

## СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета Д 720.001.06  
в Международной межправительственной организации  
Объединенный институт ядерных исследований

№253 от 18 марта 2019 года

### Присутствовали:

Председатель совета:	Оганесян Ю.Ц.	доктор физ-мат. наук	01.04.16
Зам. председателя совета	Аксёнов В.Л.	доктор физ-мат наук	01.04.07
Ученый секретарь со-вета:	Попеко А.Г.	кандидат физ-мат. наук	01.04.16

### Члены совета:

Авдеев М.В.	доктор физ-мат. наук	01.04.07
Апель П.Ю.	доктор хим. наук	01.04.01
Балагуров А.М.	доктор физ-мат. наук	01.04.07
Гикал Б.Н.	доктор тех. наук	01.04.01
Гледенов Ю.М.	доктор физ-мат. наук	01.04.16
Головков М.С.	доктор физ-мат. наук	01.04.16
Джолос Р.В.	доктор физ-мат. наук	01.04.16
Дмитриев С.Н.	доктор физ-мат. наук	01.04.16
Изосимов И.Н.	доктор физ-мат. наук	01.04.01
Иткис М.Г.	доктор физ-мат. наук	01.04.01
Пенионжкевич Ю.Э.	доктор физ-мат. наук	01.04.16
Плакида Н.М.	доктор физ-мат. наук	01.04.07

Скуратов В.А.	доктор физ-мат. наук	01.04.01
Тер-Акопьян Г.М.	доктор физ-мат. наук	01.04.16
Утенков В.К.	доктор физ-мат. наук	01.04.01

**Аксенов В.Л.:** Рассматриваем защиту диссертации, которую подготовила Татьяна Александровна Хромылева на тему «Низкофоновый цифровой спектрометр для измерения сечения  $(n,\alpha)$  реакции на твердых мишенях», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 «приборы и методы экспериментальной физики». Слово предоставляется ученому секретарю совета для оглашения личного дела соискателя. Пожалуйста, Андрей Георгиевич.

**Попеко А.Г.:** Соискатель Хромылева Татьяна Александровна в 2012 году окончила Обнинский филиал «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» В 2017 году окончила аспирантуру при Акционерном Обществе «Государственный Научный Центр Российской Федерации Физико-Энергетический институт им. А.И. Лейпунского» по специальности 01.04.01 «приборы и методы экспериментальной физики». В настоящее время Хромылева Т.А. работает в должности научного сотрудника в лаборатории нейтронной физики АО «ГНЦ РФ-ФЭИ». В этой же лаборатории выполнена диссертация. Научный руководитель доктор физико-математических наук Хрячков Виталий Алексеевич. Официальные оппоненты: кандидат физико-математических наук, доцент Кадилин Владимир Валерьевич и доктор физико-математических наук Родионов Николай Борисович присутствуют на заседании.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского Центра «Курчатовский Институт», г. Гат-

чина. Диссертация и все необходимые документы представлены, вовремя размещены на сайте ОИЯИ и в базе ВАК, диссертация передана в библиотеку ОИЯИ и авторефераты разосланы своевременно.

**Аксенов В.Л.:** Есть ли вопросы к Андрею Георгиевичу?

**Аксенов В.Л.:** Если вопросов нет. Пожалуйста, Татьяна Александровна, Вам слово.

**Хромылева Т.А.** Здравствуйте уважаемые члены диссертационного совета. Вашему вниманию я представляю диссертационную работу под названием: «Низкофоновый цифровой спектрометр для измерения сечения ( $n, \alpha$ ) реакции на твердых мишенях».

Ядерные реакции с вылетом заряженных частиц, протекающие под действием быстрых нейтронов на ядрах промежуточной массы, изучены недостаточно полно. Так, оценки сечения подобных реакций, даваемые различными библиотеками ядерных данных, могут отличаться друг от друга в разы. Зачастую наблюдается не только отличие в абсолютном значении функции возбуждения реакции, но и в ее структуре. Во многом данная ситуация с расхождениями в теоретическом описании обусловлена бедностью набора экспериментальных данных, существующих в настоящее время. Для целого ряда ядер экспериментальная информация просто отсутствует. Сложившаяся ситуация с экспериментальными данными для конструкционных материалов является следствием того, что данные ядра чрезвычайно неудобны для исследования разработанными на сегодняшний день методами.

Методики, позволяющие выполнять такие измерения, должны обладать высокой чувствительностью и большой избирательностью по отношению к продуктам изучаемой реакции (фон от элементов конструкции и самого детектора зачастую многократно превышает исследуемый эффект).

С другой стороны, реакции, приводящие к образованию газообразных продуктов, например, гелия или водорода, во многом определяют радиационную стойкость материалов. Особенно остро данная проблема стоит для конструкционных материалов, поскольку они наиболее широко используются при создании различных механизмов и узлов ядерно-энергетических установок.

Особенностью эксплуатации ядерных установок является то, что в процессе работы ЯЭУ подвергаются интенсивному воздействию нейтронного и гамма излучений. Как показали материаловедческие исследования, одним из основных процессов, негативно влияющих на механические свойства материалов, является газообразование, возникающее за счет  $(n, p)$  и  $(n, \alpha)$  реакций на ядрах веществ, входящих в их состав. Появление в структуре конструкционных материалов (например, стали) гелия может привести к их охрупчиванию, изменению величины предела пластичности, радиационной ползучести, обеднению стали, радиационному набуханию и т.д.

В настоящее время для оценки воздействия нейтронного облучения на различные объекты широко используются расчеты по методу Монте-Карло, которые используют данные о микроскопических сечениях взаимодействия нейтронов с разными изотопами для воссоздания картины распространения нейтронов в заданной геометрии. Такие расчеты широко используются для оценки энергетического спектра и потока нейтронов, воздействующих на элементы конструкций, а также для определения масштаба радиационных повреждений и энерговыделения в них. Данные расчеты способны дать реалистичную картину о масштабе радиационно-индуцированных эффектов в разных типах стали, находящихся в определенных полях смешанного нейтрон-гамма излучения. Эти оценки можно использовать для обоснования выбора тех или иных конструкционных материалов для проектируемых реакторных установок и для продления срока эксплуатации существующих

реакторов. Однако надежность таких расчетов напрямую зависит от точности, с которой известны сечения ядерных реакций, протекающих в конструкционном материале под действием нейтронов, в частности, сечения  $(n,\alpha)$  реакции.

Таким образом, получение новых экспериментальных данных о значении сечения  $(n,\alpha)$  реакции на конструкционных материалах может быть положено в основу выработки уточненных библиотек ядерных данных в той их части, которая описывает процессы, приводящие к газообразованию в конструкционных материалах. В свою очередь, использование более реалистичных оценок в прогнозировании радиационно-индуцированных повреждений материалов, используемых в реакторостроении, позволит более надежно и точно оценивать ресурс эксплуатации различных узлов реакторов еще на стадии их проектирования и за счет этого улучшить безопасность их эксплуатации и повысить их экономическую эффективность.

Цель данной работы заключается в создании нового спектрометра для изучения сечения  $(n,\alpha)$  реакции на твердых мишенях, в разработке нового метода обработки экспериментальных данных и получении новых экспериментальных данных.

**Во введении** показана актуальность работы, научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

**В первой главе** представлен обзор существующих экспериментальных данных и теоретических оценок сечения реакции  $(n,\alpha)$  для изотопов конструкционных материалов – железа, хрома, никеля и титана. Также проведен анализ существующих методов определения сечения реакции  $(n,\alpha)$ .

Проведенный анализ показал, что, несмотря на большую практическую значимость элементов конструкционных материалов, например, изотопов

хрома, железа и никеля, набор экспериментальных исследований по измерению сечения реакции  $(n,\alpha)$  чрезвычайно беден и ограничивается работами, выполненными для нейтронов с энергией 14 МэВ.

Современное состояние дел с теоретическими оценками сечения  $(n,\alpha)$  реакций, приведенными в различных библиотеках ядерных данных (ENDF/B-VII, JENDL-4.0, BROND 3 и других), для многих ядер, входящих в состав конструкционных материалов, также неудовлетворительно, и разброс значений оцененных сечений для многих практически важных изотопов превышает 20-30%. Имеющееся разногласие между различными оценками может быть устранено только при появлении новых экспериментальных данных.

Для измерения сечения реакции  $(n,\alpha)$  существует целый набор экспериментальных методов. Однако до сегодняшнего дня не существует одного метода, который позволил бы исследовать сечение реакции  $(n,\alpha)$  для всей совокупности существующих ядер.

Исходя из проведенных исследований был сделан вывод о том, что для проведения измерений сечения реакции  $(n,\alpha)$  на изотопах конструкционных материалов целесообразно использовать ионизационную камеру с сеткой Фриша и цифровые методы обработки экспериментальных данных.

**Во второй главе** рассмотрены физические принципы спектрометра, представлена его конструкция и блок-схема экспериментальной установки, описаны методы обработки экспериментальных данных, методы определения масс исследуемых мишеней, представлены результаты тестовых измерений сечения реакции  $(n,\alpha)$  на изотопе железа-54, проведен анализ погрешностей эксперимента.

Принимая во внимания проведенный анализ существующих методов измерения сечения  $(n,\alpha)$  реакции и учитывая опыт, накопленный в ГНЦ РФ - ФЭИ, для решения поставленной задачи по измерению сечения  $(n,\alpha)$  реакции

на твердых мишенях была предпринята попытка использовать ионизационную камеру в сочетании с цифровыми методами обработки данных.

Измерения сечения ( $n, \alpha$ ) реакции на конструкционных материалах будут сопровождаться большим количеством фоновых событий. Дело в том, что при облучении ионизационной камеры быстрыми нейтронами образуется большое число заряженных частиц ( $\alpha$ -частицы, протоны, электроны, ядра отдачи). Одним из источников фона являются элементы конструкции камеры (электроды, сетка, изоляторы). Кроме того, рабочий газ камеры также является источником фона. Также необходимо учитывать фон от поверхности электродов (окислы, нитриды и т.п.). В зависимости от положения трека и его ориентации в объеме камеры с мишенью, расположенной на катоде, все  $\alpha$ -частицы можно условно разделить на три группы:

- 1) «катодные»  $\alpha$ -частицы, которые излучаются с поверхности катода. К ним относятся как  $\alpha$ -частицы, родившиеся в мишени, так и  $\alpha$ -частицы, излученные самим катодом;
- 2) «лжекатодные»  $\alpha$ -частицы, которые были рождены в рабочем газе и достигли катода;
- 3) «газовые»  $\alpha$ -частицы, которые родились и полностью затормозились в рабочем газе камеры.

Материал катода при облучении его быстрыми нейтронами может становиться интенсивным источником  $\alpha$ -частиц, возникающих в результате ( $n, \alpha$ ) реакций, протекающих на компонентах материалов, входящих в его состав. Принимая во внимание все вышесказанное, был сделан вывод о том, что располагать мишень из изотопов конструкционных материалов на катоде не имеет смысла, так как мы не сможем отделить  $\alpha$ -частиц, летящие из изучаемого слоя, от  $\alpha$ -частиц, летящих с катода. Поэтому было принято решение переместить мишень с катода вглубь камеры, ближе к сетке Фриша.

В этом случае мы можем выделить 5 групп  $\alpha$ -частиц по месту их рождения:

- 1) «мишенные» частицы, которые родились в изучаемой мишени;
- 2) «лжемишенные» частицы – частицы, родившиеся в рабочем газе камеры и достигшие изучаемой мишени;
- 3) катодные частицы, которые излучаются с поверхности катода;
- 4) «лжекатодные» частицы – частицы, родившиеся в рабочем газе камеры и достигшие катода;
- 5) «газовые» частицы, которые родились и полностью затормозились в рабочем газе камеры.

При таком подходе мы имеем значительно лучшую фоновую ситуацию, чем в случае, когда мишень расположена на катоде. Действительно, у нас имеется возможность:

- 1) подавить катодные, лжекатодные и большую часть газовых  $\alpha$ -частиц, используя параметр время дрейфа последних электронов;

- 2) количество «лжемишенных» событий будет незначительным. Количество «лжемишенных» событий зависит от площади мишени. В нашем случае диаметр катода составлял 120 мм. Диаметр подложки мишени не превышал 40 мм. Отношение их площадей составляет 9. Именно в такое количество раз можно сократить долю «лжемишенных» частиц за счет выноса мишени с поверхности катода.

- 3) Учитывая небольшой диаметр мишени, ее подложку можно сделать из такого материала, как высокочистое золото. Для золота кулоновский барьер для эмиссии  $\alpha$ -частиц значительно выше, нежели для материалов с маленьким  $Z$ . Кроме того, золото химически инертно и его поверхность значительно хуже окисляется. Однако этот материал достаточно дорог и изготавливать из него



электроды камеры проблематично. Изготовить из золота подложку малого диаметра значительно дешевле и проще.

В качестве детектора использовалась ионизационная камера. Она состояла из двух частей: мониторная камера и основная. В мониторную камеру входит анод и катод (общий катод с основной камерой). На катоде мониторной камеры слой урана-238.

Основная камера представляет собой систему из шести электродов: катод, 3 охранных электрода, сетка Фриша и анод.

В основной камере устанавливалась изучаемая мишень. Она подвешивалась на золотых нитях, которые закреплялись в плоскости первого охранного электрода, на расстоянии 1 см от катода. Те же золотые нити использовались для установления электрического контакта.

Охранные электроды устанавливались с шагом 1 см и служили для лиnearизации электрического поля внутри камеры.

Общий катод первоначально был изготовлен из нержавеющей стали. Первый опыт работы показал, что при облучении его потоком быстрых нейтронов он становится интенсивным источником  $\alpha$ -частиц.

Поэтому встал вопрос о выборе материала катода. На рисунке внизу слайда представлено сечение  $(n,\alpha)$  реакции для природного железа, кадмия и золота. Как мы можем видеть замена железа на кадмий приведет к значительному снижению фона.

В дальнейших экспериментах катод из нержавеющей стали был заменен на кадмиевый. Камера заполнялась газовой смесью криптона с добавкой метана или углекислого газа (3-5%). Тип добавки определялся для каждого эксперимента индивидуально.

Давление в камере подбиралось таким образом, чтобы пробеги  $\alpha$ -частиц, вылетающих из мишени, укладывались в промежутке между мишенью и сеткой Фриша.

Всю используемую электронику можно разделить на три основных канала: 1) Анодный канал, в который входит зарядочувствительный предусилитель и быстрый усилитель. Усиленный сигнал поступает на первый вход оцифровщика формы импульса. 2) Катодный канал. Его структура аналогична анодному. 3) Триггерный канал. Этот канал усиливает и формирует катодный сигнал для того, чтобы сформировать триггерный сигнал для оцифровщика. Этот сигнал является признаком того, что в одной из двух камер произошло событие, и он запускает процесс преобразования входных анодного и катодного сигналов в цифровой вид. Полученная информация сохраняется на жестком диске для последующей обработки.

Сигналы, поступающие от спектрометра, можно разделить на два типа.

1. сигналы, в которых присутствуют как анодный, так и катодный сигналы. Эти сигналы соответствуют событиям, которые произошли в основной камере.
2. сигналы, в которых присутствует катодный сигнал, а анодный сигнал равен нулю. Эти сигналы соответствуют событиям, происходящим в мониторной камере.

На первом шаге обработки отбираются сигналы второго типа. Из этих сигналов формируется амплитудный спектр, который используется для определения числа осколков деления урана-238.

Сигналы первого типа проходят через более сложную обработку, в процессе которой извлекается информация об амплитуде и катодного сигнала, времени появления сигнала на аноде и катоде и моменте времени, в который анодный сигнал выходит на насыщение.

Используя эти параметры, мы можем определить время дрейфа и время нарастания анодного сигнала, расстояние на котором находилось начало (конец) трека, длину проекции трека на ось камеры.

Анализ двухмерного спектра с осями амплитуда сигнала – время дрейфа позволяет сделать вывод о том, что события от изучаемой мишени имеют амплитуду около 65 и время дрейфа около 55 каналов. Также есть большое число фоновых событий, рождающихся на катоде (верхняя часть спектра), событий, возникающих на компонентах рабочего газа (распределенных между максимальным и минимальными значениями времени дрейфа). Еще одним ценным источником информации о природе событий является их распределение по времени нарастания анодного сигнала. Этот параметр напрямую связан с пробегом частицы.

Для разделения «мишенных» частиц от «лжемишенных» мы использовали свойство  $\alpha$ -частиц образовывать максимум ионизации в конце пробега (пик Брэгга).

«Мишенные»  $\alpha$  - частицы всегда будут иметь максимум плотности ионизации вблизи сетки Фриша (анода). «Лжемишенные»  $\alpha$  - частицы рождаются в газе и движутся в сторону мишени, вблизи которой и будет находиться максимум плотности ионизации (рисунок 34, 35).

Используя методы цифровой обработки анодных сигналов, можно определить отношение заряда, образовавшегося при торможении регистрируемой частицы в первой ( $Q_1$ ) и второй ( $Q_2$ ) половине пробега частицы.

Возможность разделения  $\alpha$ -частиц по направлению движения была проверена экспериментально. Для этого камера, наполненная смесью  $Ar+3\%CO_2$ , без мишени внутри облучалась нейтронами с энергией 6 МэВ. В полученном спектре отношения зарядов наблюдается два максимума, соответствующие разным направлениям вылета  $\alpha$  -частиц. Анализ отношения зарядов позволяет значительно снизить фон от «лжемишенных» событий.

Используя результат анализа приведённых спектров, можно реализовать процедуру подавления фоновых событий.

Для этого выделяется окно по параметру времени дрейфа, в которое попадают все события, рождающиеся в изучаемой мишени. Все события за пределами этого окна удаляются из рассмотрения. Затем оставшиеся события анализируются по параметру времени нарастания анодного сигнала. Из рассмотрения удаляются все события с временем нарастания, превышающим максимально возможное для  $\alpha$ -частиц данной энергии. Затем производится отбор событий, в которых  $\alpha$ -частица очевидно двигалась в направлении от анода к катоду («лжемишенные» и «лжекатодные»  $\alpha$ - частицы).

Используя эту информацию, появляется возможность значительно уменьшить фон. Таким образом, анализируя сигналы из основной камеры, мы смогли определить число  $\alpha$ -частиц, испускаемых из изучаемой мишени, а анализ спектра сигналов мониторинговой камеры позволил определить число делений, произошедших в слое  $^{238}\text{U}$ .

Экспериментальные исследования сечений  $(n,\alpha)$  реакции на конструкционных материалах проводились на электростатическом ускорителе ЭГ-1. В данной работе использовался непрерывный режим работы ускорителя. Ток на мишени составлял 2-5 мкА. Для получения моноэнергетических нейтронов использовалась реакция  $D(d,n)$ . В работе использовалась твердая дейтериевая мишень толщиной  $0,97 \text{ мг/см}^2$ .

Время измерения одной точки составляло от нескольких часов до нескольких дней в зависимости от массы мишени, сечения изучаемой реакции и сечения реакции  $D(d,n)$ .

Проверка работоспособности разработанного спектрометра проводилась на  $(n,\alpha)$  реакции на изотопе железе-54. Полученные данные хорошо совпадают с данными, полученными другими авторами при помощи разных методик, позволяет сделать вывод о том, что используемая методика работоспособна и позволяет получать данные о сечении изучаемой реакции с хорошей надежностью.

**В третьей главе** представлены результаты экспериментальных исследований сечения  $(n,\alpha)$  реакции для следующих изотопов:  $^{57}\text{Fe}$ ,  $^{50}\text{Cr}$ ,  $^{52}\text{Cr}$ ,  $^{53}\text{Cr}$ ,  $^{60}\text{Ni}$  и  $^{47}\text{Ti}$ .

Полученные результаты для сечения реакции  $^{57}\text{Fe}(n,\alpha)^{54}\text{Cr}$  выполнены в интервале энергий нейтронов от 4,25 до 6,5 МэВ. Наиболее близкие к нашим данным значения библиотек JENDL 4.0 и BROND 3. В низкоэнергетической области нейтронов существует один набор экспериментальных точек в области энергий выше 5,5 МэВ эти данные отличаются от данных, полученных нами, примерно в 1,5 раза.

В работе получены парциальные сечения реакции с переходом остаточного ядра  $^{54}\text{Cr}$  на основной и первый возбуждённый энергетические уровни. Основное и первое возбужденное состояния разделены энергетическим окном в 834,85 кэВ, а между первым возбужденным состоянием и вторым возбужденным состоянием энергетический промежуток  $\sim 1$  МэВ. Это позволит впервые выделить вклад каналов реакции с заселением основного и первого возбужденного состояния остаточного ядра в энергетическом спектре.

Измерения сечения  $(n,\alpha)$  реакции на  $^{50}\text{Cr}$  были выполнены в диапазоне энергий нейтронов 4,7 - 7,2 МэВ. Один из основных результатов, которые были получены – вывод о том, что оценки библиотек ENDF/B VII.1, JEFF 3.1.2, ROSFOND 2010 и BROND 3 дают сильно завышенные значения сечения для  $^{50}\text{Cr}$ . Заметно лучше наши экспериментальные данные согласуются с оценками, даваемыми библиотекой JENDL 4.0, хотя в большинстве точек наши данные лежат ниже этой оценки. Интересно сравнить наши данные с единственными существующими в этой области данными, полученными японской группой. Для энергии 5 МэВ наши данные находятся несколько ниже, для точки 6,2 МэВ наблюдается практически идеальное согласие. К сожалению, нам не удалось достичь энергии 7,6 МэВ, однако экстраполяция наших данных

в эту область позволяет предположить, что значения будут также очень близкими.

Полученные значения сечения  $(n,\alpha)$  реакции, протекающей на изотопе  $^{52}\text{Cr}$  неплохо согласуются с оцененными данными библиотеки ENDF/B VII.1 как по форме функции возбуждения, так и по абсолютной величине. А оцененные данные библиотек JENDL 4.0, JEFF 3.1.2, ROSFOND 2010 и BROND 3 лежат заметно ниже полученных нами данных. В данной энергетической области экспериментальные данные других авторов отсутствуют.

Полученные данные для сечения реакции  $^{53}\text{Cr}(n,\alpha)^{50}\text{Ti}$  в пределах погрешностей совпадают с оценкой, даваемой библиотекой JENDL 4.0. Библиотеки ENDF/B VII.1, JEFF 3.1.2, ROSFOND 2010 дают значения сечения примерно в два раза выше, чем наблюдаемые в эксперименте. В библиотеке BROND 3, напротив, оцененные сечения ниже, чем полученные нами данные. Экспериментальных данных других авторов в данном диапазоне энергии нейтронов нет.

Полученные экспериментальные данные для сечения  $(n,\alpha)$  реакции на изотопе никеля-60 имеют хорошее согласие с теоретическими данными библиотек JEFF 3.1.2 и ROSFOND 2010. Библиотеки JENDL 4.0 и ENDF/B VII.1 дают более высокое значение сечения данной реакции. В исследуемой области энергии нейтронов экспериментальных данных других авторов не существует.

Полученные экспериментальные данные для сечения  $(n,\alpha)$  реакции на изотопе титана-47 по форме функции возбуждения и по абсолютной величине согласуются, в пределах погрешности, с теоретической кривой библиотек JENDL 4.0 и ROSFOND 2010. Оценка JEFF 3.2 дает значения сечения в несколько раз более низкие, нежели эксперимент. Оценка ENDF/B VII.1 завышает значение сечения в 2 - 3 раза. Экспериментальных данных других

авторов для этого изотопа титана в библиотеке экспериментальных данных EXFOR нет.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Разработана новая конструкция ионизационной камеры с сеткой Фриша с вынесенной рабочей мишенью с использованием материалов обеспечивающих низкий собственный фон камеры при облучении ее быстрыми нейтронами.
2. Предложена новая схема накопления экспериментальных данных обеспечивающая равенство мертвых времен в основном и мониторингном каналах.
3. Разработаны улучшенные алгоритмы обработки цифровых сигналов.
4. Создан новый метод обработки экспериментальных данных обеспечивающий значительное подавление фона.
5. Впервые получены значения сечений реакции  $(n,\alpha)$  на изотопах  $^{52}\text{Cr}$ ,  $^{53}\text{Cr}$ ,  $^{47}\text{Ti}$  при энергии нейтронов ниже 14 МэВ.
6. Впервые измерены парциальные сечения реакции  $^{57}\text{Fe}(n,\alpha)^{54}\text{Cr}$  для нейтронов с энергиями от 4,3 до 6,5 МэВ.

По материалам диссертации опубликовано 14 работ. 8 из них относятся к списку ВАК. У меня все, спасибо за внимание!

**Аксенов В.Л.:** Спасибо, Татьяна Александровна. Вопросы диссертанту. Пожалуйста, Юрий Михайлович!

**Гледенов Ю.М.:** Вы показывали интересные результаты по сечению, а что вы можете сказать об измерении угловых распределений?

**Хромылева Т.А.:** В рамках этой работы мы этим не занимались.

**Гледенов Ю.М.:** Ваша методика позволяет это делать?

**Хромылева Т.А.:** Да. Только необходимо будет затратить больше времени на измерения.

**Гледенов Ю.М.:** И второй вопрос. Каковы величины поправок на хвосты спектров на самопоглощение в области низких энергий?

**Хромылева Т.А.:** 2%.

**Гледенов Ю.М.:** Вы порог ставили?

**Хромылева Т.А.:** Да

**Аксенов В.Л.:** Спасибо. Пожалуйста, еще вопросы? Вопросов больше нет. Тогда, Татьяна Александровна, спасибо, можете пока присесть. Переходим к отзывам. Первым у нас значиться отзыв научного руководителя. Доктор физико-математических наук, Хрячков Виталий Алексеевич.

**Хрячков В.А.:** Оглашает отзыв, отзыв прилагается.

**Аксенов В.Л.:** Спасибо Виталий Алексеевич. Послушаем другие отзывы. Прошу, Андрей Георгиевич.

**Попеко А.Г.:** Есть заключение организации, в которой была выполнена диссертация. Заключение утверждено генеральным директором АО «ГНЦ РФ-ФЭИ» (прилагается). Заключение положительное, замечаний не содержит.

Имеются три отзыва на автореферат. От Лычагина А.А., кандидата физ.-мат. наук, заведующего лабораторией разработки и эксплуатации облучающей техники МРНЦ им. А.Ф. Цыба филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России Отзывы положительные. Есть четыре замечания. Отзывы прилагаются.

**Хромылева Т.А.:** Первое замечание - подпись к рисунку 2 и текст, поясняющий данный рисунок противоречат друг другу.

В подписи к данному рисунку действительно допущена техническая ошибка. С замечанием согласна.

Следующие замечание. Есть неоднозначные и не поясненные термины, например, «последний электрон».

С замечанием согласна



Следующие замечание В автореферате практически не представлен метод определения погрешностей эксперимента.

С учетом небольшого объема автореферата данный раздел был сокращен. Полная информация представлена в диссертации.

Последние замечание. В автореферате отмечается, что существующие экспериментальные данные и теоретические оценки различных авторов имеют значительные расхождения, но нет анализа принципа их отбора для оценки достоверности полученных данных.

Подобный анализ проводится для экспериментальных данных при создании теоретических оценок. В данной работе такая задача не ставилась.

**Попеко А.Г.:** Теперь, есть отзыв от Степанова В.А., доктора физико-математических наук, профессора, начальника отделения лазерных и плазменных технологий Обнинского института атомной энергетики — филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Отзыв положительный. Есть четыре замечания.

**Хромылева Т.А.:** Первое замечание - размер некоторых рисунков, приведенных в автореферате явно недостаточен для их детального изучения,

Размер рисунков ограничен объемом автореферата. С замечанием согласна.

Второе замечание. Объем информации о всех экспериментах, проводившихся с изучаемыми изотопами слишком велик,

Проводился анализ всех существующих экспериментальных данных по сечению  $(n,\alpha)$  реакции для изотопов конструкционных материалов и методов, при помощи которых данные были получены. Только полный анализ всех использованных методик позволяет сделать вывод о необходимости разработки нового метода. Анализ полученных ранее данных позволил определить те реакции, которые недостаточно изучены и требуют уточнения. Дополнительно

определен круг реакций, для которых имеется большой набор данных полученных разными авторами – эти реакции были впоследствии использованы нами для проведения тестирования разработанной методики.

Третье замечание. Не всегда на рисунках приведены последние версии оцененных данных для некоторых библиотек.

На момент окончания написания работы были приведены последние версии оцененных данных.

Четвертое замечание. Текст автореферата содержит незначительное количество опечаток.

С замечанием согласна.

**Попеко А.Г.:** Есть еще отзыв Арзуманова С.С., кандидат физико-математических наук, начальник отдела нейтронной физики КЯФК. Отзыв также положительный. Есть три замечания.

**Хромылева Т.А.:** Все замечания относятся к оформлению автореферата. С замечаниями согласна.

**Попеко А.Г.:** Есть заключение ведущей организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского Центра «Курчатовский Институт», (прилагается). Утверждено Заместителем директора по научной части. Отзыв положительный. Однако имеется ряд замечаний.

**Аксенов В.Л.:** Прошу соискателя ответить на замечания ведущей организации. Пожалуйста, Татьяна Александровна.

**Хромылева Т.А.:** Первое замечание — в тексте под рис.24 и аналогичном ему тексте под рис.2(автореферат) неправильно проставлены номера, обозначающие разные группы частиц. К сожалению, была допущена техническая ошибка в тексте под рисунками. В тексте диссертации приводится правильное описание.

Второе замечание. Формула 9 на стр.49 идентична формуле 19 на стр. 67. Необходимость такого повтора не является бесспорной. Кроме того, формулы на стр. 67 и стр. 69 ошибочно приведены под одним и тем же номером, присутствуют так же другие ошибки формул и рисунков. Повтор формул был приведен для того, чтобы читателю не приходилось возвращаться на 20 страниц назад и искать нужную формулу. Со второй частью замечания согласна.

Следующее замечание. В тексте диссертации на стр. 66 констатируется, что «тормозная способность криптона для альфа-частиц заметно выше, чем у неона и аргона. В тексте же автореферата утверждается обратное. Поскольку величины тормозной способности для перечисленных газов в обоих документах приведены одни и те же, явную противоречивость двух утверждений можно трактовать как недоразумение, при этом правильным считать вывод, имеющийся в тексте диссертации. К сожалению, в тексте автореферата допущена техническая ошибка.

Следующее замечание. Указывается, что обычно для поправки на неэффективность сетки Фриша используется выражение 10 на стр.49, но в дальнейшем используется выражение 14 на стр.50, которое в тексте диссертации упомянуто как 17. Если смена знака + на – не простая опечатка, а имеет физический смысл, то такая замена должна быть аргументированной.

На протяжении длительного времени в литературе продолжается дискуссия по вопросу о том какой знак поправки к амплитуде нужно делать + или -. Для того, чтобы подробнее отразить существующее положение дел в диссертации работе приведены оба способа с ссылками на соответствующими работы. В нашей работе использование данной формулы с + или – не приведет к изменению числа зарегистрированных частиц. Данная поправка вводится для того, чтобы сделать пик более узким и улучшить соотношение сигнал-фон. Задача улучшения соотношения сигнал – фон одинаково хорошо решается при использовании любого знака поправки на сеточную неэффективность.

Следующее замечание: Несмотря на то, что геометрическая эффективность регистрации ионизационной камеры к альфа-частицам и осколкам деления урана-238 в представленной работе близка к 100%, что находит свое подтверждение в приведенных систематических ошибках измеренных сечений реакции для исследуемых изотопов, для большей наглядности следовало бы привести типичное значение самопоглощения в слое и амплитудные спектры для двух половин ионизационной камеры с указанием порога дискриминации.

Типичное значение самопоглощения в слое составляет 2 %. Амплитудные спектры для основной камеры приведены в тексте диссертации. Спектры для мониторной камеры, которая является простой камерой деления хорошо известны из литературы. Получаемые нами спектры аналогичны, и мы сочли возможным не приводить их в тексте. Хотя, наверно, это стоило сделать

Далее. При определении потока нейтронов не обсуждается зависимость эффективности регистрации от угловой анизотропии осколков деления урана-238. Тем не менее, исходя из имеющихся литературных данных, заметного влияния на измеренные сечения следует ожидать в области энергии нейтронов 6-7 МэВ, для которых выход осколков деления урана-238 под углом 0 в два раза больше, чем для углов близких к 90. Нельзя не отметить, что в формулах 36, 42 и 43, описывающих соотношение между числом зарегистрированных осколков деления и альфа-частиц с потоком нейтронов, отсутствует множитель-эффективность регистрации частиц, и это обстоятельство в диссертации не обсуждается.

Замечание справедливо. Действительно зарегистрированное число событий, как в основной, так и в мониторной камере, должно быть поправлено на эффективность регистрации соответствующей камеры. Одним из факторов, влияющих на значение эффективности является число частиц, поглощенных в слое. Это число, в свою очередь будет зависеть от углового распределения регистрируемых частиц при данной энергии нейтронов. Таким образом, речь

идет не о постоянной величине – эффективности регистрации, а о некой переменной величине, зависящей от энергии нейтронов сложным образом, отражающей энергетическую зависимость угловых распределений. Для осколков  $^{238}\text{U}$  существуют подробные данные о зависимости анизотропии осколков от энергии нейтронов вызывающих деление. Используя эти данные можно провести численное моделирование и уточнить реальную долю поглощенных осколков для заданной энергии нейтронов. Принципиально иная ситуация наблюдается для альфа-частиц из изучаемой  $(n,\alpha)$  реакции. Как показано в диссертации для многих реакций даже данные о полном сечении реакции отсутствуют. Данные об угловых распределениях альфа-частиц встречаются еще значительно реже. В данной работе мы рассчитывали поправку на самопоглощение осколков в слое исходя из предположения об изотропности углового распределения осколков. Количество поглощенных в мишени осколков при этом составляет 2%. Сделанные нами оценки влияния изменения количества самопоглощённых в мишени частиц в зависимости от анизотропии их углового распределения показали, что их вклад в конечную погрешность измеряемого сечения не превосходит 1 %. Эта величина незначительна, по сравнению с суммарной погрешностью измеряемого сечения (7%). В этих условиях мы сочли возможным учесть неопределенность в угловых распределениях продуктов реакции в виде дополнительной части (1%) при определении погрешности результата измерения сечения.

Последнее замечание. В тексте диссертации встречаются предложения, отсутствие запятых, в которых очевидным образом противоречит правилам пунктуации. Некоторые ссылки даны с нарушением формальных правил: отсутствуют место и название издательства, номера страниц и знаки препинания. В списке публикаций по теме диссертации фамилии авторов нескольких работ приведены в порядке, отличающемся от оригиналов публикаций.

С замечанием согласна. У меня все.

**Аксенов В.Л.:** Спасибо. Пожалуйста, есть какие-нибудь дополнительные вопросы, которые возникли в процессе ответа, или замечания. Спасибо, Татьяна Александровна. Если замечаний нет, то мы переходим к отзывам оппонентов. Кадилин Владимир Валерьевич, кандидат физико-математических наук, доцент НИЯУ «МИФИ». Пожалуйста Владимир Валерьевич.

**Кадилин В.В.:** Оглашает отзыв. Отзыв прилагается.

**Аксенов В.Л.:** Спасибо, Владимир Валерьевич. Татьяна Александровна, пожалуйста, вам слово.

**Хромылева Т.А.:** Первое замечание: в диссертационной работе на рисунках 1,2 и других, на которых приводятся литературные данные по сечениям, источники обозначаются фамилией первого автора и годом публикации, а в комментирующем тексте приводится только номера литературных ссылок. Для сопоставления этой информации необходимо каждый раз обращаться к списку литературы, что затрудняет анализ представленного материала.

Конечно, можно было бы помимо фамилии первого автора и года публикации указать на рисунках еще и литературные ссылки. Но добавление этой информации только перегрузит рисунки, на которых и так приводиться большое количество информации.

Второе замечание. В формулах (14), (15), (16) произошла замена обозначения амплитуды сигнала. В данных формулах, для обозначения амплитуды сигнала, попеременно используется, то символ  $P$ , то символ  $Q$ . Такая замена затрудняет понимание, представленного в данном разделе, материала. Кроме того, при ссылке на формулу (14) ошибочна дана ссылка на формулу (17).

Действительно общепринятым обозначением амплитуды сигнала является  $P$ . Такое обозначение используется в тексте диссертации повсеместно. В одном месте, там, где анализируются форма сигнала, снимаемого с зарядочувствительного предусилителя был использован символ  $Q$ , чтобы подчеркнуть физический смысл производимых операций. Согласна с замечанием.

Последнее замечание. В п. 3.2.1 приведены полученные результаты измерения сечения  $(n,\alpha)$  реакции на изотопе хрома-50. В полученных данных наблюдается аномальная структура, которая не описывается не одной из представленных теоретических оценок. Хотя автор и проанализировал одну из возможных причин, возникновения такой аномалии, следовало бы провести дополнительные исследования для выяснения истинной причины появления указанного эффекта.

В настоящее время мы планируем провести дополнительные экспериментальные исследования по уточнению сечения. Во первых провести повторные измерения сечения  $(n,\alpha)$  реакции на другой мишени хрома-50 более подробные и на другом ускорителе. И во вторых планируется провести измерения сечения обратной  $(\alpha,n)$  реакции на титана-47. Планируется облучать тонкую мишень титана альфа - частицами в импульсном режиме и по времени пролета используя стильбен определять количество нейтронов и угловые распределения.

**Аксенов В.Л.:** Спасибо, Татьяна Александровна. Владимир Валерьевич, вы удовлетворены?

**Кадилин В.В.:** Да.

**Аксенов В.Л.:** Николай Борисович Родионов, доктор физико-математических наук, начальник лаборатории АО ГНЦ РФ «ТРИНИТИ».

**Родионов Н.Б.:** Оглашает отзыв. Отзыв прилагается.

**Аксенов В.Л.:** Спасибо, Николай Борисович. Татьяна Александровна, Вы желаете ответить?

**Хромылева Т.А.:** Да. Первое замечание. В некоторых графиках в диссертации (например, рисунок 29, 38 и т.д.) по осям x и y используется термин «каналы» при отсутствии объяснений в тексте какой физической величине они соответствуют. Это затрудняет понимание материала.

На упомянутых в вопросе рисунках такие параметры как амплитуда сигналов, время дрейфа, время нарастания сигнала приведены в каналах, другими словами на них представлена первичная экспериментальная информация. В ряде случаев значение амплитуды может быть преобразовано в значение энергии зарегистрированной частицы – например значение амплитуды анодного сигнала в камере с сеткой Фриша. В других случаях, например, для катодного сигнала амплитуда зависит и от энергии потерянной частицей в чувствительном объеме так и от угла вылета частицы. В этом случае сопоставить значение амплитуды с конкретной физической величиной не просто. По счастью для достижения поставленной цели – снижения фона нам, как правило, было достаточно анализировать спектры, приведенные в каналах. При необходимости используя калибровки и вводя поправки можно переводить величины, представленные в каналах в соответствующих физических величинах.

Второе замечание. По названию «Низкофоновый цифровой спектрометр для измерения сечения  $(n,\alpha)$  реакции на твердых мишенях» можно предположить, что в работе снижение фона достигается аппаратными средствами, в то время как снижение фона обеспечивается анализом уже зарегистрированных сигналов.

В нашем понимании спектрометр включает в себя – и детектор и электронику, и программы накопления и обработки данных. Достигнутый результат был бы невозможен без внесения соответствующих изменений в конструкцию спектрометра, внесенных изменений в схеме накопления экспериментальной информации и новых подходов к обработке полученных данных. Поэтому было выбрано такое название.

Третье замечание. В качестве пожелания можно отметить, что в работе следовало бы провести анализ возможности использования разработанного метода измерения сечений применительно не только к  $(n,\alpha)$  реакциям, но и другим ядерным реакциям под действием быстрых нейтронов.



В диссертационной работе действительно не анализируется возможность применения разработанного спектрометра для изучения других реакций. Реакции  $(n,\alpha)$  и  $(n,p)$  абсолютно аналогичны с точки зрения физики. Существенной разницы между ними является то, что при одинаковой энергии пробег протонов значительно больше нежели чем у  $\alpha$  - частицы. Это приводит к тому, что нужно использовать значительно большее давление рабочего газа и повышать напряжение на камере. В некоторых случаях, когда  $Q$  реакции относительно небольшое или отрицательное камеру можно использовать без изменений. В других случаях, когда энергия реакция положительная в конструкцию камеры необходимо будет внести существенные изменения.

**Аксенов В.Л.:** Спасибо Татьяна Александровна. Теперь мы переходим к дискуссии. Пожалуйста, есть сейчас возможность, если что-то осталось непонятным в изложении диссертации, то прояснить. Юрий Михайлович вас тут цитировали как классика, скажите нам свое мнение.

**Гледенов Ю.М.:** Действительно так получилось, что я эти работы хорошо знаю. Сами оригинальные работы и слышал их на докладах. Действительно, сделан очень важный шаг вперед, очень здорово развита цифровая электроника и анализ, проведенный цифровыми методами. Именно переход на цифровую обработку дает дополнительные параметры, которые позволяют избавиться от фона, в значительной степени уменьшить фон в этих измерениях. А так как измерения проводятся на разных ядрах, в диссертации взята область железа (хром, железо), на самом деле больший интерес представляют на легких ядрах от лития до самария. А сечения там отличаются от сотен миллибар до десятков микробарн, поэтому, когда уходишь в область, где сечения низкие, там проблема фона самая важная. Еще один аспект, мне очень понравилось, как досконально методика можно сказать «вылизана», нет претензий просто, как она развита к настоящему времени. Наверняка, она используется во многих центрах, которые занимаются аналогичными вещами. Еще я бы хотел по

актуальности добавить одну вещь – сечения важны очень, правильно отмечено в теме, для конструкционных материалов, но в тоже время нельзя забывать, что эти данные очень важны и для астрофизики. Почему? Потому, что реакции  $(n,\alpha)$  расчетах теоретических присутствует так называемый альфа-частичный потенциал, который используется в расчетах. А расчеты необходимо делать для тысяч разных изотопов, а реально на практике, можно измерить только на нескольких десятках. Поэтому надо опираться на теоретические расчеты. Кроме того, в астрофизике есть такая область так называемая р-ядра, таких ядер  $r-34$ , которые могут образовываться только в результате реакции с участием макрочастиц. Сечения известны для таких реакций только для 2-3, к настоящему времени. А получение параметров альфа-частичного потенциала позволяет рассчитать эти реакции. Я предлагаю, работу Хромылевой поддерживать. Лично я двумя руками за.

**Аксенов В.Л.:** Предлагаю на этом дискуссию завершить.

**Дмитриев С.Н.:** Можно еще вопрос, маленький.

**Аксенов В.Л.:** Да, конечно.

**Дмитриев С.Н.:** Гелиевое охрупчивание изучают, все понятно. А что  $(n,p)$ , водородное охрупчивание не играет роли?

**Гледенов Ю.М.:** Мы изучаем и  $(n,\alpha)$  и  $(n,p)$ . Там есть маленький нюанс. Во-первых, пробег для протонов на порядок больше, чем для альфа-частиц. Если изучать прямым методом, как с альфа частицами, то в камере надо ставить давление в десять раз больше. Они работают 3 -4 атмосферы, а вам надо будет 30-40.

**Дмитриев С.Н.:** Протоны ионизационными камерами и не меряют.

**Гледенов Ю.М.:** Значит надо другие методы.

**Дмитриев С.Н.:** Сама проблема?

**Гледенов Ю.М.:** Вы правы, надо изучать и  $(n,p)$ .

**Аксенов В.Л.:** Спасибо.

**Родионов Н.Б.:** Можно я еще задам?

**Аксенов В.Л.:** Да. Пожалуйста.

**Родионов Н.Б.:** То есть цифровой анализ вы подразумеваете численный?

**Гледенов Ю.М.:** Я подразумеваю то, что оцифровка формы сигналов дает дополнительную информацию, что при анализе позволяет выделять события из фонов. Это лучше к руководителю.

**Аксенов В.Л.:** Обозначилась тема для отдельного семинара. Пожалуйста по диссертации еще есть вопросы, замечания? Если нет, Татьяна Александровна, вам предовставляется заключительное слово.

**Хромылева Т.А.:** Я хотела сказать спасибо совету и своим оппонентам за хорошие отзывы. Отдельное спасибо моему научному руководителю за помощь. Всем коллегам из 118 лаборатории и отдельное спасибо коллегам из отдела «Ускорителей». У меня все, спасибо.

**Аксенов В.Л.:** Спасибо Татьяна Александровна. Мы переходим к выборам. Предлагается комиссия в таком составе: Борис Николаевич Гикал, Юрий Михайлович Гледенов и Михаил Сергеевич Головков. Нет возражений? Если возражений нет, то я прошу комиссию приступить к работе.

**ПОСТАНОВИЛИ:** Избрать счетную комиссию в составе: Гикал Б.Н., Гледенов Ю.М., Головков М.С.

**СЛУШАЛИ:** Утверждение протокола счетной комиссии по проведению тайного голосования о присуждении ученой степени кандидата физико-математических наук Хромылевой Т.А.: состав совета утвержден в количестве 23 человек, присутствовали на заседании 18 членов совета, докторов наук по профилю - 6, роздано бюллетеней - 18, осталось не розданных – 5, оказалось в

урне бюллетеней – 18, из них "за" - 18, "против" - нет, недействительных бюллетеней - нет.

**Аксенов В.Л.:** Члены ученого совета кто за? Против есть? Воздержавшихся нет. Татьяна Александровна, мы вас поздравляем с защитой, желаем вам дальнейшей успешной работы. Результаты конечно потрясающие. Когда можно выделить сигнал, который слабее фона в два раза – это впечатляет. Желаем вам всего хорошего. Поздравляем.

Теперь нам надо принять заключение. Пожалуйста проект заключения есть у всех членов совета. Есть ли какие-нибудь замечания? Если замечаний больше нет. Кто за то, чтобы утвердить это заключение? Единогласно утверждено. Спасибо большое. На этом мы наше заседание закрываем.

Заместитель председателя диссертационного совета,  
Член-корреспондент РАН

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Аксёнов В.Л.

Попеко А.Г.

Дата оформления стенограммы: 27 марта 2019 г.