

В ходе проведенного тестового пучкового измерения, которое длилось 10 часов, были получены ценные методические результаты, способные существенно повлиять на будущие полноценные эксперименты с пучком. Ключевыми результатами являются следующие факты.

Во-первых, так как первый горизонтальный канал исследовательского реактора ВВР-К обеспечивает прямой обзор активной зоны, в пучке присутствовали значительное количество гамма-квантов. Эти гамма-кванты создали множество фоновых событий в телескопах, что затруднило точность измерений. На рисунке 6 представлены треки частиц, зарегистрированные за 1 секунду детектором Timerix. Из рисунка видно два типа частиц: довольно редко встречающиеся большие, почти круглые треки (называемые каплями), вызванные ударами α -частиц, и часто встречающиеся длинные, обычно изогнутые («червеобразные») следы, вызванные высокоэнергетическими гамма-квантами.

Различия в треках связаны с особенностями взаимодействия легких заряженных частиц и гамма-квантов с кремниевым сенсором. Тяжелые частицы, такие как α -частицы, обладают сильным ионизирующим эффектом, быстро теряют свою энергию и, следовательно, имеют короткий средний линейный пробег. Генерация свободных электронов и дырок происходит близко к верхней поверхности кремниевого сенсора (толщина 300 мкм), после чего свободные заряды движутся к электродам. При движении дырок к нижнему катоду они за счет диффузии проникают в соседние пиксели, и трек выглядит как круглая «капля».

Высокоэнергетические гамма-кванты создают внутри сенсора совершенно иные треки по сравнению с α -частицами. Гамма-излучение может вызывать ионизацию атомов кремния, взаимодействуя с электронами, что приводит к выбиванию электронов из атомов и образованию ионов. В то же время электрон, сталкиваясь с другими частицами, может случайно отклоняться от своего первоначального направления, вызывая появление сигнала в нескольких соседних пикселях. В результате получается искривленная траектория.

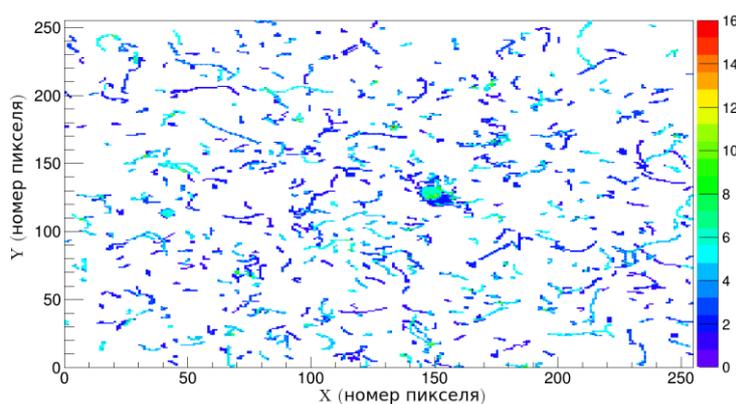


Рисунок 6. Треки частиц, зарегистрированные детектором Timerix

В связи с этим, было предложено усовершенствовать защиту детекторов от гамма-квантов. Известно, что эффективной защитой от гамма-излучения являются материалы с высоким атомным номером и высокой плотностью, такие как свинец или сталь. Эффективность защиты увеличивается с увеличением толщины защитного материала. Кратность ослабления и энергия гамма-излучения в зависимости от толщины свинцовой защиты могут быть рассчитаны по известной таблице [15]. Для минимизации регистрации гамма-квантов телескопами, было рекомендовано установить барьеры из свинцовых кирпичей между кадмиевым коллиматором и вакуумной камерой. Этот шаг является необходимым для снижения уровня фона и повышения качества данных, что в свою очередь потребовало пересмотра существующей системы защиты.

Во-вторых, в главе 2 было отмечено, что компактность и портативность телескопического детектора была достигнута благодаря интеграции всей электроники в одном компактном спектрометрическом считывающем устройстве. Это не только облегчает использование и настройку оборудования, но и позволяет управлять всеми тремя телескопами с помощью одного USB-кабеля, подключенного к компьютеру. Однако в эксперименте, поскольку рабочее место экспериментаторов находится за биологической защитой, приходится использовать длинный USB-кабель. В нашем случае, длина используемого USB-кабеля составила 20 метров. Тестовый эксперимент показал, что такой длинный USB-кабель не обеспечивает надежной передачи сигналов. При высокой нагрузке и больших объемах передаваемой цифровой информации наблюдались частые ошибки, а также случаи, когда USB подключение "выбрасывало", что требовало перезагрузки всей системы. Хоть применялся специальный USB-кабель с повторителями каждые 5 метров с отдельным питанием кабеля, проблемы с надежностью передачи оставили пространство для улучшений.

Использование в будущем свинцовой защиты должно существенно уменьшить объем передаваемой цифровой информации и устранить этих проблем. Кроме того, в данной работе мы предлагаем дополнительно сократить длину USB-кабеля до 15 метров и использовать еще одну отдельную линию питания для обеспечения стабильного функционирования системы. Такие изменения помогут значительно уменьшить количество ошибок и повысить общую надежность и эффективность работы телескопических детекторов в будущем.

Таким образом, можно подвести итог, что результаты пучкового измерения не только открывают новые методы работы, но и требуют пересмотра ряда технических решений, что в конечном итоге приведет к более высоким стандартам точности и надежности в проведении измерений.

4. Заключение

В заключение, наше исследование редких мод деления ядер, включая тройное и четверное спонтанное деление изотопа ^{252}Cf , предоставило важные данные о выходах и энергетических распределениях легких заряженных частиц, что значительно углубляет наше понимание ядерных процессов. Для более глубокого анализа будет полезно

сравнить эти результаты с данными вынужденного деления нейтронами. В этой связи запланирован эксперимент по делению ^{239}Pu с тепловыми нейтронами на реакторе ВВР-К.

В данной статье мы оценили возможность проведения исследований тройного деления ядер на горизонтальном канале №1 реактора ВВР-К. Это сложный эксперимент, на точность которого влияют множество факторов, таких как параметры установки, условия эксперимента и характеристики используемых детекторов, фоновые условия, система сбора и обработки данных и т.д. Тестовые измерения на реакторе ВВР-К выявили важные проблемы, связанные с гамма-фоновыми событиями и надежностью передачи сигналов через длинные USB-кабели. В результате были предложены конкретные технические улучшения, направленные на снижение фона и увеличение стабильности системы. Таким образом, результаты нашего исследования подтверждают необходимость пересмотра существующих подходов и представляют собой шаг к повышению точности и надежности будущих экспериментов.

Работы будут продолжены в рамках цикла исследований, который будет включать как методические аспекты (как в данной работе), так и физические результаты. В этом году мы планируем получить первые спектры от тройных легких заряженных частиц, что станет важным шагом в развитии данной научной области.

Вклад авторов

Д.Б. Бериков – проведение исследований, сбор данных и доказательств, анализ и интерпретация полученных данных. Утверждение окончательного варианта статьи для публикации.

С.М. Нуруев – проведение исследований, анализ и интерпретация результатов работы.

Г.С. Ахмадов – руководство по исследованию, утверждение окончательного варианта статьи для публикации.

К.О. Мендибаев – проведение инструментальных исследований.

Б. Мухаметулы – предоставление измерительных приборов, вычислительных ресурсов и иных инструментов для проведения эксперимента.

К.В. Ковальчук – пробоподготовка образцов.

Т.К. Жолдыбаев – формулировка или развитие ключевых целей и задач.

Ю.Н. Копач – составление черновика рукописи и его критический пересмотр с внесением ценного замечания.

К.М. Назаров – предоставление измерительных приборов, вычислительных ресурсов и иных инструментов для проведения эксперимента.

Д.К. Алимов – составление черновика рукописи. Разработка методологии исследования.

Б.М. Садыков – проведение инструментальных исследований.

А.А. Темиржанов – проведение инструментальных исследований.

Благодарность, конфликт интересов

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № BR21881930). Авторы выражают искреннюю благодарность всей команде, обеспечивающей безопасную и эффективную эксплуатацию исследовательского реактора ВВР-К.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, имеющего отношение к содержанию данной статьи.

Список литературы

1. J. Khuyagbaatar, *Ternary fission with the emission of long-range α -particles in fission of the heaviest nuclei*, Phys. Rev. C. -2024. -V. 110, -P. 014311 – **журнал на англ.языке**
2. A.V. Mahesh Babu et al., *A study on light charged particle accompanied ternary fission of ^{253}Cf* , Physics Open. -2023. -V. 17. -P. 100185 – **журнал на англ.языке**
3. K.P. Santhosh, A. Cyriac, *Quaternary fission in $^{244-254}\text{Cf}$ isotopes with two particles as middle fragments*, Phys. Rev. C. -2020. -V. 101, -P. 044613 – **журнал на англ.языке**
4. G. Ahmadov, *Ternary particles of $Z= 1$ to 4 emitted in spontaneous fission of ^{252}Cf* , Eurasian j. phys. funct. Mater. -2020. -V. 4, -P. 114 – **журнал на англ.языке**
5. G. Ahmadov et al., *Detection of ternary and quaternary fission fragments from ^{252}Cf with a position-sensitive ΔE -E telescope based on silicon detectors*, Physics of Particles and Nuclei Letters, -2015. -V. 12, -P. 542-549 – **журнал на англ.языке**
6. F. Gönnerwein et al., *Quaternary fission*, Heavy Ion Physics, -2003. -V. 2-4, -P. 419-425 – **журнал на англ.языке**
7. F. Gönnerwein et al., *Ternary and quaternary fission*, Europhysics News, -2005. -V. 36, -P. 11 – **журнал на англ.языке**
8. K.M. Nazarov et al., *New neutron radiography and tomography facility TITAN at the WWR-K reactor*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, -2020. -V. 982, -P. 164572 – **журнал на англ.языке**
9. X. Llopart et al., *Timepix, a 65k programmable pixel readout chip for arrival time, energy and/or photon counting measurements*, Nucl. Instrum. Meth. A, -2007. -V. 581, -P. 485 – **журнал на англ.языке**
10. J.F. Ziegler et al., *SRIM, the stopping and range of ions in matter*, Nucl. Instrum. Meth. A, -2010. -V. 268, -P. 1818 – **журнал на англ.языке**
11. M. Holik et al., *FITPix COMBO-Timepix detector with integrated analog signal spectrometric readout*, J. Instrum, -2016. -V. 11, -P. C02032 – **журнал на англ.языке**
12. M. Holik et al., *Miniaturized read-out interface «Spectrig MAPD» dedicated for silicon photomultipliers*, Nucl. Instrum. Meth. A, -2020. -V. 978, -P. 164440 – **журнал на англ.языке**
13. M. Holik et al., *A synchronization and data acquisition system for silicon detectors*, J. Instrum, -2018. -V. 13, -P. C11019 – **журнал на англ.языке**
14. M. Holik et al., *Alpha calibration of the Timepix pixel detector exploiting energy information gained from a common electrode signal*, J. Instrum, -2019. -V. 14, -P. C06022 – **журнал на англ.языке**
15. <https://rad-don.narod.ru/spravka/table1.htm> – **электронный ресурс**

Д. Бериков^{*1,2}, С. Нуруев^{2,3,4}, Г. Ахмадов^{2,3}, Қ. Мендібаев^{1,2}, Б. Мұхаметұлы^{1,2}, К. Ковальчук¹, Т. Жолдыбаев¹, Ю. Копач², К. Назаров^{1,2}, Д. Алимов¹, Б. Садыков¹, Ә. Теміржанов^{1,5}

¹Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

²Біріккен Ядролық Зерттеулер Институты, Дубна, Ресей

³Радиациялық проблемалар институты, Баку, Әзербайжан

⁴Хазар университеті, Баку, Әзірбайжан

⁵Satbayev University, Алматы, Қазақстан

*Хат алмасуға арналған автор: daniyar.berikov@gmail.com

ВВР-К реакторының № 1 көлденең арнасында үштік ядролық бөлінуді зерттеу перспективалары.

Аңдатпа. Мақалада өздігінен (спонтанды) және нейтронды индукцияланған бөлінуде болатын үштік және төрттік бөліну сияқты сирек кездесетін ядролық бөліну механизмдерін зерттеу талқыланады. Біздің топ осыған дейін ²⁵²Cf изотопының үштік және төрттік өздігінен бөлінуін зерттеу бойынша тәжірибелер жүргізген болатын. Келесі кезең - нейтрондық индукциялық бөлінумен үштік бөлінуді зерттеу.

Эксперименттік қондырғыны құру және бөлшектерді тіркеу әдістерін әзірлеуді қоса алғанда, нейтрон әсерінен үштік бөліну бойынша зерттеулер жүргізу кезеңдері дайындалды. Тесттік өлшеулер Алматыдағы ВВР-К реакторында жүргізілді. ²³⁹Pu нысанасымен жүргізілген эксперименттер кейінгі зерттеулердің дәлдігіне елеулі әсер ететін құнды әдістемелік нәтижелер берді. Эксперименттің қорытындылары зерттеулердің жоғары дәлдік және сенімділік стандарттарына жету үшін техникалық шешімдерді қайта қараудың қажеттілігін растайды.

Түйін сөздер: Ядролық бөліну, телескопиялық детектор, жеңіл зарядталған бөлшектер, позицияға сезімтал кремний детекторы

D. Berikov^{*1,2}, S. Nuruyev^{2,3,4}, G. Ahmadov^{2,3}, K. Mendibayev^{1,2}, B. Mukhametuly^{1,2}, K. Kovalchuk¹, T. Zholdybayev¹, Yu. Kопatch², K. Nazarov^{1,2}, D. Alimov¹, B. Sadykov¹, A. Temirzhanov^{1,5}

¹Institute of nuclear physics, Almaty, Kazakhstan

²Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

³Institute of Radiation Problems, Baku, Azerbaijan

⁴Khazar University, Baku, Azerbaijan

⁵Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

*Correspondence: daniyar.berikov@gmail.com

The prospects of studying ternary nuclear fission in horizontal channel No. 1 of the VVR-K reactor.

Abstract. The article discusses the study of rare nuclear fission mechanisms, such as ternary and quaternary fission, which occur during both spontaneous and induced fission by neutrons. Our group previously conducted experiments to investigate the ternary and quaternary spontaneous fission of the isotope ²⁵²Cf. The next stage is to study ternary fission during induced fission by neutrons.

Steps have been prepared for conducting research on ternary fission under neutron irradiation, including the creation of an experimental setup and the development of particle detection methods. Test measurements were carried out at the VVR-K reactor in Almaty. Experiments with the ^{239}Pu target provided valuable methodological results that significantly impact the accuracy of subsequent studies. The conclusions of the experiment confirm the need to revise technical solutions to achieve high standards of accuracy and reliability in research.

Keywords: Nuclear fission, telescopic detector, light charged particles, position-sensitive silicon detector

References

1. J. Khuyagbaatar, *Ternary fission with the emission of long-range α -particles in fission of the heaviest nuclei*, Phys. Rev. C, -2024. -V. 110, -P. 014311
2. A.V. Mahesh Babu et al., *A study on light charged particle accompanied ternary fission of ^{253}Cf* , Physics Open. -2023. -V. 17. -P. 100185
3. K.P. Santhosh, A. Cyriac, *Quaternary fission in $^{244-254}\text{Cf}$ isotopes with two particles as middle fragments*, Phys. Rev. C. -2020. -V. 101, -P. 044613
4. G. Ahmadov, *Ternary particles of $Z= 1$ to 4 emitted in spontaneous fission of ^{252}Cf* , Eurasian j. phys. funct. Mater. -2020. -V. 4, -P. 114
5. G. Ahmadov et al., *Detection of ternary and quaternary fission fragments from ^{252}Cf with a position-sensitive $\Delta E-E$ telescope based on silicon detectors*, Physics of Particles and Nuclei Letters, -2015. -V. 12, -P. 542-549
6. F. Gönnerwein et al., *Quaternary fission, Heavy Ion Physics*, -2003. -V. 2-4, -P. 419-425
7. F. Gönnerwein et al., *Ternary and quaternary fission*, Europhysics News, -2005. -V. 36, -P. 11
8. K.M. Nazarov et al., *New neutron radiography and tomography facility TITAN at the WWR-K reactor*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, -2020. -V. 982, -P. 164572
9. X. Llopart et al., *Timepix, a 65k programmable pixel readout chip for arrival time, energy and/or photon counting measurements*, Nucl. Instrum. Meth. A, -2007. -V. 581, -P. 485
10. J.F. Ziegler et al., *SRIM, the stopping and range of ions in matter*, Nucl. Instrum. Meth. A, -2010. -V. 268, -P. 1818
11. M. Holik et al., *FITPix COMBO-Timepix detector with integrated analog signal spectrometric readout*, J. Instrum, -2016. -V. 11, -P. C02032
12. M. Holik et al., *Miniaturized read-out interface «Spectrig MAPD» dedicated for silicon photomultipliers*, Nucl. Instrum. Meth. A, -2020. -V. 978, -P. 164440
13. M. Holik et al., *A synchronization and data acquisition system for silicon detectors*, J. Instrum, -2018. -V. 13, -P. C11019
14. M. Holik et al., *Alpha calibration of the Timepix pixel detector exploiting energy information gained from a common electrode signal*, J. Instrum, -2019. -V. 14, -P. C06022
15. <https://rad-don.narod.ru/spravka/table1.htm>

Сведения об авторах:

Д.Б. Бериков – автор для корреспонденции, PhD по специальности «Ядерная физика, новые материалы и технологии», старший научный сотрудник, РГП «Институт ядерной физики», Алматы, Казахстан и Объединенного Института ядерных исследований, Дубна, РФ

С.М. Нуруев – научный сотрудник Института радиационных проблем, Баку, Азербайджан и Объединенного Института ядерных исследований, Дубна, РФ

Г.С. Ахмадов – доктор физ-мат. наук, начальник группы физики деления Объединенного Института ядерных исследований, Дубна, РФ

К.О. Мендибаев – PhD по специальности «Ядерная физика, новые материалы и технологии», старший научный сотрудник, Лаборатория ядерных процессов, Объединенный Институт ядерных исследований (Российская Федерация) и РГП «Институт ядерной физики», Алматы, Казахстан

Б. Мухаметулы – PhD, заместитель директора лаборатории по научной работе, объединенного института ядерных исследований, ул. Жолио-Кюри 6, 141980, Дубна, Московская обл., Россия; заместитель главного инженера КИР ВВР-К Института ядерной физики Министерства энергетики Республики Казахстан, ул. Ибрагимова, 1, 050032 Алматы, Казахстан

К.В. Ковальчук – старший научный сотрудник, РГП «Институт ядерной физики», Алматы, Казахстан

Т.К. Жолдыбаев – кандидат физ-мат. наук, ассоциированный профессор, ведущий научный сотрудник, РГП «Институт ядерной физики», Алматы, Казахстан

Ю.Н. Копач – кандидат физ-мат. наук, заместитель директора лаборатории по научной работе, объединенного института ядерных исследований, ул. Жолио-Кюри 6, 141980, Дубна, Московская обл., РФ

К.М. Назаров – PhD, заведующий лабораторией нейтронной физики, РГП «Институт ядерной физики», Алматы, Казахстан

Д.К. Алимов – PhD, заведующий лабораторией физики деления, РГП «Институт ядерной физики», Алматы, Казахстан

Б.М. Садыков – кандидат физ-мат. наук, ведущий научный сотрудник, РГП «Институт ядерной физики», Алматы, Казахстан

А.А. Темиржанов – младший научный сотрудник, РГП «Институт ядерной физики», Алматы, Казахстан.

Д.Б. Бериков – хат-хабар авторы, «Ядролық физика, жаңа материалдар және технологиялар» мамандығы бойынша PhD докторы, РМК Ядролық физика институтының, Алматы, Қазақстан және Біріккен ядролық зерттеулер институтының, Дубна, Ресей Федерациясы аға ғылыми қызметкері

С.М. Нуруев – Радиациялық проблемалар институтының, Әзірбайжан, Баку және Біріккен ядролық зерттеулер институтының, Дубна, Ресей Федерациясы ғылыми қызметкері

Г.С. Ахмадов – физика-математика ғылымдарының докторы, Біріккен ядролық зерттеулер институты, бөліну физикасы тобының жетекшісі, Дубна, Ресей Федерациясы

К.О. Мендибаев – «Ядролық физика, жаңа материалдар және технологиялар» мамандығы бойынша PhD докторы, РМК Ядролық физика институтының, Алматы, Қазақстан және Біріккен ядролық зерттеулер институтының, Дубна, Ресей Федерациясы аға ғылыми қызметкері

Б. Мухаметулы – PhD, Біріккен ядролық зерттеулер институты зертханасы директорының ғылыми жұмыстар жөніндегі орынбасары, Жолио-Кюри 6, 141980, Дубна, Мәскеу облысы, Ресей; Қазақстан Республикасы Энергетика министрлігі КИР ВВР-К Ядролық физика институты бас инженерінің орынбасары, Ибрагимова, 1, 050032 Алматы, Қазақстан

К.В. Ковальчук – аға ғылыми қызметкер, РМК «Ядролық физика институты», Алматы, Қазақстан

Т.К. Жолдыбаев – РМК Ядролық физика институтының ядролық процестер зертханасының жетекші ғылыми қызметкері, физика-математика ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор

Ю.Н. Копач – физика-математика ғылымдарының кандидаты, Біріккен ядролық зерттеулер институты зертханасы директорының ғылыми жұмыстар жөніндегі орынбасары, Жолио-Кюри 6, 141980, Дубна, Мәскеу облысы, Ресей Федерациясы

К.М. Назаров – PhD, РМК «Ядролық физика институты», нейтрондық физика зертханасының меңгерушісі, Алматы, Қазақстан

Д.К. Алимов – PhD, РМК «Ядролық физика институты», бөліну физикасы зертханасының меңгерушісі, Алматы, Қазақстан

Б.М. Садыков – РМК Ядролық физика институтының ядролық процестер зертханасының жетекші ғылыми қызметкері, физика-математика ғылымдарының кандидаты, Алматы, Қазақстан

А.А. Темиржанов – РМК «Ядролық физика институты» ядролық процестер зертханасының кіші ғылыми қызметкері, Алматы, Қазақстан.

D.B. Berikov – corresponding author, PhD in Nuclear Physics, Senior Researcher, RSE «Institute of Nuclear Physics», Almaty, Kazakhstan and Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russian Federation

S.M. Nuruyev – researcher at the Institute of Radiation Problems, Baku, Azerbaijan and the Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russian Federation

G.S. Ahmadov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Fission Physics Group, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russian Federation

K.O. Mendibayev – PhD in Nuclear Physics, Senior Researcher, Laboratory of Nuclear Processes, Joint Institute for Nuclear Research (Russian Federation) and RSE «Institute of Nuclear Physics», Almaty, Kazakhstan

B. Mukhametuly – PhD, Deputy Director of the Laboratory for Research, Joint Institute for Nuclear Research, Joliot-Curie 6, 141980, Dubna, Moscow region, Russia Federation; Deputy Chief Engineer of the WWR-K Research and Development Department of the Institute of Nuclear Physics of the Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan, Ibragimova str., 1, 050032 Almaty, Kazakhstan

K.V. Kovalchuk – Senior Researcher, RSE «Institute of Nuclear Physics», Almaty, Kazakhstan.

T.K. Zholdybayev – Leading Researcher at Laboratory of Nuclear Processes of RSE Institute of Nuclear Physics, PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor

Д. Бериков, С. Нуруев, Г. Ахмадов, К. Мендибаев, Б. Мухаметулы, К. Ковальчук, Т. Жолдыбаев, Ю. Копач, К. Назаров, Д. Алимов, Б. Садыков, А. Теміржанов

Yu.N. Kopatch – candidate of physical and mathematical sciences, deputy director of the laboratory for scientific work, Joint Institute for Nuclear Research, Joliot-Curie st. 6, 141980, Dubna, Moscow region, Russia Federation

K.M. Nazarov – PhD, Head of the Laboratory of Neutron Physics, RSE «Institute of Nuclear Physics», Almaty, Kazakhstan

D.K. Alimov – PhD, Head of the Laboratory of Fission Physics, RSE «Institute of Nuclear Physics», Almaty, Kazakhstan

B.M. Sadykov – Leading Researcher at Laboratory of Nuclear Processes of RSE «Institute of Nuclear Physics», PhD in Physics and Mathematics, Almaty, Kazakhstan

A.A. Temirzhanov – Junior Researcher, «Institute of Nuclear Physics», Almaty, Kazakhstan.



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).