

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ ИМЕНИ И.М.ФРАНКА

На правах рукописи

Энхболд Сансарбаяр

Экспериментальные исследования реакции (n, α) с быстрыми нейтронами на изотопах ^{40}Ca , ^{66}Zn , ^{91}Zr и ^{144}Sm при помощи ионизационной камеры

1.3.15 – Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико–математических наук

Дубна
2023

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики имени И.М.Франка
Объединенного института ядерных исследований.

Научные руководители: ГЛЕДЕНОВ Юрий Михайлович
*доктор физико–математических наук,
ведущий научный сотрудник.
Лаборатория нейтронной физики
имени И.М.Франка ОИЯИ*

ХУУХЭНХУУ Гончигдорж
*кандидат физико–математических наук,
профессор, руководитель сектора
ядерных данных.
Центр ядерно–физических исследований,
Монгольского Государственного
Университета, г.Улаанбаатар, Монголия.*

Официальные оппоненты:

С электронной версией диссертацией можно ознакомиться на официальном сайте Объединенного института ядерных исследований в информационно–телекоммуникационной сети «Интернет» по адресу: <http://dissertations.jinr.ru>.

С печатной версией диссертации можно ознакомиться в Научно–технической библиотеке ОИЯИ (г. Дубна, Московская область, ул. Жолио–Кюри, д. 6).

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико–математических наук

А.Г. ПОПЕКО

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Исследование индуцированных быстрыми нейтронами реакций с вылетом заряженных частиц представляет большой интерес для решения фундаментальных проблем структуры ядра и механизмов взаимодействия нейтронов с ядрами, а также позволяют получать ценную информацию для реакторной технологии, в частности, для оценки нагрева, радиационных дефектов и накопления водорода и гелия в конструкционных материалах.

Для теоретического описания нейтронных реакций используются, в основном, три модели, учитывающие компаунд, предравновесные и прямые процессы. В области энергии нейтронов несколько МэВ лежат пороги большинства нейтронных реакций с вылетом заряженных частиц и может происходить переход от одного типа механизма реакции к другому. Экспериментальные исследования реакции (n, α) до недавнего времени проводились, в основном, на быстрых нейтронах ~ 14 МэВ. Что касается нейтронов в области энергии несколько МэВ, то существующие экспериментальные данные крайне скудны и противоречивы. Кроме того, большинство экспериментов по исследованию реакции (n, α) проводились активационными методами, из которых невозможно получить спектр и угловые распределения продуктов реакции.

Ядерные реакции с нейтронами играют важнейшую роль во многих астрофизических сценариях. Например, практически все элементы тяжелее железа были произведены в звездах и сверхновых, где нейтронные взаимодействия являются доминирующими. Последнее время появились новые данные с современных астрофизических обсерваторий и измерений изотопических аномалий в метеоритах, которые позволяют очень детально рассматривать результаты нуклеосинтеза. Более реалистичные модели звезд и сверхновых дают возможность с использованием мощных компьютеров изучать такие проблемы как химическая эволюция галактики и формирование нашей солнечной системы. Однако дальнейший прогресс здесь заторможен недостатком точных данных по скоростям реакций, участвующих в нуклеосинтезе. Эти данные могут быть получены из измерений сечений. Так как данные по сечениям реакций с участием α -частиц практически отсутствуют, при разработке различных сценариев нуклеосинтеза применяют расчетные значения сечений, выполненные по моделям с использованием α -частичного оптического потенциала. Поэтому большое значение имеют измерения сечений реакции (n, α) , в расчетах которой используется такой же α -частичный потенциал. Таким образом экспериментальные данные по реакции (n, α) для ядер от легких до тяжелых и большого диапазона энергии нейтронов позволяет существенно улучшить параметры глобального

оптического α -частичного потенциала, используемого в расчетах.

Для получения точных данных о ядерных реакциях необходимо опираться на тесное сочетание экспериментальных измерений и теоретического анализа. Однако развитие эксперимента ограничено различными экспериментальными условиями и может получить данные только о конкретных ядерных реакциях в определенной области энергий, кроме того, надежные результаты требуют повторных измерений и многократных экспериментальных проверок. Теоретический анализ ядерных реакций не ограничивается экспериментальными условиями, и система может быть получена путем теоретических расчетов в форме функции возбуждения и угловых распределений. Однако современная теория моделей ядерных реакций требует определения конкретных параметров модели (таких, как параметры оптической модели, параметры плотности уровней энергии и т. д.). Полученные результаты могут отличаться на порядок при использовании различных параметров модели, и только путем сравнения с экспериментальными результатами можно выбрать подходящие. Поэтому экспериментальное исследование ядерных реакций очень важно для содействия совершенствованию теории ядерных реакций.

Изучение реакции (n, α) на быстрых нейтронах представляет большой интерес в области ядерной техники, в частности, для оценки радиационного повреждения конструкционных материалов ядерных установок, выбора технических материалов в расчетах при разработке новых объектов атомной энергетики. Например, α -частицы, испущенные в результате реакции (n, α) , приводят к накоплению в материалах гелия с образованием пузырьков, вызывая радиационные повреждения материалов, таких как набухание, охрупчивание и деформации.

В настоящее время при проектировании энергетических установок, обосновании защит различного назначения, повсеместно используются расчетные методы моделирования взаимодействия излучения с веществом. Точность этих расчетов напрямую зависит от точности предоставляемых в расчетах ядерных констант. В этих условиях в расчет закладываются теоретические оценки, отличие которых от реальных значений может достигать десятки, а то и сотни процентов, что напрямую отражается на результатах моделирования. Библиотеки ядерно-физических констант, созданные мировым сообществом, к настоящему времени, в основном обеспечивают необходимую точность расчетов при использовании традиционных реакторных технологий. Реакция $^{40}\text{Ca}(n, \alpha)^{37}\text{Ar}$ является одним из источников ^{37}Ar в газовых отходах ядерного реактора, которая протекает на примеси кальция, присутствующей в материалах реактора [1]. Так, например, радиационное повреждение бетонных защитных материалов можно оценить с помощью сечения реакции $^{40}\text{Ca}(n, \alpha)^{37}\text{Ar}$ [1]. Вследствие того, что интерес

к таким материалам появился относительно недавно, данные о ядерных реакциях для некоторых из них отсутствуют или недостаточно точны. Имеются большие различия между разными оценками и требуются точные и систематические измерения и анализ реакции $^{40}\text{Ca}(n, \alpha)^{37}\text{Ar}$, особенно для энергий нейтронов выше 6 МэВ.

Одним из важных структурных элементов в реакторных системах является цирконий. Циркониевые сплавы используются для твэлов в атомных реакторах из-за их малого сечения поглощения для нейтронов. Кроме того, цирконий используется в бланкете и первой стенке термоядерных реакторов из-за его стойкости к высоким температурам. Следовательно, имеется необходимость в надежных ядерных данных для изотопов циркония. В настоящее время данных по сечению реакции $^{91}\text{Zr}(n, \alpha)^{88}\text{Sr}$ в МэВ-ой области энергии нейтронов не имеется.

В свою очередь изотопы самария являются продуктами деления с относительно высоким выходом в атомных реакторах, а цинк является одним из конструкционных материалов для ядерных реакторов и других установок высокой энергии, поэтому точное знание их нейтронных сечений может быть важным для приложений ядерных технологий. Однако экспериментальные измерения для реакций $^{144}\text{Sm}(n, \alpha)^{141}\text{Nd}$ и $^{66}\text{Zn}(n, \alpha)^{63}\text{Ni}$ весьма скудны. Для реакции $^{144}\text{Sm}(n, \alpha)^{141}\text{Nd}$ существуют только два измерения при энергиях нейтронов около 14 МэВ, и между ними есть большие различия [2]. Для реакции $^{66}\text{Zn}(n, \alpha)^{63}\text{Ni}$ измерения для энергий нейтронов от 0 до 20 МэВ не проводились. Хотя большинство проанализированных библиотек ядерных данных содержат эти две реакции [3, 4], между ними существуют большие расхождения, как в оценках, так и в величине [5]. Таким образом, требуются точные измерения для удовлетворения потребностей приложений и устранения значительных несоответствий между различными библиотеками.

В силу вышесказанного получения новых экспериментальных данных и уточнение теоретических оценок подтверждает **актуальность темы диссертации.**

Целью данной диссертационной работы является измерение экспериментальных сечений реакции (n, α) на изотопах ^{40}Ca , ^{66}Zn , ^{91}Zr и ^{144}Sm в области энергий нейтронов 3,9 – 9,5 МэВ.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи:**

1. Разработана и реализована новая усовершенствованная методика измерения сечений реакции (n, α) .
2. Спроектирована и создана новая конструкция α -спектрометра, для исследования сечения (n, α) реакции на быстрых нейтронах.

3. Разработана и создана нейтрон–производящая газовая дейтериевая мишень.
4. Создан новый сцинтилляционный детектор для регистрации быстрых нейтронов.
5. Проведены измерения сечения реакции $^{66}\text{Zn}(n, \alpha)^{63}\text{Ni}$ в области энергий нейтронов 4,0; 5,0; 6,0 МэВ.
6. Проведены измерения сечения реакции $^{144}\text{Sm}(n, \alpha)^{141}\text{Nd}$ в области энергий нейтронов 4,0; 5,0; 6,0 МэВ.
7. Проведены измерения сечения реакции $^{40}\text{Ca}(n, \alpha)^{37}\text{Ar}$ в энергетическом диапазоне от 8,5 МэВ до 9,5 МэВ.
8. Проведены измерения сечения реакции $^{91}\text{Zr}(n, \alpha)^{88}\text{Sr}$ в области энергий нейтронов 3,9; 4,3; 5,0; 5,3 МэВ.

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

1. Разработаны методика и спектрометр на основе ионизационной камеры для исследования реакции (n, α) .
2. Впервые получены результаты экспериментального исследования сечений реакции $^{66}\text{Zn}(n, \alpha)^{63}\text{Ni}$ в области энергий нейтронов 4,0 – 6,0 МэВ.
3. Впервые получены результаты экспериментального исследования сечений реакции $^{144}\text{Sm}(n, \alpha)^{141}\text{Nd}$ в области энергий нейтронов 4,0 – 6,0 МэВ.
4. Впервые получены результаты экспериментального исследования сечений реакции $^{91}\text{Zr}(n, \alpha)^{88}\text{Sr}$ в области энергии нейтронов 3,9 – 5,3 МэВ.
5. Получены результаты экспериментального исследования сечения реакций $^{40}\text{Ca}(n, \alpha_0)^{37}\text{Ar}$ и $^{40}\text{Ca}(n, \alpha)^{37}\text{Ar}$ в пяти точках энергии нейтронов в области энергий 8,5 – 9,5 МэВ.

Теоретическая и практическая значимость.

Измеренные сечения включены в базы данных и уже используются в области ядерной физики и при оценке накопления ядер гелия, влияющих на свойства конструкционных материалов, работающих в нейтронных полях. Кроме того, средние отклонения между различными библиотеками данных и теоретическими расчетами отличаются до нескольких раз.

Представленные данные для реакции (n, α) должны быть полезны для уточнения расхождений в различных библиотеках и теоретической оценки и уже используются для уточнения параметров некоторых новейших компьютерных кодов. Некоторые из разработанных нами спектрометров заряженных частиц уже работают в различных лабораториях мира.

Методология и методы исследования.

Первая часть работы теоретическая (современное состояние экспериментальных данных и оценок, теория реакций, обзор кода TALYS для теоретических расчетов, обзор существующих методов измерения сечения реакции (n, α)), вторая – экспериментально методическая, третья глава посвящена полученным экспериментальным данным и анализу полученных результатов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработаны методика и спектрометр на основе ионизационной камеры для исследования (n, α) реакции.
2. Впервые получены результаты экспериментального исследования сечений реакции $^{66}\text{Zn}(n, \alpha)^{63}\text{Ni}$ в области энергий нейтронов 4,0 – 6,0 МэВ.
3. Впервые получены результаты экспериментального исследования сечений реакции $^{144}\text{Sm}(n, \alpha)^{141}\text{Nd}$ в области энергий нейтронов 4,0 – 6,0 МэВ.
4. Впервые получены результаты экспериментального исследования сечений реакции $^{91}\text{Zr}(n, \alpha)^{88}\text{Sr}$ в области энергии нейтронов 3,9 – 5,3 МэВ.
5. Получены результаты экспериментального исследования сечения реакций $^{40}\text{Ca}(n, \alpha_0)^{37}\text{Ar}$ и $^{40}\text{Ca}(n, \alpha)^{37}\text{Ar}$ в пяти точках энергии нейтронов в области энергий 8,5 – 9,5 МэВ.

Степень достоверности и апробация результатов. Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях:

- The IV International Scientific Forum “Nuclear science and Technologies” (Алматы, Республика Казахстан 26–30 сентября 2022)
- 28th International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei (Дубна, Россия 24–28 мая 2021)
- 21st International Workshop on Radiation Imaging Detectors (Крит, Греция 7–12 июля 2019)

- 26th International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei (Сиань, Китай, 28 мая – 1 июня 2018)
- 25th International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei (Дубна, Россия 22–26 мая 2017)
- ND2016 – International Conference on Nuclear Data for Science and Technology (Брюгге, Бельгия, 11–16 сентября 2016)
- 23th International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei (Дубна, Россия 25–29 мая 2015)

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 10 работ, из них 6 в реферируемых журналах, рекомендованных ВАК, которые входят в базу данных Scopus и РИНЦ.

Личный вклад автора.

- Автор внес определяющий вклад в разработку и создание α -спектрометра на базе ионизационной камеры с сеткой. Для спектрометра реализована цифровая система сбора и анализа данных, а также обработка полученной информации.
- Автором выполнена работа по проектированию и созданию газовой нейтрон-генерирующей мишени, а также реализован метод измерения спектра моноэнергетических нейтронов, получаемого с помощью сцинтилляционного детектора.
- На основе Монте-Карло моделирования, выполненного с использованием программного пакета MATLAB, найдены условия постановки экспериментов, обеспечивающих надежную регистрацию и выделение событий.
- Проведена в полном объеме обработка экспериментальных результатов измерений, а также двумерных и одномерных спектров для следующих реакций: $^{144}\text{Sm}(n, \alpha)$, $^{66}\text{Zn}(n, \alpha)$, $^{40}\text{Ca}(n, \alpha_0)^{37}\text{Ar}$ и $^{40}\text{Ca}(n, \alpha)^{37}\text{Ar}$, $^{91}\text{Zr}(n, \alpha)^{88}\text{Sr}$.
- Впервые определены сечение для следующих реакций:
 1. $^{66}\text{Zn}(n, \alpha)^{63}\text{Ni}$ и $^{144}\text{Sm}(n, \alpha)^{141}\text{Nd}$ в области энергий нейтронов 4,0 – 6,0 МэВ;
 2. $^{91}\text{Zr}(n, \alpha)^{88}\text{Sr}$ в области энергии нейтронов 3,9 – 5,3 МэВ;

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка использованных источников. Содержание работы изложено на 95 страницах, включая 35 рисунков и 9 таблиц. Список использованных источников состоит из 96 наименований.

1 Содержание работы

Во **введении** показана актуальность темы исследования, представлены обзор литературы и постановка проблемы. В настоящей работе показано значение исследования реакции (n, α) , сформулированы цели, новизна полученных результатов, обоснована их научная и практическая ценность. Приведены основные положения, выносимые на защиту, личный вклад автора, апробация.

Первая глава посвящена обзору литературы, в котором описывается современное состояние экспериментальных данных и оценок для реакции (n, α) . Так же описана теория ядерных реакций, и полная картина оптической модели, включая компаунд, предравновесные и прямые процессы. Также описан программный код TALYS-1.9 [6] для теоретических расчетов, который широко используется, в том числе и нами при анализе экспериментальных данных.

Во **второй главе** описаны основные модули экспериментальной установки ЛНФ ОИЯИ (Дубна), Китайского института атомной энергии, Пекинского университета (Пекин, КНР): источники квазимоноэнергетических нейтронов, мониторы для измерения потока нейтронов, детектор заряженных частиц (ИК), камера деления. Также описан метод получения спектра быстрых нейтронов способом Unfolding [7]. Приведены рабочие параметры камеры и выбор рабочего газа.

Детали измерений

Измерения проводились на пучках быстрых нейтронов из реакции $D(d, n)$ ускорителей Ван де Грааф ЭГ-5 (Дубна), ЭГ-4.5 (ПКУ, г. Пекин), и на тандемном ускорителе НИ-13 Китайского института атомной энергии. На схеме эксперимента рис. 1 представлены три основные части: источник нейтронов, детектор α -частиц с образцами и мониторы нейтронного пучка.

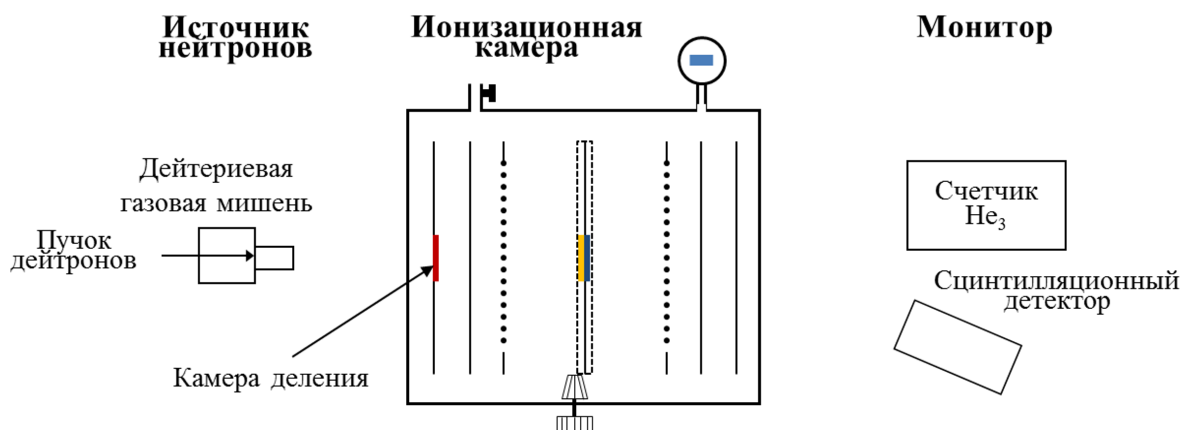


Рис. 1: Схема экспериментальной установки

Источник нейтронов

Электростатические генераторы широко используются в качестве источника нейтронов различных энергий. Наиболее известным ускорителем прямого действия является электростатический генератор (генератор Ван де Граафа), где частицы или ионы ядер ускоряются непосредственно за счет одно – или двукратного (в тандемах) прохождения огромной постоянной разности потенциалов V , достигающей 20 миллионов вольт. Частица, имеющая заряд Z_e , приобретает в таком ускорителе кинетическую энергию $T = Z_e V$. Существенным преимуществом ускорителей прямого действия является непрерывность, высокая интенсивность и высокая стабильность по энергии ускоренного пучка (0.01%). Пучки моноэнергетических быстрых нейтронов были получены из реакции ${}^2\text{H}(d, n){}^3\text{He}$ на газовых мишенях. Быстрые нейтроны в диапазоне от 3,9 – 5,3 МэВ были получены на электростатическом генераторе ЭГ–5 (Дубна). На ускорителе ЭГ– 4.5 МэВ в Пекинском университете, получены нейтроны с энергией 4,0 – 6,0 МэВ. Нейтроны в диапазоне энергий 8,5 – 9,5 МэВ получены на тандемном ускорителе НН–13 Китайского института атомной энергии.

Мониторы потока нейтронов и измерение абсолютного потока нейтронов

В качестве мониторов потока нейтронов используются длинные счетчики с BF_3 (в г. Пекине) и ${}^3\text{He}$ (в г. Дубне). Кроме того, используются жидкие сцинтилляционные детекторы EJ–309 и стильбен, соответственно. Абсолютный поток нейтронов определяется по регистрации осколков деления ${}^{238}\text{U}$.

Детектор заряженных частиц

В качестве детектора заряженных частиц используется вдвоенная ионизационная камера с сеткой, имеющая симметричную структуру относительно общего катода, и оборудованная управляемым снаружи специальным устройством смены образцов внутри ИК. Корпус ионизационной камеры выполнен из нержавеющей стали толщиной 2,0 мм и имеет цилиндрическую форму. Высота ионизационной камеры 27,3 см, радиус 14,2 см. На днище ИК имеются 5 сигнальных и 5 высоковольтных вакуумных разъемов SHV, через которые можно подавать высокое напряжение до 5 кВ на электроды ИК. Наличие дополнительных сигнальных и высоковольтных коннекторов позволило расширить компоновку ИК внутри корпуса установкой дополнительных секций ИК для регистрации осколков деления из реакции ${}^{238}\text{U}(n, f)$, используемых для измерения потока нейтронов в качестве монитора. В верхней части корпуса ИК находятся вентили для откачки и наполнения и цифровой манометр для отображения вакуума при откачке и давления рабочего газа при наполнении с точностью 0,001 бар. Корпус испытан на давление 10 атмосфер, рабочее давление допустимо

до 5 атмосфер. Форма анода ионизационной камеры и камеры деления – квадрат со стороной 18,0 см, толщиной 1,0 мм, материал – алюминиевая пластина. Сетка представляет собой квадратную рамку с длиной внешней стороны 19,0 см и длиной внутренней стороны 16,0 см. Сетки намотаны позолоченными вольфрамовыми проволочками диаметром 0,1 мм с шагом 2,0 мм. Передняя и задняя часть катодной пластины покрыты листом Та толщиной 0,1 мм для уменьшения фона, создаваемого материалом катодной пластины. Вращающийся диск состоит из алюминиевой пластины толщиной 2,0 мм с пятью целевыми позициями на ней. Таким образом, в камеру может быть помещено одновременно 10 образцов в геометрии “back-to-back”, по 5 в каждой секции, и, благодаря конструкции электрода, только два из них могут находиться в пучке. Нижняя часть алюминиевой пластины устройства смены образцов соединена с передаточным механизмом, и, поворачивая ручку в нижней части экранной ионизационной камеры, алюминиевую пластину можно вращать, не открывая ИК, тем самым сохраняя начальные условия эксперимента для основных, фоновых и калибровочных измерений.

Электроника α -спектрометров

Сигналы с различных электродов ИК усиливали и затем оцифровывали с помощью оцифровщиков формы импульсов. Нами использовались две системы накопления и сбора и обработки сигналов (DAQ): 1) PXI с оцифровщиком PXIE-16 [8] и ЦРС-16 (ЭГ-5 ЛНФ) и 2) PDA14 (ЭГ-4.5, ПУ).

Третья глава посвящена исследованию реакции (n, α) на быстрых нейтронах. Представлена в качестве примера симуляция измерений сечения реакции (n, α) на ^{35}Cl и ^{91}Zr . Представлены полученные экспериментальные данные по измерению сечения реакции (n, α) на ядрах: ^{144}Sm , ^{66}Zn , ^{91}Zr , ^{40}Ca в МэВ-ой области энергии нейтронов. Для некоторых изотопов сечения были измерены впервые и сравнены с существующими оценками и библиотечными данными.

Симуляция измерений

Прежде, чем приступить к измерениям, были проведены расчеты, чтобы предсказать экспериментальные спектры, и возможные интерференционные реакции, в том числе (n, p), (n, α) реакции на Sm, Zr, Ca, Zn, Cl, Kr, Xe, O (утечка из воздуха -0,05%), N (утечка из воздуха -0,1%), Na, Ba, $^1\text{H}(n, p)$. Моделирование проводилось для твердых образцов NaCl, BaCl₂, ZrO₂, Sm₂O₃, Zn толщиной 100–700 мкг/см² в диапазоне энергий падающих нейтронов 3,3 – 11,0 МэВ. Расчеты проводились с использованием компьютерного кода MATLAB, и на основе энергии и углового распределения испускаемых частиц от различных ядерных реакций, рассчитывались программой TALYS-1.9. Также учтены потери энергии α -частиц в образцах разных толщин, разных компонентов камеры и в рабочих газах, которые

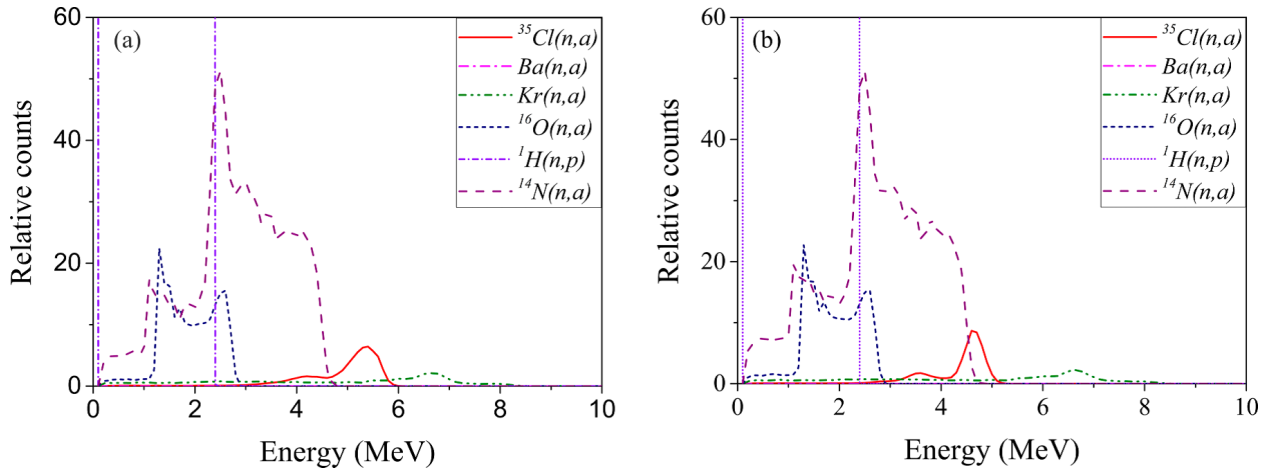


Рис. 2: Рассчитанные энергетические спектры α -частиц из реакции $^{35}\text{Cl}(n, \alpha)^{32}\text{P}$ при $E_n = 5,0$ МэВ (а) в направлении вперед и (б) назад [10].

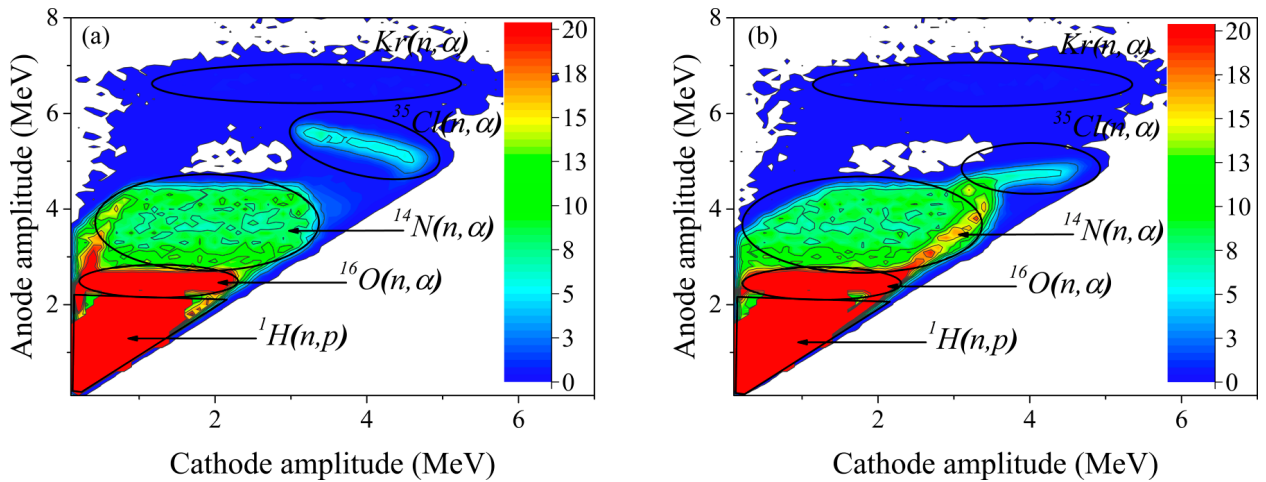


Рис. 3: Двумерные рассчитанные катодно-анодные спектры α -частиц из реакции $^{35}\text{Cl}(n, \alpha)^{32}\text{P}$ при $E_n = 5,0$ МэВ, (а) в направлении вперед и (б) назад с учетом вклада фоновых реакций [10].

рассчитывались при помощи кода SRIM-2013 [9] с учетом геометрии детектора.

В качестве примера выше представлены смоделированные спектры для измерений на твердом образце ^{35}Cl (рабочий газ $\text{Kr}+3\%\text{CH}_4$ при давлении 0,6 атм.), и ^{91}Zr (рабочий газ $\text{Kr}+4\%\text{CO}_2$ при давлении 1,3 атм.) Расчеты выполнены для диапазона энергии нейтронов 3,9 – 5,3 МэВ. В качестве иллюстрации ниже приведены результаты таких расчетов для $E_n = 5,3$ МэВ. В расчетах определены ожидаемые позиции событий от исследуемой реакции, а также от фоновых реакций, которые могут маскировать эффект. На рис. 2 показаны рассчитанные одномерные спектры, где α -частицы из образца вылетают в направлении вперед [рис.2(а)] и назад [рис. 2(б)] относительно пучка нейтронов, а на рисунках 3 и 4 – двумерные катод-анод

энергетические спектры α -частиц из реакции $^{35}\text{Cl}(n, \alpha)^{32}\text{P}$ при $E_n = 5,0$ МэВ.

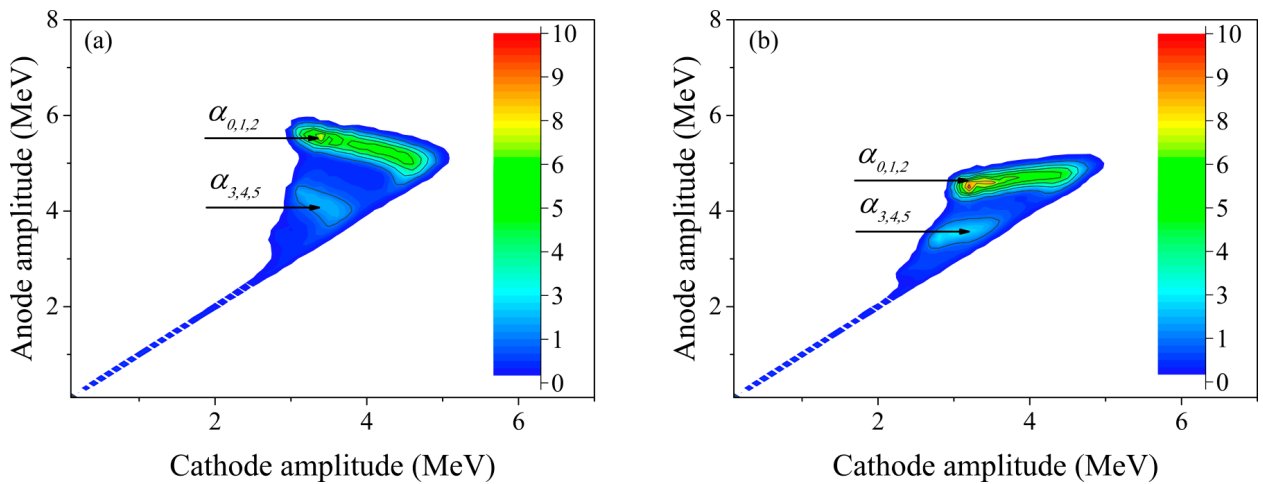


Рис. 4: Чистые (без учета фона) двумерные рассчитанные катодно-анодные спектры α -частиц из реакции $^{35}\text{Cl}(n, \alpha)^{32}\text{P}$ при $E_n = 5,0$ МэВ, (а) в прямом и (б) обратном направлениях [10]

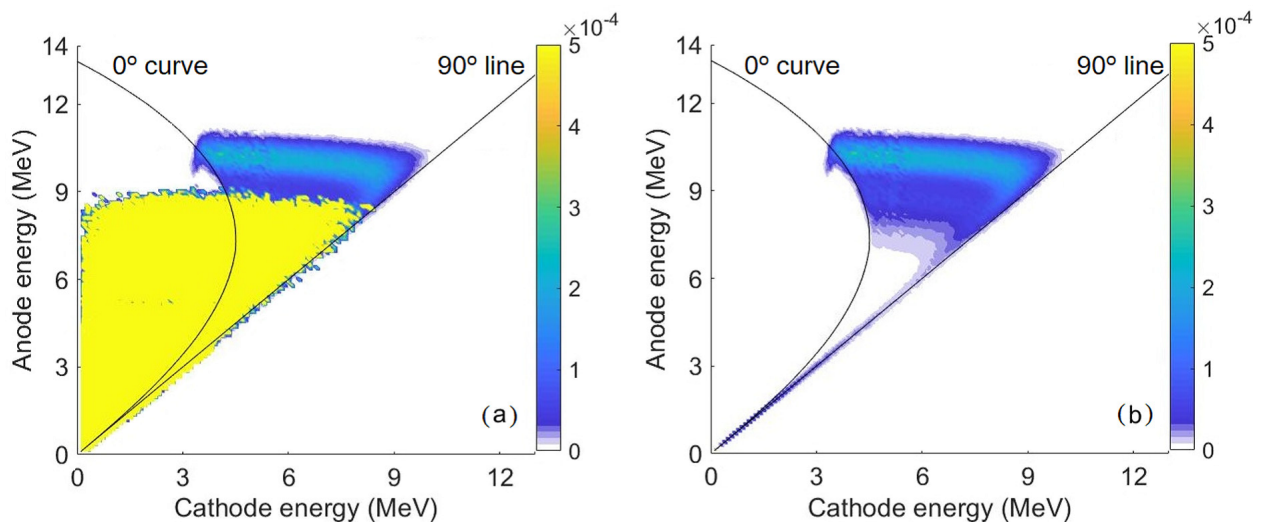


Рис. 5: Расчетные двумерные катод-анодные двумерные спектры α -частиц реакции $^{91}\text{Zr}(n, \alpha)^{88}\text{Sr}$ при $E_n = 5,3$ МэВ в направлении вперед: а) с учетом всех возможных фоновых реакций; б) учет только «чистых» событий [11]

На рис. 5 показан расчетный двумерный катод-анод спектр α -частиц из реакции $^{91}\text{Zr}(n, \alpha)^{88}\text{Sr}$ при $E_n = 5,3$ МэВ, вылетающих из образца циркония в направлении вперед по пучку нейтронов, указано также влияние фоновых реакций, а на рис. 6 – двумерный катод-анод спектр в направлении назад. Был оценен вклад из реакции на азоте, наличие небольшого количества которого возможно в ИК. Показано, что это мешающий фактор и были приняты меры по очистке корпуса ИК перед наполнением рабочим газом, также использовались газы особой чистоты.

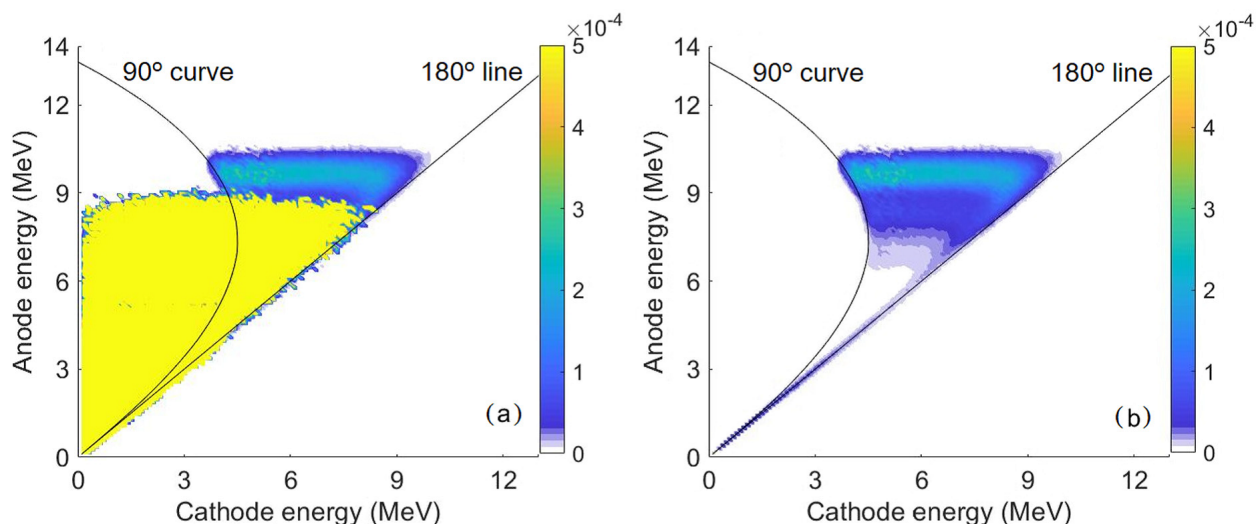


Рис. 6: То же, что на рисунке. 5, но для направления назад [11]

Здесь также указаны эффекты от фоновых реакций. Поправка на самопоглощение для α -частиц была принята во внимание при определении эффективности ИК. Видно, что реакции $^{14}\text{N}(n, \alpha)$ и $^{16}\text{O}(n, \alpha)$ из рабочего газа были основным источником фона, особенно для измерения реакции $^{35}\text{Cl}(n, \alpha)$ в направлении назад. Фоном от ^{37}Cl можно пренебречь.

Измерения реакции на быстрых нейтронах

Измерения выполнены на пучке квазимонохроматических нейтронов ускорителях Ван де Грааф ЭГ-5 ЛНФ ОИЯИ, ЭГ-4.5 (ПУ, г. Пекин), и на тандемном ускорителе НИ-13 Китайского института атомной энергии, с использованием модифицированной методики. Быстрые нейтроны были получены в результате $\text{D}(d, n)^3\text{He}$ реакции на газовой нейтрон-производящей мишени. Для каждой энергии нейтронов проведены следующие измерения:

- калибровка от альфа-источника;
- измерение потока нейтронов с ^{238}U ;
- измерение на одной паре образцов;
- измерение на другой паре образцов;
- измерение фона с чистыми танталовыми подложками.

Поток нейтронов измерялся для каждой энергии нейтронов в отдельном измерении с помощью реакции $^{238}\text{U}(n, f)$ (содержание ^{238}U 99,999%) при помещении уранового образца точно таких же размеров и в ту же самую позицию, в которую устанавливаются исследуемые образцы. При этом проводилась калибровка камеры деления и длинного ^3He счетчика, которые служат для мониторинга потока нейтронов. Оба эти метода мониторинга дали очень близкие значения.

Сечения реакции для направления «вперед» и «назад» рассчитывались по формуле:

$$\sigma_{n,\alpha} = \sigma_{n,f} \cdot \frac{N_{\alpha} \varepsilon_f}{N_f \varepsilon_{\alpha}} \frac{N_{238U}}{N_{\text{образец}}} \cdot K \quad (1.1)$$

где $K = \frac{N_{fFC}}{N_{fIC}}$

N_{fFC} и N_{fIC} – отсчеты с камеры деления и ИК при измерении исследуемой реакции и $^{238}\text{U}(n, f)$, соответственно;

$\sigma_{n,f}$ – стандартное сечение $^{238}\text{U}(n, f)$ из ENDF/B-VIII.0 [12];

N_{α} и N_f – число событий от α -частиц из исследуемой реакции и осколков деления из $^{238}\text{U}(n, f)$, соответственно;

N_{238U} и $N_{\text{образец}}$ – количество атомов в образцах, соответственно.

Измерение сечения реакции $^{144}\text{Sm}(n, \alpha)^{141}\text{Nd}$

Сечение реакции $^{144}\text{Sm}(n, \alpha)^{141}\text{Nd}$ измерено при $E_n = 4,0; 5,0$ и $6,0$ МэВ, на ускорителе Ван де Граафа ЭГ-4.5 Пекинского университета, Китай. Дейтериевая газовая мишень использовалась для получения моноэнергетического нейтрона посредством реакции $^2\text{H}(d, n)^3\text{He}$. Детектор α -частиц представляет собой двухсекционную ионизационную камеру с сеткой с общим катодом, и его устройство можно найти в [13]. Рабочий газ ИК – $\text{Kr} + 2,83\% \text{CO}_2$. В настоящей работе был приготовлен образец из обогащенного $^{144}\text{Sm}_2\text{O}_3$. При энергии нейтронов $E_n = 4,0; 5,0$ и $6,0$ МэВ продолжительность измерений реакции $^{144}\text{Sm}(n, \alpha)^{141}\text{Nd}$ составила 46, 31 и 26 ч, соответственно. Сечение реакции $^{144}\text{Sm}(n, \alpha)^{141}\text{Nd}$ для направления «вперед» и «назад» рассчитывалось по формуле 1.1.

На рис. 7 приведен двумерный спектр реакции $^{144}\text{Sm}(n, \alpha)^{141}\text{Nd}$ при $E_n = 4,0$ МэВ, направление «вперед».

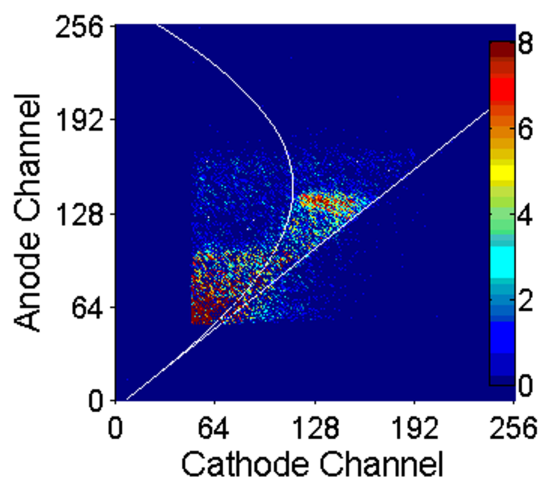


Рис. 7: Двумерный спектр реакции $^{144}\text{Sm}(n, \alpha)^{141}\text{Nd}$ при $E_n = 4,0$ МэВ, направление «вперед» [14]

Таблица 1: Измеренные и рассчитанные в Talys-1.6 сечения для реакции $^{144}\text{Sm}(n, \alpha)^{141}\text{Nd}$

E_n (МэВ)	^{144}Sm	
	σ_{exp} (Мб)	σ_{Talys} (Мб)
4,0	$0,06 \pm 0,01$	$0,11^i, 0,08^{ii}$
5,0	$0,11 \pm 0,03$	$0,15^i, 0,11^{ii}$
6,0	$0,17 \pm 0,03$	$0,22^i, 0,17^{ii}$

ⁱ Прогнозы TALYS-1.6 с параметрами по умолчанию.

ⁱⁱ Прогнозы TALYS-1.6 с откорректированными параметрами.

Результаты настоящей работы сравниваются с существующими измерениями, оценками и расчетами TALYS-1.6, как показано на рис. 8.

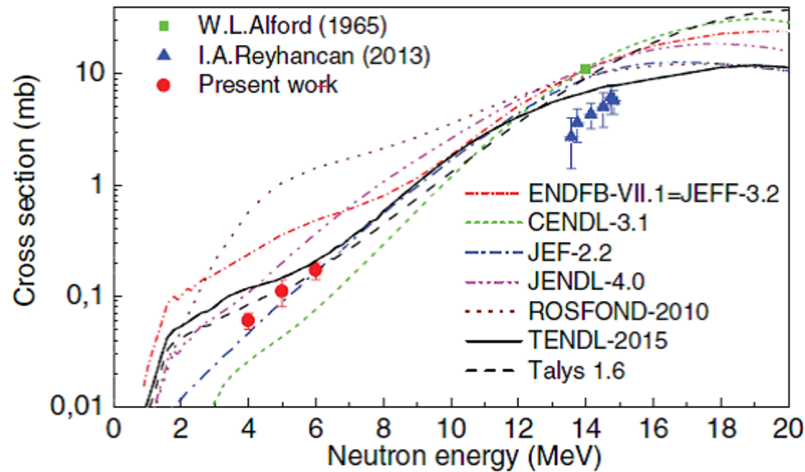


Рис. 8: Результаты по сечениям реакции $^{144}\text{Sm}(n, \alpha)^{141}\text{Nd}$ вместе с существующими измерениями и оценками различных библиотек для диапазона энергий нейтронов от 1,0 до 20,0 МэВ. [14]

Параметры потенциала оптической модели были скорректированы для получения хорошего согласия с настоящими результатами. Для реакции $^{144}\text{Sm}(n, \alpha)^{141}\text{Nd}$ коэффициент параметра геометрического радиуса, r_v , был скорректирован с 1 (по умолчанию) до 0,8, а константа “с” функции коррективы для табличных плотностей уровней была скорректирована с 1 (по умолчанию) до 0,3. Диапазон регулирования параметров r_v и “с” составляет от 0,1 до 10 и от -10 до 10 соответственно. Хотя корректировки параметра r_v и константы “с” для табличных плотностей уровней находятся в регулируемом диапазоне, они относительно велики. Это может быть связано с тем, что ^{144}Sm является тяжелым ядром и в плотности уровней может существовать особая структура. Результаты настоящей работы сравниваются с результатами существующих измерений, оценок и расчетов

TALYS-1.6, как показано на рис. 8. Для реакции $^{144}\text{Sm}(n, \alpha)^{141}\text{Nd}$ имеются большие расхождения между различными оценочными библиотеками в области МэВ. Наши измерения поддерживают данные библиотек JEFF-2.2 [16]. При настройке параметров расчеты TALYS-1.6 согласуются с нашими измерениями. Дальнейшие измерения при энергиях нейтронов около 10 МэВ и с другими изотопами самария необходимы для изучения параметров оптической модели и плотностей уровней ядер самария. Дальнейшие измерения при энергиях нейтронов около 10 МэВ необходимы для выяснения расхождений между разными библиотеками.

Измерение сечения реакции $^{66}\text{Zn}(n, \alpha)^{63}\text{Ni}$ Измерения выполнены на ускорителе Ван де Граафа ЭГ-4.5 Пекинского университета, Китай. Сечение реакции $^{66}\text{Zn}(n, \alpha)^{63}\text{Ni}$ измерено при тех же энергиях нейтронов, как и для реакции $^{144}\text{Sm}(n, \alpha)^{141}\text{Nd}$. Сечения реакции $^{66}\text{Zn}(n, \alpha)^{63}\text{Ni}$ для направления «вперед» и «назад» рассчитывалось по формуле 1.1. Для каждого образца и энергии выполнено 5 серий измерений. На рис. 9 представлены, получены двумерные спектры катод-анод «вперед».

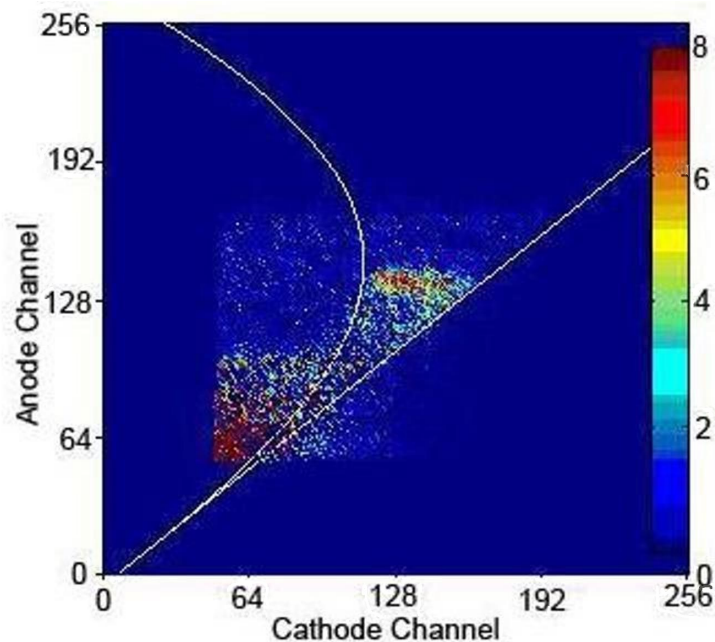


Рис. 9: Двумерный спектр реакции $^{66}\text{Zn}(n, \alpha)^{63}\text{Ni}$ при $E_n = 5,0$ МэВ, направление «вперед» (после вычитания фона) [14]

Результаты измерений сечений для $^{66}\text{Zn}(n, \alpha)^{63}\text{Ni}$ реакции приведены в таблице 2. Результаты расчетов по программе TALYS-1.6 с параметрами по умолчанию и скорректированными также приведены в таблице 2.

Параметры потенциала оптической модели были скорректированы для получения хорошего согласия с настоящими результатами. Для реакции $^{66}\text{Zn}(n, \alpha)^{63}\text{Ni}$ коэффициент параметра геометрического радиуса, r_v , был скорректирован с 1 (по умолчанию) до 0,8. Результаты настоящей работы

Таблица 2: Измеренные и рассчитанные в Talys-1.6 сечения для реакции $^{66}\text{Zn}(n, \alpha)^{63}\text{Ni}$

E_n (МэВ)	$^{66}\text{Zn}(n, \alpha)^{63}\text{Ni}$	
	σ_{exp} (Мб)	σ_{Talys} (Мб)
4,0	$1,80 \pm 0,21$	$1,13^i, 1,31^{ii}$
5,0	$5,45 \pm 0,49$	$4,02^i, 4,70^{ii}$
6,0	$10,0 \pm 0,89$	$9,38^i, 10,8^{ii}$

ⁱ Прогнозы TALYS-1.6 с параметрами по умолчанию.

ⁱⁱ Прогнозы TALYS-1.6 с откорректированными параметрами.

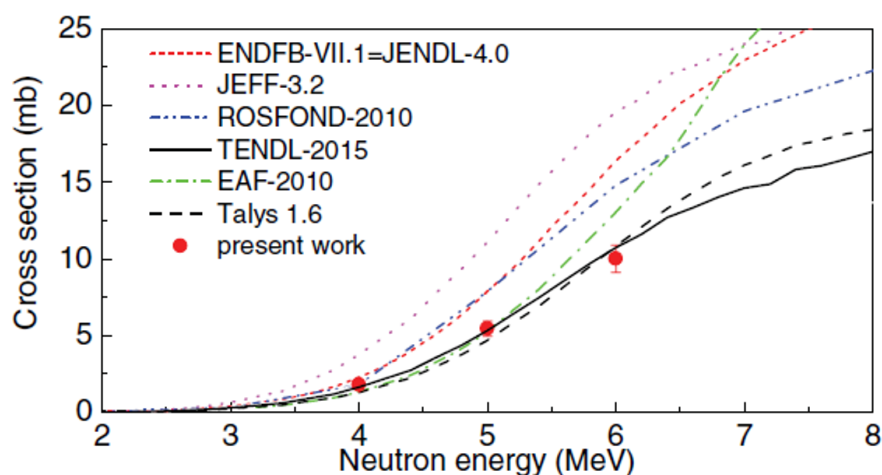


Рис. 10: Результаты по сечениям реакции $^{66}\text{Zn}(n, \alpha)^{63}\text{Ni}$ вместе с существующими измерениями и оценками различных библиотек для диапазона энергий нейтронов от 2,0 до 8,0 МэВ [14]

сравниваются с результатами существующих измерений, оценок и расчетов TALYS-1.6, как показано на рис. 10. Для реакции $^{66}\text{Zn}(n, \alpha)^{63}\text{Ni}$ имеются большие расхождения между различными оценочными библиотеками в области МэВ. Наши измерения поддерживают данные библиотек JEFF-2.2. При настройке параметров расчеты TALYS-1.6 согласуются с нашими измерениями. Для реакции $^{66}\text{Zn}(n, \alpha)^{63}\text{Ni}$, как показано на рис. 10 нет измерений. Текущие результаты при 4,0 и 5,0 МэВ подтверждают данные EAF-2010 [17]. Кроме того, наши результаты хорошо согласуются с данными TENDL-2015 [18]. Для выяснения расхождений между разными библиотеками также необходимы измерения в области от 8 до 12 МэВ энергии нейтронов.

Измерение сечения реакций $^{40}\text{Ca}(n, \alpha_0)^{37}\text{Ar}$ и $^{40}\text{Ca}(n, \alpha)^{37}\text{Ar}$

Эксперименты проводились на тандемном ускорителе HI-13 Китайского института атомной энергии при $E_n = 8,5; 8,75; 9,0; 9,3$ и $9,5$ МэВ. Полученные сечения реакций $^{40}\text{Ca}(n, \alpha_0)^{37}\text{Ar}$ и $^{40}\text{Ca}(n, \alpha)^{37}\text{Ar}$ приведены в таблице 3 и на рис. 11 сравнивались с другими результатами и оценочными

данными из ENDF/B-VIII.0, JENDL-5.0 [19], JEFF-3.3 [20], CENDL-3.2 [21], ROSFOND-2010 [22] и библиотеки TENDL-2019 [23] и результатами расчетов с помощью TALYS-1.9. Для реакции $^{40}\text{Ca}(n, \alpha_0)^{37}\text{Ar}$ измерения в области энергий нейтронов 8,0 – 10,0 МэВ отсутствуют. Представленные сечения реакции согласуются с библиотеками ENDF/B-VIII.0 и JENDL-5.0. Для реакции $^{40}\text{Ca}(n, \alpha)^{37}\text{Ar}$ приведенные сечения реакции согласуются с данными измерений Barnes et al. [24] в пределах погрешности. Оба измерения ниже, чем все существующие оценки в области энергий нейтронов 8,0 – 10,0 МэВ. Настоящие результаты полезны для получения точной функции возбуждения реакции $^{40}\text{Ca}(n, \alpha)^{37}\text{Ar}$. Сечения реакций $^{40}\text{Ca}(n, \alpha_0)^{37}\text{Ar}$ и $^{40}\text{Ca}(n, \alpha)^{37}\text{Ar}$ были рассчитаны с использованием кода TALYS-1.9. Для лучшего согласования с настоящими результатами были скорректированы параметров, включая оптические модели, модели плотности уровня. Рассчитанные сечения согласуются с настоящими результатами измерений, представленными на рис. 11.

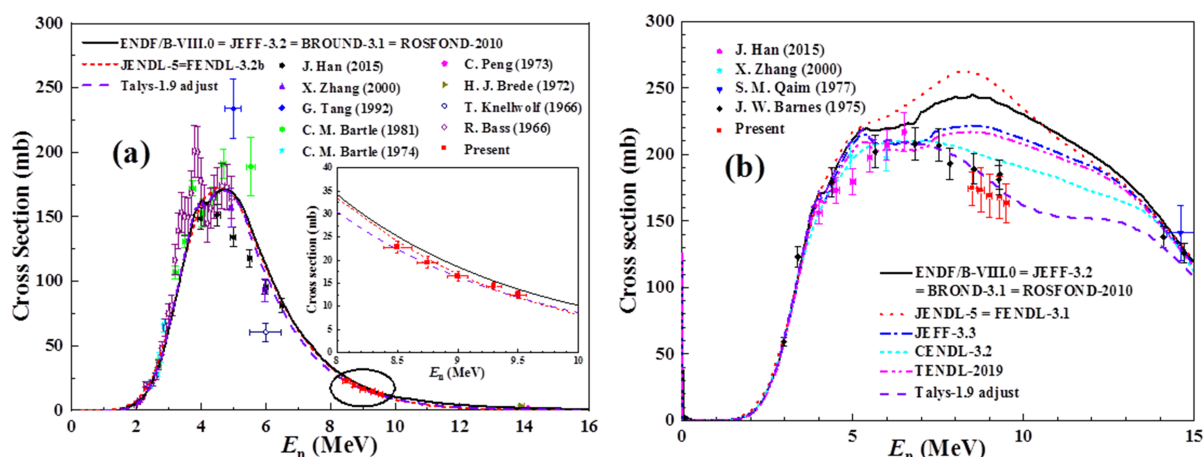


Рис. 11: Экспериментальные и оцененные сечения для реакций $^{40}\text{Ca}(n, \alpha_0)^{37}\text{Ar}$ (а) и $^{40}\text{Ca}(n, \alpha)^{37}\text{Ar}$ (б) и результаты расчетов с помощью TALYS-1.9 [19].

Как показано в таблице 3, отношения вперед/назад реакции $^{40}\text{Ca}(n, \alpha_0)^{37}\text{Ar}$ в лабораторной системе отсчета постепенно увеличиваются с увеличением энергии нейтронов. Отношения вперед/назад реакции $^{40}\text{Ca}(n, \alpha)^{37}\text{Ar}$, измеренные в этой работе, составляют от 1,28 до 1,4 что, очевидно, больше 1,1. Расчеты показывают, что для $E_n < 9,5$ МэВ отношения вперед/назад реакции $^{40}\text{Ca}(n, \alpha)^{37}\text{Ar}$ в лабораторной системе отсчета должны быть меньше 1,1 при условии, что угловые распределения испускаемых α -частиц изотропны в системе центра масс. Наша работа показывает, что угловые распределения испускаемых α -частиц в системе центра масс из реакции $^{40}\text{Ca}(n, \alpha)^{37}\text{Ar}$ направлены вперед и статистическая теория не совсем применима для реакции $^{40}\text{Ca}(n, \alpha)^{37}\text{Ar}$ в области 8,5 – 9,5 МэВ.

Таблица 3: Экспериментальные результаты для сечений реакций $^{40}\text{Ca}(n, \alpha_0)^{37}\text{Ar}$ и $^{40}\text{Ca}(n, \alpha)^{37}\text{Ar}$ в соотношения вперед и назад [25].

E_n (МэВ)	Сечение (мб)		Вперед/назад	
	$^{40}\text{Ca}(n, \alpha_0)^{37}\text{Ar}$	$^{40}\text{Ca}(n, \alpha)^{37}\text{Ar}$	$^{40}\text{Ca}(n, \alpha_0)^{37}\text{Ar}$	$^{40}\text{Ca}(n, \alpha)^{37}\text{Ar}$
$8,5 \pm 0,12$	$22,8 \pm 1,5$	$174,4 \pm 12,6$	$1,03 \pm 0,07$	$1,31 \pm 0,1$
$8,75 \pm 0,09$	$19,5 \pm 1,5$	$173,2 \pm 16,7$	$1,08 \pm 0,08$	$1,28 \pm 0,12$
$9,0 \pm 0,09$	$16,5 \pm 1,0$	$168,9 \pm 15,9$	$1,13 \pm 0,07$	$1,38 \pm 0,13$
$9,3 \pm 0,07$	$14,4 \pm 0,9$	$167,9 \pm 15,8$	$1,19 \pm 0,08$	$1,38 \pm 0,13$
$9,5 \pm 0,07$	$12,5 \pm 0,7$	$163,3 \pm 14,5$	$1,34 \pm 0,08$	$1,40 \pm 0,12$

Выполнены расчеты прямых, предравновесных и компаундных компонент для реакции $^{40}\text{Ca}(n, \alpha)^{37}\text{Ar}$ и представлены как функция от энергии падающих нейтронов на рис. 12. Видно, что компаундная компонента составляет почти 100 % при E_n ниже 7 МэВ и она понижается от 100 до 45% с ростом E_n от 7 до 15 МэВ. Предравновесная компонента при этом растет от 0 до 53%. Прямой механизм дает вклад не превышающий 4%. Вклад прямого и предравновесного механизмов в области 8,5 – 9,5 МэВ не является пренебрежимо малым, хотя компаундный является доминирующим для этой реакции, что согласуется с нашими экспериментальными результатами по отношению «вперед»/«назад».

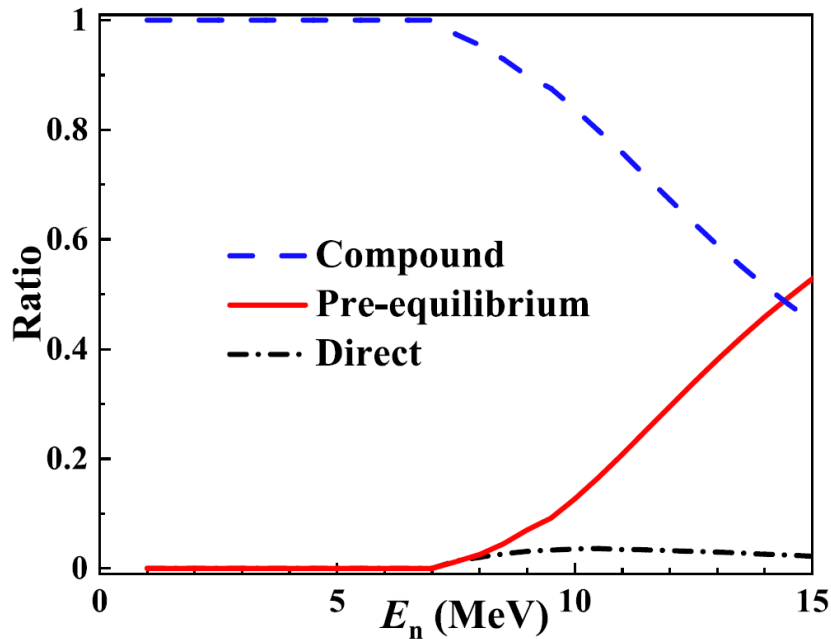


Рис. 12: Отношение прямых, предравновесных и компаундных компонент сечения реакции $^{40}\text{Ca}(n, \alpha)^{37}\text{Ar}$, рассчитанное с использованием TALYS-1.9 с скорректированными параметрами [25].

Исследование реакции $^{91}\text{Zr}(n, \alpha)^{88}\text{Sr}$ в области энергий нейтронов 3,9; 4,3; 5,0 и 5,3 МэВ МэВ.

Измерения проводились на ускорителе Ван де Граафа ЭГ–5 в Лаборатории нейтронной физики им. Франка Объединенного института ядерных исследований России. Для каждого образца и энергии выполнено 5 серий измерений. Сечение реакции $^{91}\text{Zr}(n, \alpha)^{88}\text{Sr}$ для направления «вперед» и «назад» рассчитывалось по формуле 1.1. На рисунке. 13 и 14 представлены, получены двумерные и одномерные спектры катод–анод «вперед» и «назад».

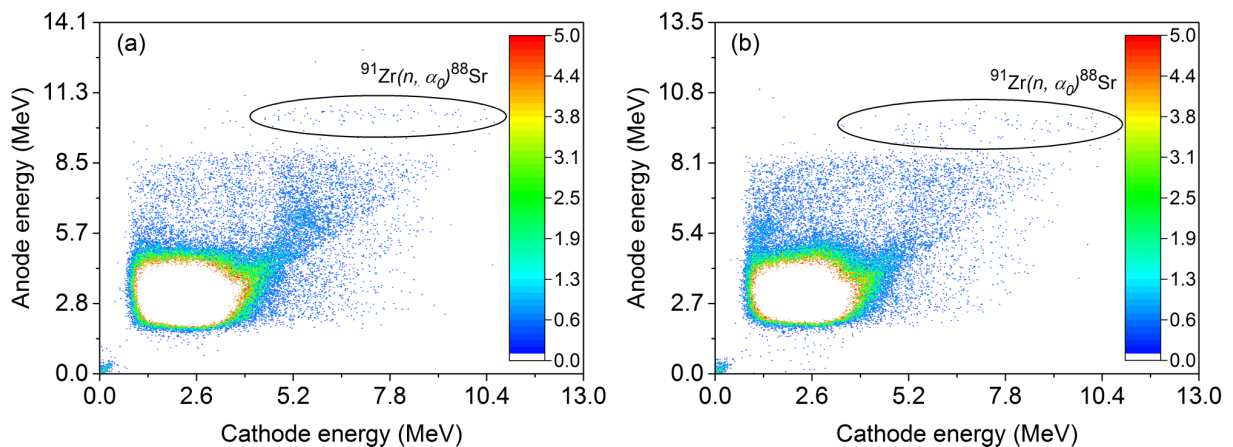


Рис. 13: Двумерный катод–анод спектр α -частиц из реакции $^{91}\text{Zr}(n, \alpha)^{88}\text{Sr}$ при $E_n = 5,3$ МэВ, направление «вперед» (а), «назад» (б) без вычитания вклада фоновых реакций[11]

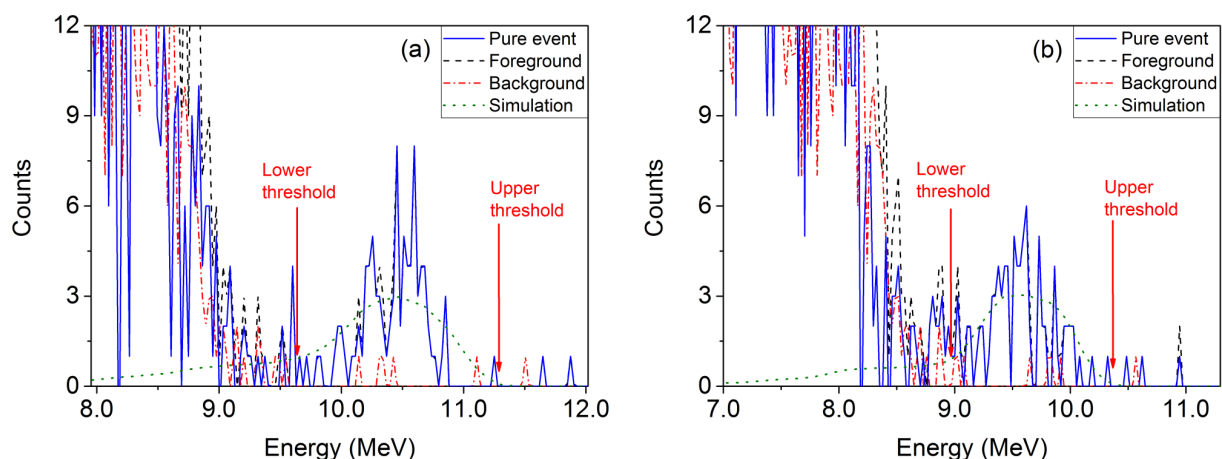


Рис. 14: Одномерный анодный спектр α -частиц из реакции $^{91}\text{Zr}(n, \alpha)^{88}\text{Sr}$ при $E_n = 5,3$ МэВ, направление «вперед» (слева), справа – «назад» [11]

Измеренное сечение (n, α_0) может быть получено суммированием сечений в направлении «вперед» и «назад». В нашем эксперименте измерялись только частицы α_0 , – переходы в основное состояние дочернего ядра. Сечение реакции (n, α_1) в первое возбужденное состояние рассчитывается

с использованием отношения сечений для переходов в основное и первое возбужденное состояния дочернего ядра, рассчитанных с использованием скорректированных параметров TALYS–1.9. Сечения реакции $^{91}\text{Zr}(n, \alpha)^{88}\text{Sr}$, соответствующие более высоким возбужденным состояниям ^{88}Sr , малы и их вклад в полное сечение незначителен. Результаты показаны в таблице 4.

Таблица 4: Измеренные сечения реакции $^{91}\text{Zr}(n, \alpha)^{88}\text{Sr}$ и результаты TALYS–1.9.

Энергия МэВ	Сечение, мбарн				
	Вперед (n, α_0)	Назад (n, α_0)	Сумма (вперед+назад) (n, α_0)	Сумма (вперёд-назад) (n, α_0) + TALYS–1.9 (n, α_1)	TALYS –1.9 ($n, \alpha_{0,1}$)
3,9	0,17±0,02	0,15±0,01	0,32±0,02	0,34±0,02	0,39
4,3	0,25±0,03	0,24±0,03	0,49±0,04	0,53±0,04	0,47
5,0	0,31±0,04	0,28±0,03	0,59±0,05	0,64±0,05	0,56
5,3	0,34±0,04	0,31±0,04	0,65±0,06	0,76±0,06	0,57

Полное сечения (n, α) реакции показаны на рис. 15 по результатам наших измерений и расчетов TALYS–1.9 со скорректированными параметрами. Существующие сечения реакции $^{91}\text{Zr}(n, \alpha)^{88}\text{Sr}$ сравнивались с ядерными данными из различных оценочных библиотек, [12], [19, 20], [23], ENDF/B–VII.0 [5], BROND–3.1 [26], и результатами расчетов с использованием TALYS–1.9. Нынешние сечения реакции в 1,2–3,2 раза ниже оценок ENDF/B–VIII.0, JENDL–5.0 и JEFF–3.3. Разница между нашими результатами и CENDL–3.2 и оценки TENDL–2019 составляют 14%–33%. Оценка ENDF/B–VII.0 удовлетворительно описывает наши результаты, за исключением энергии нейтронов 4,3 МэВ. Настоящие результаты согласуются с оценкой BROND–3.1 в диапазоне энергий нейтронов от 5,0 до 5,3 МэВ. Кроме того, наши экспериментальные сечения реакции (n, α) хорошо согласуются с расчетами TALYS–1.9 со скорректированными параметрами, за исключением 3,9 МэВ, где наши данные составляют менее 20%.

Наши результаты отличаются от 14% до 3,2 раза по сравнению с оценками ENDF/B–VIII.0, JENDL–5.0, JEFF–3.3, CENDL–3.2, BROND и TENDL–2019. Оценка ENDF/B–VII.0 и расчеты TALYS–1.9 с скорректированными параметрами удовлетворительно описывают наши результаты. Результаты описанные в третьей главе опубликованы в работах [11], [14], [25].

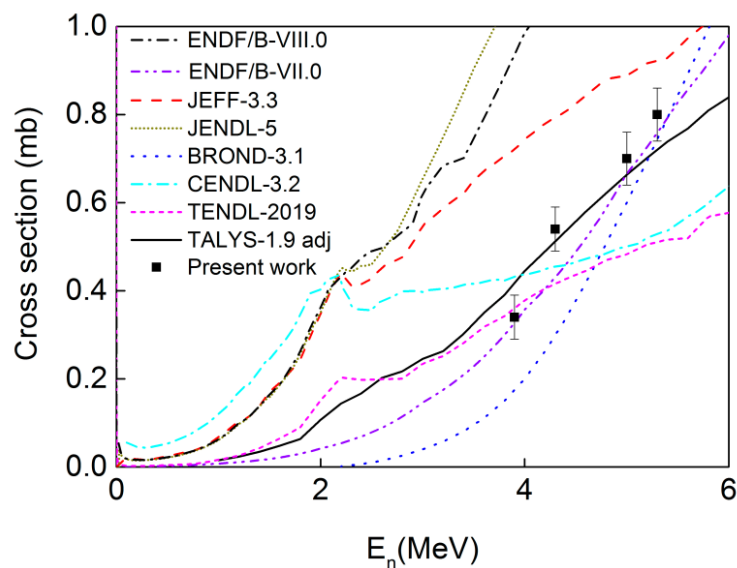


Рис. 15: Существующие сечения $^{91}\text{Zr}(n, \alpha)^{88}\text{Sr}$ сравниваются с оценками, расчетами TALYS–1.9 и существующими измерениями [11].

В Заключение сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе:

1. Представлена методика измерения сечения реакции (n, α) на быстрых нейтронах.
2. Разработан и изготовлен новый детектор для исследования (n, α) реакции на базе ионизационной камеры с сеткой Фриша. С его помощью удалось преодолеть ряд трудностей встречаемых, при использовании твердых мишеней, и снизить фоновые реакции, протекающие при взаимодействии с быстрыми нейтронами.
3. Создана новая нейтрон–генерирующая газовая дейтериевая мишень, которая используется на 3–х ускорителях мировых ядерных центров.
4. Для измерения спектра и мониторингирования нейтронов, создан новый сцинтилляционный детектор, и получены спектры быстрых нейтронов.
5. Впервые получены результаты экспериментального исследования сечений реакции $^{66}\text{Zn}(n, \alpha)^{63}\text{Ni}$ в области энергий нейтронов 4,0 – 6,0 МэВ.
6. Впервые получены результаты экспериментального исследования сечений реакции $^{144}\text{Sm}(n, \alpha)^{141}\text{Nd}$ в области энергий нейтронов 4,0 – 6,0 МэВ.

7. Впервые получены результаты экспериментального исследования сечений реакции $^{91}\text{Zr}(n, \alpha)^{88}\text{Sr}$ в области энергии нейтронов 3,9 – 5,3 МэВ.
8. Получены результаты экспериментального исследования сечения реакций $^{40}\text{Ca}(n, \alpha_0)^{37}\text{Ar}$ и $^{40}\text{Ca}(n, \alpha)^{37}\text{Ar}$ в пяти точках энергии нейтронов в области энергий 8,5 – 9,5 МэВ.

Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность своим научным руководителям Юрию Михайловичу Гледену и Хуухэнхуу Гончигдорж за выбор важных и интересных задач, за поддержку и помощь в работе. Автор благодарит коллегу Чупракова Игоря Александровича за помощь в проведении экспериментов и обработке экспериментальных данных, а также за участие в полезных обсуждениях в ходе написания диссертационной работы. На разных стадиях эксперимента большую помощь оказали коллеги из секторов СИНЯВ ОЯФ и ускорителя ЭГ–5 ЛНФ ОИЯИ. Благодарю их за переданные знания и опыт, а также помощь, оказанную в процессе выполнения работы. Считаю своим долгом высказать глубокую благодарность своим родителям, близким, друзьям. Искренне благодарен своей супруге за поддержку.

Публикации, отражающие содержание диссертации

1. Gledenov Yury, Zhang Guohui, Gonchigdorj Khuukhenkhuu, Sedysheva Milana, Krupa Lubos, Enkhbold Sansarbayar, Chuprakov Igor, Wang Zhimin, Fan Xiao, Zhang Luyu and Bai Huaiyong “Cross sections of the $^{144}\text{Sm}(n, \alpha)^{141}\text{Nd}$ and $^{66}\text{Zn}(n, \alpha)^{63}\text{Ni}$ reactions at 4,0; 5,0 and 6,0 MeV” EPJ Web of Conferences 146, 11033 (2017).
2. E. Sansarbayar, Yu. Gledenov, L. Krupa, I. Chuprakov, A. Assylova, I. Wilhelm, M. Solar, R. Sykora and Z. Kohout “Pulse shape analysing system for a gridded ionization chamber” J. Inst. 14 T11005 (2019).
3. Haoyu Jiang, Zengqi Cui, Yiwei Hu, Jie Liu, Jinxiang Chen, Guohui Zhang, Yu. M. Gledenov, I. Chuprakov, E. Sansarbayar, G. Khuukhenkhuu, L. Krupa “Cross-section measurements for $^{58,60,61}\text{Ni}(n, \alpha)^{55,57,58}\text{Fe}$ reactions in the 4,5 – 5,5 MeV neutron energy region”, Chinese Physics C, Vol. 44. No. 11 (2020).
4. E. Sansarbayar, Yu. M. Gledenov, I. Chuprakov, G. Khuukhenkhuu, G. S. Ahmadov, L. Krupa, Guohui Zhang, Haoyu Jiang, Zengqi Cui, Yiwei Hu, Jie Liu, N. Battsooj, I. Wilhelm, M. Solar, R. Sykora, and Z. Kohout “Cross sections for the $^{35}\text{Cl}(n, \alpha)^{32}\text{P}$ reaction in the 3,3 – 5,3 MeV neutron energy region” Phys. Rev. C 104, 044620 (2021).
5. Guohui Zhang, E. Sansarbayar, Yu. M. Gledenov, G. Khuukhenkhuu, L. Krupa, N. S. Gustova, M. G. Voronyuk, I. Chuprakov, N. Battsooj, I. Wilhelm, M. Solar, R. Sykora, Z. Kohout, Jie Liu, Yiwei Hu, and Zengqi Cui. “Cross sections of the $^{91}\text{Zr}(n, \alpha)^{88}\text{Sr}$ reaction in the 3,9 – 5,3 MeV neutron energy region” Phys. Rev. C 106, 064602 (2022).
6. Jie Liu, Haoyu jiang, Zengqi Cui, Yiwei Hu, Haofan Bai, Jinxiang Chen, Guohui Zhang, Yu. M. Gledenov, E. Sansarbayar, G. Khuukhenkhuu, N. Battsooj, L. Krupa, I. Chuprakov, Xichao Ruan, Hanxiong Huang, Jie Ren, and Qiwen Fan “Cross sections of the $^{40}\text{Ca}(n, \alpha_0)^{37}\text{Ar}$ and $^{40}\text{Ca}(n, \alpha)^{37}\text{Ar}$ reactions in the 8,5 – 9,5 MeV neutron energy range” Phys. Rev. C 106, 054610 (2022).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ^{37}Ar formation from calcium in fission reactors / S. M. Qaim, A. Rusheed, G. Stöcklin and R. Wölflé // The International Journal of Applied Radiation and Isotopes. –1977. –Vol. 28 –P. 585–589.
2. Experimental Nuclear Reaction Data (EXFOR), <https://www.nndc.bnl.gov/exfor>.
3. W. L. Alford, R. D. Koehler // Bulletin of the American Physical Society. –1965. –Vol.10, –P.260.
4. Measurements of Isomeric Cross Sections for (n, α) Reaction on ^{144}Sm Isotope for Neutrons Around 14 MeV / Iskender Atilla Reyhancan, Ayse Durusoy // Nuclear Science and Engineering. –2013, –Vol.174, –P.202–207.
5. ENDF/B–VII.1 Neutron Cross Section Data Testing with Critical Assembly Benchmarks and Reactor Experiments. / A. C. Kahler, R. E. MacFarlane, R. D. Mosteller, et al., // Nuclear Data Sheets. // –2011, –Vol.112, –P.2997–3036.
6. TALYS–1.9 / A.J.Koning, S.Hilaire and M.C.Duijvestijn, <http://www.TALYS.eu/>.
7. Simulation of the neutron response matrix of an EJ309 liquid scintillator. / H. Bai, Z. Wang, L. Zhang, et al., // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. –2018, –Vol.886. –P.109–118.
8. Pixie-16 // <https://xia.com/products/pixie-16>
9. J.F. Ziegler, SRIM–2013, <http://www.srim.org/> #SRIM
10. Cross sections for the $^{35}\text{Cl}(n, \alpha)^{32}\text{P}$ reaction in the 3,3 – 5,3 MeV neutron energy region. / E. Sansarbayar, Yu.M. Gledenov, I. Chuprakov, G. Khuukhenkhuu, G.S. Ahmadov, L. Krupa, Guohui Zhang, Haoyu Jiang, Zengqi Cui, Yiwei Hu, Jie Liu, N. Battsooj, I. Wilhelm, M. Solar, R. Sykora and Z. Kohout // Physical Review C, –2021, –Vol.104, –P.044620.
11. Cross sections of the $^{91}\text{Zr}(n, \alpha)^{88}\text{Sr}$ reaction in the 3,9 – 5,3 MeV neutron energy region. / Guohui Zhang, E. Sansarbayar, Yu. M. Gledenov, G. Khuukhenkhuu, L. Krupa, N. S. Gustova, M. G. Voronyuk, I. Chuprakov, N. Battsooj, I. Wilhelm, M. Solar, R. Sykora, Z. Kohout, Jie Liu, Yiwei Hu, and Zengqi Cui. // Physical Review C, –2022, –Vol.106, –P.064602.

12. ENDF/B–VIII.0: The 8th Major Release of the Nuclear Reaction Data Library with CIELO–project Cross Sections, New Standards and Thermal Scattering Data. / D. A. Brown^a, M. B. Chadwick^b, R. Capote, et al. // Nuclear Data Sheets, –2018, –Vol.148, –P.1–142.
13. Dispersion relations for (n, n) , (n, p) , and (n, α) reactions on ^{39}K and ^{40}Ca . / X. Zhang, Z. Chen, Y. Chen, J. Yuan, G. Tang, G. Zhang, J. Chen, Y.M. Gledenov, G. Khuukhenkhoo, M.V. Sedysheva, // Physical Review C –2000, –Vol.61, –P.054607.
14. Cross sections of the $^{144}\text{Sm}(n, \alpha)^{141}\text{Nd}$ and $^{66}\text{Zn}(n, \alpha)^{63}\text{Ni}$ reactions at 4,0; 5,0 and 6,0 MeV. / Gledenov Yury, Zhang Guohui, Gonchigdorj Khuukhenkhoo, Sedysheva Milana, Krupa Lubos, Enkhbold Sansarbayar, Chuprakov Igor, Wang Zhimin, Fan Xiao, Zhang Luyu and Bai Huaiyong // Proceedings of the ND 2016 International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, Bruges, Belgium, 11 – 16 September 2016.
15. TALYS–1.0 / A.J. Koning, S. Hilaire, and M.C. Duijvestijn, // Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, April 22–27, 2007, Nice, France, editors O. Bersillon, F. Gunsing, E. Bauge, R. Jacqmin, S. Leray, EDP Sciences, –2008, –P.211–214
16. NEA (2000), The JEF–2.2 Nuclear Data Library, OECD Publishing, Paris
17. The European Activation File: EAF–2010 neutron–induced cross section, / J.–Ch. Sublet, L.W. Packer, J. Kopecky, R.A. Forrest, A.J. Koning and D.A. Rochman, // EASY Documentation Series CCFE–R (10) 05, Neutron cross sections: Issue 1, CCFE, 2010
18. Modern Nuclear Data Evaluation with the TALYS Code System, / A.J. Koning, D. Rochman, // Nuclear Data Sheets, –2012, –Vol.113, –P.2841–2934.
19. Status of JENDL. / O. Iwamoto, N. Iwamoto, K. Shibata, A. Ichihara, S. Kunieda, F. Minato, and S. Nakayama, // EPJ Web Conf. –2020, –Vol.239, –P.09002
20. The joint evaluated fission and fusion nuclear data library, JEFF–3.3. / A. Plompen, O. Cabellos, C. Jean, et al., // European Physical Journal A, –2020, –Vol.56, –P.181.
21. CENDL–3.2, <http://www.nuclear.csdb.cn/pingjia.html>

22. ROSFOND – Russian national library of neutron data VANT (Voprosi Atomnoy Nauki i Techniki). / S. V. Zabrodszkaya, A. V. Ignatyuk, V. N. Koscheev et al., // Series of Nuclear Constants, –2007, –Issue.1–2.
23. TENDL: Complete Nuclear Data Library for Innovative Nuclear Science and Technology. / A. J. Koning, D. Rochman, J. Sublet, et al., // Nuclear Data Sheets, –2019, –Vol.155, –P.1–55.
24. The $^{40}\text{Ca}(n, \alpha)^{37}\text{Ar}$ cross section from 3 to 14.7 MeV. / J. W. Barnes, B. P. Bayhurst, B. H. Erkkila, J. S. Gilmore, Nelson Jarmie, and R. J. Prestwood, // Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry. –1975, –Vol.37, –P.399–401.
25. Cross sections of the $^{40}\text{Ca}(n, \alpha_0)^{37}\text{Ar}$ and $^{40}\text{Ca}(n, \alpha)^{37}\text{Ar}$ reactions in the 8,5 – 9,5 MeV neutron energy range. / Jie Liu, Haoyu jiang, Zengqi Cui, Yiwei Hu, Haofan Bai, Jinxiang Chen, Guohui Zhang, Yu. M. Gledenov, E. Sansarbayar, G. Khuukhenkhuu, N. Battsooj, L. Krupa, I. Chuprakov, Xichao Ruan, Hanxiong Huang, Jie Ren, and Qiwen Fan // Physical Review C –2022, –Vol.106, –P. 054610.
26. NEW VERSION OF NEUTRON EVALUATED DATA LIBRARY BROND–3.1, <https://vant.ippe.ru/en/brond-3-1.html>