Министерство науки и высшего образования Российской Федерации ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИЯИ РАН)

УДК 539.1, 539.12, 539.14, 539.17, 539.125

Per. № 122041100017-9 Per. №

УТВЕРЖДАЮ	
Директор ИЯИ РАН,	
члкорр РАН	
	М.В. Либанов
HALL AND	
собрание и на кабря 2	2022 г.
MHOTOR CLE	
A PARTY AND A PART	

ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

122041100017-9

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД, МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, В ТОМ ЧИСЛЕ РАДИАЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, НЕЙТРОННАЯ ФИЗИКА, ФИЗИКА И ТЕХНИКА ИСТОЧНИКОВ НЕЙТРОНОВ

(промежуточный за 2022 год)

ΦЦП

Э.А. Коптелов «30» декабря 2022 г.

Руководитель НИР, д.ф-м.н.

Москва 2022 г.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель НИР, гл. науч. сотр., д-р. физ.-мат. наук

Исполнители: гл. науч. сотр., д-р. физ.-мат. наук

Вед. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук

Вед. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук

Вед. науч. сотр., д-р. физ.-мат. наук

Науч. сотр., канд. физ.-мат. наук

Нормоконтроль

30.12.2022 подпись, дата

30.12.2022 подпись, дата



иодпись, дата 30.12.2022

<u>30.12.2022</u> подпись, дата

30.12.2022 подпись, дата

30.12.2022

подпись, дата

Э.А. Коптелов (введение, разделы 2, 3, 4, заключение)

Н.М. Соболевский (введение, заключение, раздел 1)

Р.А. Садыков (введение, разделы 3.4, заключение)

С.Ф. Сидоркин (разделы 5,6)

Р.М. Джилкибаев (введение, раздел 2, заключение)

А.А. Каспаров (введение, разделы 2, 6, заключение)

О.Н. Либанова

РЕФЕРАТ

Отчет 63 с., 1 кн., 34 рис., 1 табл., 30 источн., 1 прил. ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ, МУЛЬТИФРАГМЕНТАЦИЯ, ДОЗИМЕТРИЯ НЕЙТРОНОВ, МАЛОУГЛОВОЕ РАССЕЯНИЕ НЕЙТРОНОВ, ГЛУБОКО НЕУПРУГОЕ РАССЕЯНИЕ, ДЕТЕКТОРЫ НЕЙТРОНОВ, ВКЛЮЧАЯ ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ, ИМПУЛЬСНЫЕ ИСТОЧНИКИ НЕЙТРОНОВ, ФОТОНЕЙТРОННЫЙ ИСТОЧНИК, ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ, СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ, НЕЙТРОННЫЙ СПЕКТР

Выполнялись работы по программе фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период, (2021 - 2030 годы), подпрограмма 2 "Фундаментальные и поисковые научные исследования". Область научных знаний:

1. Естественные науки. 1.3. Физические науки. 1.3.2. Физика конденсированных сред и физическое материаловедение. 1.3.3. Ядерная физика и физика элементарных частиц.

Представленный отчет отражает основные результаты, полученные сотрудниками Института в 2022 году по теме «Физика конденсированных сред, материаловедение, в том числе радиационное материаловедение, нейтронная физика, физика и техника источников нейтронов».

Основные усилия были направлены на решение задач по математическому моделированию взаимодействия частиц с веществом, включая ядерные реакции; по получению новых данных о нейтрон-ядерных взаимодействиях; развитию исследований на основе нейтронных источников ускорительного типа; совершенствованию методов исследования конденсированных сред при комплексном воздействии на материалы; развитию методов регистрации нейтронов и заряженных частиц, в том числе на источниках нейтронов ИЯИ РАН: с протонным драйвером, ИН-06, РАДЭКС, СВЗ-100, и на фотонейтронном источнике линейного ускорителя электронов ЛУЭ-8-5.

Получены новые результаты, обосновывающие расширение возможностей осуществления исследований структуры и физических свойств перспективных материалов для решения фундаментальных и прикладных задач на установках ИЯИ РАН, ОИЯИ. Перспективными направлениями являются, в частности, развитие техники позиционночувствительных детекторов нейтронов (ПЧД), развитие комплементарных методов исследований.

Перечисленный комплекс работ предполагает дальнейшее развитие.

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ	2
РЕФЕРАТ	3
СОДЕРЖАНИЕ	4
ВВЕДЕНИЕ	5
1. Развитие и применение транспортного кода SHIELD как инструмента математического моделирования взаимодействия частиц с веществом, включая развитие моделей ядерных реакций	3
1.1. Монте-Карло моделирование экспериментальных данных по переносу нейтронов в зале ускорителя электронов ЛУЭ-8-5 ИЯИ РАН1	3
1.2. Расчеты по проекту DARIA14	4
1.3. Развитие динамических и статистических моделей образования и распада нуклонной и гиперъядерной материи14	4
2. Исследования по физике деления и нейтрон-ядерных взаимодействий	5
2.1. Система сбора и обработки данных установки ИНЕС10	5
2.2. Измерение сечений радиационного захвата нейтронов на источнике РАДЭКС 10	5
3. Развитие экспериментальной базы импульсного нейтронного источника ИН-06 ИЯИ РАН для исследования конденсированных сред	9
3.1. Исследования объемного металлического стекла Ni44Nb56 с изотопным замещением с помощью глубоко неупругого рассеяния нейтронов	9
3.2. Экспериментальные исследования свойств новых материалов-метеоритов в экстремальных условиях при высоких давлениях	9
3.3. Исследования в области сцинтилляционных детекторов)
3.3.1. Исследования параметров сцинтиллятора ZnS(Ag):LiF2	1
3.3.2. Разработка прототипа двухмерного сцинтилляционного детектора	3
3.3.3. Разработка и изготовление прототипа многоканального сферического дифрактометра с высоким разрешением20	5
4. Исследование структуры перспективных материалов, в том числе при экстремальных нагрузках (высоких давлениях, низких температурах, сильных магнитных полях	9
4.1. Синтез и магнитные свойства фаз полигидридов железа при высоких давлениях мегабарного диапазона	0
 4.2. Электронные и магнитные свойства фазы железа є-Fe при высоких давлениях до 241 ГПа в области температур 4-300 К	1
4.3. Структурный переход первого рода в NiO при высоких давлениях	2
4.4. Сверхпроводимость в эффективном термоэлектрическом материале Cu3Sb0.98Al0.02Se4	3
4.5. Определение теплофизических свойств перспективных материалов	4
4.6. Исследование структуры жаропрочных сплавов методом МУРН	7

5. Моделирование процессов, инициированных пучком протонов линейного ускорителя в установках Нейтронного комплекса ИЯИ РАН, с целью улучшения и оптимизации параметров установок
5.1. Выбор методики, позволяющей решить обратную задачу восстановления спектра нейтронов
5.2. Совершенствование приборной базы нейтронного комплекса с целью повышения информативности по контролируемым параметрам и безопасности за счет установки современных приборов контроля и наблюдения41
5.3. Восстановление работоспособности СВЗ-100, в том числе пробный сеанс в декабре 2022 г
5.4. Работы в области разработки и создания перспективных компактных нейтронных источников
5.5. Радиационное материаловедение
6. Развитие новых методов исследований на нейтронных источниках
6.1. Определение временного распределения фона между импульсами ускорителя ММФ на нейтронном канале РАДЭКС
6.2. Оптимизация параметров выходного нейтронного канала W-Be фотонейтронного источника и совершенствование методов времяпролетной и позиционно-
чувствительнои регистрации неитронов низких энергии
6.2.1. Разработка нового метода измерения времени жизни нейтрона с помощью спектрометрии по времени пролета
6.2.2. Создание прототипа установки для измерения времени жизни нейтрона с помощью спектрометрии по времени пролета
6.2.3. Исследование временных и фоновых характеристик ГЭК-1 реактора ИБР-2 52
6.2.4. Разработка токового метода регистрации времяпролетных спектров
ЗАКЛЮЧЕНИЕ
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ
ПРИЛОЖЕНИЕ А Список публикаций исполнителей отчета за 2022 г

введение

1. Задача «Развитие и применение транспортного кода SHIELD как инструмента математического моделирования взаимодействия частиц с веществом, включая развитие моделей ядерных реакций»

1.1 Монте-Карло моделирование экспериментальных данных по переносу нейтронов в зале ускорителя электронов ЛУЭ-8-5 ИЯИ РАН

Цель работы — интерпретация экспериментальных данных о потоках быстрых нейтронов в экспериментальном зале линейного ускорителя электронов ЛУЭ-8-5 ИЯИ РАН, путем Монте-Карло моделирования переноса нейтронов в зале ускорителя с использованием транспортного кода SHIELD https://www.inr.ru/shield/.

Рассмотрены искажения потоков и энергетических спектров быстрых нейтронов при регистрации на импульсном ускорителе электронов для образуемых при 238Uфотоделении запаздывающих нейтронов с помощью стильбенового сцинтилляционного спектрометра, размещенного в Pb-защите. Рассмотрены зависимости этих искажений от энергии нейтронов и толщины стенок Pb-защиты, выделены вклады процессов в стенах зала облучений.

1.2 Расчеты по проекту DARIA

Цель работы – Монте-Карло моделирование вариантов компактного источника нейтронов проекта DARIA. Создание компактных источников нейтронов на основе новых технологий линейных ускорителей (Проект DARIA) рассматривается в настоящее время как актуальное направление нейтронной физики. В России ведутся работы по созданию компактных источников нейтронов на основе ускорителей протонов.

Методом Монте-Карло рассчитаны потоки нейтронов, испускаемых из мишеней различной геометрии и состава под действием пучка протонов низкой энергии (13 МэВ). Мишенью служит тонкий слой бериллия толщиной 1–2 мм, либо трехмерная конструкция, включающая бериллий, медь и полиэтилен. Приводятся энергетические спектры нейтронов. Проведено сравнение с расчетами других авторов.

1.3 Развитие динамических и статистических моделей образования и распада нуклонной и гиперъядерной материи

Цель работы – развитие моделей образования и распада возбужденной ядерной и гиперъядерной материи. Сравнение расчетов с имеющимися экспериментальными данными.

Проект посвящен изучению процессов образования и распада возбужденной гиперъядерной и нормальной ядерной материи в столкновениях тяжелых ионов.

Выполненные работы представляют собой дальнейшее развитие моделей образования (динамическая стадия) и распада (статистическое описание) возбужденной гиперъядерной и нормальной ядерной материи. Описание процессов испарения, Фермиразвала, деления и мультифрагментации обобщается на гиперъядра. Развиваются методы извлечения энергии связи гиперонов в ядрах. Результаты расчетов по образованию гиперъядер сравниваются с имеющимися экспериментальными данными.

2. Задача «Исследования по физике деления и нейтрон-ядерных взаимодействий»

Модернизации элементов установки ИНЕС по измерению полных и парциальных (n, γ) нейтронных сечений, в области ядерных реакторов и ядерной астрофизики, позволит повысить точность измерений. Установка ИНЕС использует времяпролетную (TOF) методику для измерения сечений и состоит из сцинтилляционного γ-детектора (8 секций), мониторных (4 счетчика) и пучковых (4 счетчика) нейтронных ³Не счетчиков.

В 2022 г. проводились работы по созданию пакета программ для реконструкции сечений радиационного захвата нейтронов ядром. Проводились работы по модернизации системы сбора и обработки данных. Разработан и изготовлен (8 каналов) предусилитель для нового сцинтилляционного γ-детектора на базе больших кристаллов NaI. Проведено измерение спектра нейтронов на импульсном источнике нейтронов РАДЭКС центра коллективного пользования (ЦКП) ИЯИ РАН с образцами золота ¹⁹⁷Au и тантала ¹⁸¹Ta. Измерена зависимость в спектре нейтронов пучка и фоновая составляющая в спектре радиационного захвата нейтрона ядром золота (Au¹⁹⁷) от энергии.

3. Задача «Развитие экспериментальной базы импульсного нейтронного источника ИН-06 ИЯИ РАН для исследования конденсированных сред»

3.1 Исследования объемного металлического стекла Ni44Nb56 с изотопным замещением с помощью глубоко неупругого рассеяния нейтронов

Настоящий проект направлен на развитие экспериментальной базы импульсного нейтронного источника ИН-06. Предлагаемые результаты развития позволят расширить спектр исследований, возможный на источнике ИН-06 ИЯИ РАН, и обеспечат развитие прикладной базы для исследований, имеющих потенциальное применение в материаловедении, энергетике, обработке материалов и других отраслях индустрии.

Одно из интересных направлений развития исследований объемного металлического стекла Ni44Nb56 с изотопным замещением с помощью глубоко неупругого рассеяния нейтронов [1] также предполагается развивать и на РАДЭКСе.

3.2 Экспериментальные исследования свойств новых материаловметеоритов в экстремальных условиях при высоких давлениях

Представлены результаты экспериментов по размагничиванию гидростатическим давлением до 1,8 ГПа. Обычные хондриты L и H — наиболее распространенный тип метеоритов, в которых сплавы Fe-Ni являются основным магнитным элементом. Использовалась немагнитная ячейка высокого давления типа цилиндр-поршень из сплава «Русский» (NiCrAl). Методика позволяла измерять остаточную магнитную намагниченность исследуемых образцов как непосредственно под давлением, так и при декомпрессии. Давление всегда применялось в почти нулевом магнитном поле (<5 мкTл). Эксперименты показали, что при гидростатическом давлении до 1,8 ГПа обыкновенные хондриты теряют до 51 % своего исходного состояния [2].

3.3 Исследования в области сцинтилляционных детекторов

Исследования в области сцинтилляционных детекторов включают в себя исследования материалов, возможных для использования при создании детекторов, тестирования различных вариантов сцинтилляционных детекторов и оптимизации их параметров. Настоящий проект направлен на развитие экспериментальной базы и методов исследований на источнике ИН-06 ИЯИ РАН. Также предполагается развитие технологии изготовления сцинтилляционных детекторов, создание новых видов нейтронных детекторов, исследование свойств сцинтиллятора для подбора оптимальных параметров, изготовление и максимизация эффективности регистрации нейтронов.

Полученные результаты позволят оптимизировать параметры детекторов, расширить спектр возможных исследований с использованием сцинтилляционных детекторов, а также развить технологию изготовления сцинтилляционных детекторов нейтронов различного типа.

4. Задача «Исследование структуры перспективных материалов, в том числе при экстремальных нагрузках (высоких давлениях, низких температурах, сильных магнитных полях»

Изучение природы электронных и фазовых переходов при высоком давлении имеет фундаментальную ценность как метод плавного изменения межионных расстояний и углов химсвязей в кристалле, что даёт возможность тонкой подстройки структуры к оптимальным или рекордным значениям параметров. Применение же техники высоких давлений для изучения геофизики и особенностей внутреннего строения и динамики Земли и других планет, представляется просто очевидным и единственно возможным экспериментальным методом. Развитие детекторных систем требуется для создания высокоэффективных и оптимальных детекторов для различных применений.

Были проведены исследования кристаллической структуры, электронных и магнитных свойств веществ в экстремальных условиях, исследование фазовых переходов и построение фазовых диаграмм совместно с ИК РАН (г. Москва), HPSTAR (г. Шанхай, Китай), DESY (синхротрон PETRA-III, г. Гамбург, Германия). Были синтезированы и изучены свойства новых высокотемпературных сверхпроводников в экстремальных условиях высоких давлений совместно с ИК РАН (г. Москва), HPSTAR (г. Шанхай, Китай), DESY (синхротрон PETRA-III, г. Гамбург, Германия), синхротрон ESRF (Гренобль, Франция). Были изучены важные минералы для физики Земли, сильно-коррелированных электронных систем и мультиферроиков в экстремальных условиях высоких давлений и криогенных температур совместно с ИК РАН (г. Москва), HPSTAR (г. Шанхай, (г. Шанхай, Китай), DESY (синхротрон РЕТRA-III, г. Гамбург, Германия), синхротрон ESRF (Гренобль, Франция).

Создан комплекс экспериментальных установок для проведения исследований в экстремальных условиях высоких давлений и низких температур.

Проводилось исследование структуры жаропрочных сплавов методом МУРН.

Объектом исследования являются новые материалы, а именно: жаропрочные сплавы, в том числе ультрадисперсные.

Целью данной работы являлось исследование структуры жаропрочных сплавов методом малоуглового рассеянния нейтронов (МУРН), поиск материалов, оптимальных для изготовления камер высокого давления, которые могут использоваться в МУРН, т.е. немагнитных, обладающих минимальным сечением малоуглового рассеяния нейтронов и мксимальной твердостью. Получены спектры МУРН на немагнитных сплавах на основе Ti: Ti — основной, Al — 6-7%, Mo - 2.8 — 3.8%, 38ХНВЮ (Ni — основной, Cr — 36-39%, W—5,5-6,5%, Al — 3.0-3.8%), 40ХНЮ (Ni — основной, 38 - 41% Cr, 3.3-3.8% Al).

5. Задача « Моделирование процессов, инициированных пучком протонов линейного ускорителя в установках Нейтронного комплекса ИЯИ РАН, с целью улучшения и оптимизации параметров установок»

Осуществлена разработка методики улучшения энергетического разрешения спектров, полученных на нейтронном спектрометре по времени замедления в свинце, для различных типов взаимодействия нейтронов с ядрами вещества.

Физическая установка – спектрометр по времени замедления нейтронов в свинце (СВЗ-100) расположена в Экспериментальном комплексе Института ядерных исследований (ЭК ИЯИ РАН). Используется для исследования реакций взаимодействия нейтронов с ядрами изучаемых элементов. Недостатком прибора является низкое разрешение, которое следует преодолеть. Используя функцию отклика спектрометра

можно решить задачу восстановления аппаратурных спектров (обратная задача) до параметров близких к "истинным".

Регистрировались спектры радиационного захвата нейтронов (n,γ) и спектры деления элементов под воздействием нейтронов (n,f) -- аппаратурные спектры.

Приведены сведения о выполнении работ по совершенствованию приборной базы с целью поднятия эффективности работы нейтронного комплекса.

Продолжена работа по исследованию кинетики радиационного повреждения металлов в условиях нейтронного облучения. Рассмотрен механизм вакансионного распухания с учетом генерации в каскадах столкновений одномерно движущихся междоузельных атомов.

6. Задача «Развитие новых методов исследований на нейтронных источниках»

6.1 Определение временного распределения фона между импульсами ускорителя ММФ на нейтронном канале РАДЭКС

Изучение характеристик кластерного распада возбуждённых состояний легких ядер чрезвычайно важно для исследования механизма ядерных реакций и структуры ядер (см. работу [3]). Имеются указания на существование квазимолекулярной кластерной структуры типа α -*n*- α и α -4*n*- α в возбужденных состояниях изотопов бериллия (см. работу [4]). Предложено проведение исследования процессов образования и распада таких кластерных структур ядер ⁹Ве и ¹²Ве на каскадных нейтронах импульсного источника РАДЭКС ИЯИ РАН (см. работу [5]). С этой целью было проведено кинематическое моделирование реакции ${}^{13}C(n, 2p){}^{12}Be с возбуждением кластерных состояний при энергии$ 40–150 МэВ и предложены методы измерения их характеристик на импульсном источнике нейтронов (см. работу [6]). Необходимо проведение тестовых измерений уровня фона, его состава и распределения во времени в интервалах между нейтронными импульсами. Образование и распад кластерных состояний в реакции ${}^{13}C(n, 2p){}^{12}Be$ сопровождается вылетом протонов, нейтронов, γ-квантов, β- и α-частиц. Вблизи порога реакции (≈40 МэВ) образуются основное или низколежащее возбужденное (3 – 4 МэВ) состояния ¹²Ве с последующим β -распадом (≈ 20 мс) на ядра ¹⁰В, ¹¹В и нейтроны. При энергии 60 – 100 МэВ возбуждаются состояния типа ⁶H-⁶He и α -⁸He, которые испытывают α -кластерный распад. Для тестовых измерений на каскадных и испарительных нейтронах импульсного источника РАДЭКС предлагаются реакции с образованием короткоживущих (≤20 мс) изотопов бериллия, бора и ^{24m}Na с регистрацией p, n, γ -квантов, α - и β -частиц: ⁹Ве $(n, 2n)^8$ Ве, ¹²С $(n, p)^{12}$ В, ¹²С $(n, n \alpha)^8$ Ве, ¹³С $(n, p)^{13}$ В, ¹⁵N $(n, \alpha)^{12}$ В, ²⁷Аl $(n, \alpha)^{24m}$ Na. Сечения этих реакций при энергии нейтронов ≈ 14 МэВ составляет 0,1 – 0,2 бн. Регистрация в совпадении протонов, α -частиц, нейтронов и продуктов распада возбужденных состояний ядер позволят существенно подавить фон и исследовать предлагаемые реакции. Для определения возможности таких измерений необходимо знание уровней, источников и временное распределение фонов на предполагаемой экспериментальной установке. В частности, для возможности регистрации распадов долгоживущих состояний необходимо знание о временных распределениях таких фонов в промежутках между импульсами нейтронного источника.

6.2 Оптимизация параметров выходного нейтронного канала W-Be фотонейтронного источника и совершенствование методов времяпролетной и позиционно-чувствительной регистрации нейтронов низких энергий

Для проведения экспериментов на фотонейтронном источнике ИЯИ РАН (см. работу [7]) в его замедлителе был создан выводной канал с коллиматором нейтронов длиной около 50 см и диаметром 3 см. Распределение медленных нейтронов в потоке, в частности, в тепловой области энергий в экспериментальном зале исследовалось различными методами (см. работы [8, 9]). Однако, многие эксперименты должны выполняться при промежуточных энергиях, например, в области нейтронных резонансов на ядрах. Примером может служить пространственное исследование вкраплений золота в геологических образцах, используя хорошо известный резонанс на ядре ¹⁹⁷Au с энергией около 5 эВ. Ранее мы обнаружили, что детектор нейтронов на основе слоя твердого изотопа ¹⁰В и проволочной пропорциональной камеры хорошо подходит для исследования пространственного распределения нейтронов как в тепловой, так и в промежуточной области энергий нейтронов (см. работу [10]). Важным преимуществом этого детектора является то, что он обладает избирательной чувствительностью к направлению движения нейтронов (см. статьи 1-2 Приложения А). Для того чтобы выделить нейтроны промежуточных энергий используется кадмиевый фильтр, который поглощает нейтроны с энергией ниже 0,55 эВ. Мы можем пренебречь влиянием быстрых нейтронов, выбирая достаточно большое расстояние от центра нейтронообразующей мишени ~ 200 см и учитывая, что сечение взаимодействия нейтронов с тонким слоем ¹⁰В мало. Для контроля общего потока нейтронов в экспериментальном зале использовался стандартный ³Несчетчик. В результате было обнаружено существенное различие в форме распределения двух групп нейтронов с энергией выше и ниже кадмиевой границы. Если распределение нейтронов симметричную гауссову форму, промежуточных имеет то форма распределения медленных нейтронов носит сложный характер.

6.3 Совместные работы с ОИЯИ по развитию нейтронных исследований

Работы по развитию новых методов исследования фундаментальных взаимодействий при низких энергиях нейтронов ведутся совместно с ЛНФ ОИЯИ, согласно Протоколу № 4940-4-20/22 о выполнении совместной научно-исследовательской работы.

Предложен новый метод (ВЖН) на импульсных источниках нейтронов, основанный на изменении спектра нейтронов за время их пролета достаточно большой пролетной базы, за счет их распада. Достоинство предложенного метода в том, что в нем используются относительные измерения. Измерения (ВЖН) на реакторе ИБР-2 имеют свои трудности, связанные с очень большой импульсной плотностью потока нейтронов и большой величиной фона запаздывающих нейтронов.

Разработка нового метода измерения времени жизни нейтрона

Предложено выполнить измерения времени жизни нейтрона методом времени пролета. Цель работы – закрыть проблему экспериментальной нейтронной аномалии, заключающейся в принципиальном различии во временах жизни нейтрона, полученных экспериментально пучковым методом и методом хранения ультрахолодных нейтронов.

Исследование временных и фоновых характеристик ГЭК-1 реактора ИБР-2

Объектом исследования являются времяпролетные спектры запаздывающих нейтронов и определение фоновых условий на 1-ом канале ИБР-2.

Цель работы – изучение характеристик ГЭК-1 реактора ИБР-2 и создания прототипа установки для измерения времени жизни нейтрона времяпролетным методом. Так как ИБР-2 был остановлен на ремонт, был проведен анализ результатов полученных в начале 21-го года и подготовлена статья по фону запаздывающих нейтронов.

Разработка интегрального метода регистрации времяпролетных спектров

Цель работы – разработка метода регистрации времяпролетных спектров интенсивных нейтронных потоков.

Создание установки для исследования низколежащих р-волновых резонансов

Цель работы - создание установки для исследования низколежащих р-волновых резонансов.

1. Развитие и применение транспортного кода SHIELD как инструмента математического моделирования взаимодействия частиц с

веществом, включая развитие моделей ядерных реакций

1.1. Монте-Карло моделирование экспериментальных данных по переносу нейтронов в зале ускорителя электронов ЛУЭ-8-5 ИЯИ РАН

Из ядер-осколков от деления ядер-актиноидов испускаются и "мгновенные" нейтроны (MH), при временах относительно акта деления $\leq 10^{-13}$ с, и "запаздывающие" нейтроны (3H), после β -распадов осколков с известными к настоящему времени периодами полураспада 0,2 с $\leq T_{1/2} \leq 56$ с. При этом число ³H $\leq 10^{-2}$ от числа MH. Кроме того, из ядер-осколков могут испускаться фотоны со сравнительно большими энергиями, проникающая способность которых, хотя и уступает характерной для быстрых нейтронов, но всё же весьма значительна. В свою очередь, среди таких фотонов из ядер-осколков можно аналогично выделить практически мгновенные фотоны и запаздывающие фотоны, составляющие часть фона фотонов при регистрации MH и 3H соответственно [11, 12].

Могут образовываться и иные фоновые фотоны как от самих ядерных реакций под действием падающих частиц, но отличных от реакций деления, так и от распадов различных активированных ядер, образуемых в таких реакциях. Кроме того, свой вклад в фоновые фотоны могут вносить и ядерные реакции под действием вторичных частиц (прежде всего, вторичных нейтронов, вызывающих реакции их неупругого рассеяния и радиационных захватов).

Транспортный код SHIELD применялся для оценки искажений регистрации запаздывающих нейтронов от ²³⁸U фотоделения сцинтилляционным спектрометром, помещенным в Pb-защиту. Рассмотрены искажения потоков и спектров быстрых нейтронов, образуемых при ²³⁸U-фотоделении с помощью сцинтилляционного спектрометра, помещаемого в "глухой" свинцовый "дом" пассивной защиты. Рассмотрены зависимости этих искажений от энергии нейтронов и толщины стенок Pb-"дома", выделены вклады процессов в стенах зала облучений [13].

Модельным путем исследовано влияние "глухого" свинцового "кожуха" на корректность регистрации потоков и спектров быстрых запаздывающих нейтронов от фотоделения ядер-актиноидов на импульсном линейном ускорителе электронов. Показано, что искажения регистрируемых спектров и особенно потоков существенны, быстро растут с увеличением толщины свинцовой защиты и нуждаются в своей тщательной оптимизации между уменьшением фона и вносимыми искажениями. После оптимизации установки могут быть внесены поправки к функции отклика

сцинтилляционного детектора. Дополнительная матрица энергия-амплитуда может быть точно рассчитана таким путем и использована при получении потоков и энергетических распределений запаздывающих нейтронов. Таким образом, полученные данные важны для оптимизации защиты детекторов и внесения коррекции в выходы нейтронов и энергетические распределения нейтронов, получаемых в ходе измерений.

1.2. Расчеты по проекту DARIA

Цель работы – Монте-Карло моделирование вариантов компактного источника нейтронов проекта DARIA. Создание компактных источников нейтронов на основе новых технологий линейных ускорителей (Проект DARIA) рассматривается в настоящее время как актуальное направление нейтронной физики. В России ведутся работы по созданию компактных источников нейтронов на основе ускорителей протонов.

В отчетном 2022 году методом Монте-Карло с использованием транспортного кода SHIELD <u>https://www.inr.ru/shield/</u> были рассчитаны потоки нейтронов, испускаемых из мишеней разной геометрии и состава: рассматривался тонкий слой бериллия 1-2 мм, либо - трехмерная конструкция, включающая бериллий, медь и полиэтилен. Энергия пучка протонов принята низкой, E_p=13 МэВ. Вычислялись энергетические спектры нейтронов, вылетающих из мишени.

Разработка компактных источников нейтронов на базе новых технологий линейных ускорителей (проект DARIA) в настоящее время широко обсуждается и рассматривается как актуальное направление нейтронной физики (см. например, <u>https://www.atomic-energy.ru/news/2019/10/08/ 98 067</u>).

Преимуществом этого проекта является отсутствие делящихся элементов, что обеспечивает экологическую чистоту и снимает необходимость серьезной охраны. Моделирование методом Монте-Карло выхода нейтронов из мишенных устройств под действием пучка протонов проводили с использованием разработанного в ИЯИ РАН транспортного кода SHIELD (http://www.inr.ru/shield/).

Представлены числовые данные о выходе нейтронов для разных конфигураций мишени при энергии протонов E_p = 13 МэВ, а также энергетические спектры нейтронов. Сравнение с данными работы (https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165462) о выходе нейтронов из тонкого слоя бериллия показывает согласие по порядку величины.

1.3. Развитие динамических и статистических моделей образования и распада нуклонной и гиперъядерной материи

Проект посвящен изучению процессов образования и распада возбужденной гиперъядерной и нормальной ядерной материи в столкновениях тяжелых ионов.

Цель работы — развитие моделей образования и распада возбужденной ядерной и гиперъядерной материи. Сравнение расчетов с имеющимися экспериментальными данными.

Выполненные работы представляют собой дальнейшее развитие моделей образования (динамическая стадия) и распада (статистическое описание) возбужденной гиперъядерной и нормальной ядерной материи. Описание процессов испарения, Фермиразвала, деления и мультифрагментации обобщается на гиперъядра. Развиваются методы извлечения энергии связи гиперонов в ядрах. Результаты расчетов по образованию гиперъядер сравниваются с имеющимися экспериментальными данными.

Работы выполнены A.C.Ботвиной (с соавторами) в Frankfurt Institute for Advanced Studies (Германия).

2. Исследования по физике деления и нейтрон-ядерных взаимодействий

2.1. Система сбора и обработки данных установки ИНЕС

Система состоит из электроники детекторов (усилители и формирователи сигналов, 16-канальный временной кодировщик (TDC) с USB интерфейс) и C++ программы по обработке и сжатию цифровой информации. Цифровые сигналы с гамма детектора (8 каналов) и He3 счетчиков (8 каналов) поступают на 16-канальный временной кодировщик (TDC) с возможностью обработки цифровой информации (2 байта) с частотой 10 МГц (каждые 100 нс) со скоростью 20 MB/с. Предварительная обработка и сжатие информации позволяет сократить объем данных для записи на диск в 650 раз. Типичный набор данных с установки за время 7 часов составляет ~ 800 MB. Аналоговые сигналы обрабатываются выборочно 16-канальным АЦП САЕN DT5742 (waveform digitizer). Модернизация системы сбора состоит в том, что разрабатывается новый сцинтилляционный γ-детектор на базе больших кристаллов NaI. Новый детектор состоит из 4 больших кристаллов NaI. Каждый кристалл просматривается двумя быстрыми ФЭУ XP2020, что позволит подавить фон от случайных событий. Текущий счет детекторов установки и графики работы детекторов за предыдущие сутки выводится на web cite установки <u>http://ines.inr.ru:1880/ui</u>.

2.2. Измерение сечений радиационного захвата нейтронов на источнике РАДЭКС

Источник нейтронов РАДЭКС использует вольфрамовую мишень с водяным охлаждением для образования нейтронов импульсным протонным пучком. Протонный пучок имеет энергию 209 – 267 МэВ, импульсный ток 5-7 мА, длительность 0,3 мкс с частотой импульсов 50 Гц. Энергия нейтронов определяется по времени пролета, измеряемое многоканальным TDC кодировщиком с непрерывной записью сигналов от 100 нс течение 19.66 мс. гамма-детектора каждые В который запускается синхроимпульсом протонного пучка. Время пролета нейтрона Т [мкс] определяется пролетной базой установки L [м] и энергией нейтрона E [эВ], следующим образом T = 72,29 L E^{-1/2}. Пролетная база установки L определяется расстоянием между мишенью источника и мишенью установки и равна 49,42 м. Относительная погрешность в измерении энергии нейтрона зависит от временной неопределенности бТ, следующим образом $\delta E/E = 2,78 E^{1/2} \delta T/L$ (%). Основной вклад во временную неопределенность δT вносит длительность протонного пучка равная 0,3 мкс. Можно оценить время пролета и относительную ошибку в измерении энергии для нейтрона с энергией 100 эВ, которые

равны 358 мкс и 0,22%, соответственно. Нейтронные каналы источника РАДЭКС направлены на вольфрамовую мишень и расположены близко к оси протонного пучка, поэтому в каналы попадают первичные гамма-кванты и высокоэнергичные нейтроны, образованные протонами в мишени. Энергетический спектр нейтронов простирается вплоть до максимальной энергии равной энергии протонов.

Для реконструкции параметров резонансов необходимо измерить зависимость спектра нейтронов от энергии и радиационный фон в отсутствии мишени. Спектр нейтронов измеряется газовыми He3 счетчиками нейтронов, установленными в пучке перед мишенью [14]. Радиационный фон измеряется сцинтилляционным γ -детектором в отсутствии мишени. На рисунке 2.1 а показан измеренный спектр нейтронов источника РАДЭКС в интервале от 10 до 30000 эВ с результатом фита спектра зависимостью С/Е α , с параметром $\alpha = 0,9$. Параметр α для спектра Ферми равен 1. Провал в спектре нейтронов в области энергий 340 эВ связан с примесью марганца Mn⁵⁵ в материале (D16T) фланцев нейтронного канала. Измеренный спектр нейтронов (рисунок 2.1 а) имеет хорошее согласие со спектром нейтронов (рисунок 2.1 б), смоделированным по программе МСNP, для источника РАДЭКС в интервале от 10 до 30000 эВ.



Рисунок 2.1 – (а) – Измеренный спектр нейтронов источника РАДЭКС в интервале от 10 до 30000 эВ с результатом фита спектра зависимостью С/Е^α, с параметром α = 0,9+/- 0,02. (б) – Смоделированный спектр нейтронов источника РАДЭКС по программе МСNP

На рисунке 2.2 а показан времяпролетный спектр радиационного захвата нейтрона ядром золота (Au¹⁹⁷), измеренный сцинтилляционным детектором установки, и результат фита фоновой составляющей спектра зависимостью С/Е^{α}. Независимое измерение радиационного спектра без мишени Au показано на рисунке 2.2 б. Зависимость dN/dE = C/E^{α} от энергии фоновой составляющей спектра радиационного захвата нейтрона ядром золота Au ($\alpha = 1, 1 + 0, 01$) хорошо

согласуется с независимым измерением радиационного спектра ($\alpha = 1,104$ +/- 0,007) без мишени.



Рисунок 2.2 – (а) – Измеренный спектр радиационного захвата нейтрона ядром золота (Au¹⁹⁷) и результат фита фоновой составляющей спектра зависимостью C/E^α, с параметром α = 1,1 +/– 0,01. (б) – Независимое измерение радиационного спектра без мишени Au и результат фита спектра зависимостью C/E^α, с параметром α = 1,1 +/– 0,007

В рамках модернизации установки разработан и изготовлен (8 каналов) предусилитель для нового сцинтилляционного γ-детектора на базе больших кристаллов NaI [15]. Принципиальная схема предусилителя с парафазным выходом показана на рисунке 2.3.



Рисунок 2.3 – Принципиальная схема предусилителя с парафазным выходом

3. Развитие экспериментальной базы импульсного нейтронного источника ИН-06 ИЯИ РАН для исследования конденсированных сред

3.1. Исследования объемного металлического стекла Ni44Nb56 с изотопным замещением с помощью глубоко неупругого рассеяния нейтронов

Наиболее интенсивно эксперименты по глубокому неупругому рассеянию начали проводиться в 80-е годы 20 века, когда стало возможным создание импульсных источников нейтронов с интенсивными потоками эпитепловых нейтронов. Данный метод с использованием нейтронов с энергиями от нескольких эВ до кэВ позволяет исследовать атомную динамику в конденсированных средах, в частности, энергию отдачи, кинетическую энергию и среднеквадратичное смещение атомов. Усовершенствование нейтронных спектрометров за последние 20 лет позволило проводить эксперименты с более широким кругом образцов (стекла, гидриды металлов, сплавы и т.д.) при различных термодинамических условиях [16].

Беспорядок в никель-ниобиевом металлическом стекле Ni44Nb56 изучался нами с помощью метода глубокого неупругого рассеяния нейтронов (DINS), дополненный изотопическим замещением.

Полученные результаты согласуются с картиной, согласно которой беспорядок вызывает симметричное уширение дисперсии фононов кривых, а смягчение фононов ограничено низкоэнергетическими модами, несущими незначительную величину ядерной кинетической энергии [1]. Полученные результаты имеют важное значение для разработки свойств объемных металлических стекол [16].

3.2. Экспериментальные исследования свойств новых материаловметеоритов в экстремальных условиях при высоких давлениях

Гиперскоростные удары представляют собой фундаментальный процесс эволюции твердого вещества в нашей Солнечной системе. Ударные волны, генерируемые во время ударов, изменяют целевые породы и минералы уникальным образом, а также могут стирать или перезаписывать магнитные записи твердых тел Солнечной системы (Марс, Луна, астероиды...), а также палеомагнитные записи метеоритов. Известно, что Fe-Ni является основным магнитным носителем в большинстве групп метеоритов. Интерпретация палеомагнитных данных внеземных материалов и, в частности, поиск первичных намагниченностей, полученных в молодой Солнечной системе, требуют знания ударных воздействий на остаточный магнетизм Fe-Ni-содержащих метеоритов. Лабораторные ударные эксперименты характеризуются проблемой калибровки ударного давления и возможными механическими повреждениями исследуемых образцов.

Эксперименты со статическим давлением позволяют лучше калибровать давление и могут быть неразрушающими для образцов [17]. До недавнего времени такие эксперименты характеризовались ограниченным диапазоном давлений, негидростатической нагрузкой и ограниченным объемом образца, что позволяло работать только с отдельными магнитными зернами, а не с массивными образцами. Однако важно исследовать объемные образцы, представляющие естественные процессы, что требует относительно большого объема образца.

Проведены исследования и опубликована наша статья о размагничивании под гидростатическим давлением большего набора обычных хондритов в расширенном на 50% диапазоне гидростатического давления [2].

В статье представлены результаты экспериментов по размагничиванию гидростатическим давлением до 1,8 ГПа. Обычные хондриты L и H — наиболее распространенный тип метеоритов, в которых сплавы Fe-Ni являются основным магнитным элементом. Использовалась немагнитная ячейка высокого давления [18] типа цилиндр-поршень из сплава «Русский» (NiCrAl) [19]. Методика позволяла измерять остаточную магнитную намагниченность исследуемых образцов как непосредственно под давлением, так и при декомпрессии. Давление всегда применялось в почти нулевом магнитном поле (<5 мкТл). Эксперименты показали, что при гидростатическом давлении до 1,8 ГПа обыкновенные хондриты теряют до 51 % своего исходного состояния [2].

3.3. Исследования в области сцинтилляционных детекторов

Настоящий проект направлен на развитие экспериментальной базы и методов исследований на источнике ИН-06 ИЯИ РАН. Также предполагается развитие технологии изготовления сцинтилляционных детекторов, создания новых видов нейтронных детекторов, исследования свойств сцинтиллятора для подбора оптимальных параметров изготовления и максимизации эффективности регистрации нейтронов.

Предлагаемые результаты позволят оптимизировать параметры детекторы, расширить спектр возможных исследования с использованием сцинтилляционных детекторов, а также развить технологию изготовления сцинтилляционных детекторов нейтронов различного типа.

Были проведены исследования параметров нейтронных детекторов для развития приборной базы нейтронного источника ИН-06.

В частности, проведено сравнение эффективности двух вариантов детектора нейтронов на основе ZnS(Ag):⁶LiF. За основу детекторов были взяты разработанные ранее [20, 21] в ИЯИ РАН сцинтилляционные детекторы нейтронов на основе органического световода и кремниевых фотоумножителей. Были собраны 2 детектора, один с 2 слоями

сцинтиллятора, второй с 3 слоями. Размеры детектора 5х50 мм. Тестирование проводилось на установке "КРИСТАЛ" источника ИН-06 ИЯИ РАН. Детекторы располагались под углом 90 градусов и фиксировали рассеянное излучение тепловых нейтронов от образца ванадия. Эффективность 3-слойного детектора оказалась выше на 38% процентов, чем 2-слойного. Метод изготовления обоих детекторов не отличается и добавление еще одного слоя сцинтиллятора не приведет к сильному удорожанию детектора, но при этом позволит заметно увеличить эффективность регистрации тепловых нейтронов.

3.3.1. Исследования параметров сцинтиллятора ZnS(Ag):LiF

Спектры оптического поглощения в ZnS(Ag):⁶LiF и алмазной наковальне были измерены с помощью оптической установки на базе монохроматора МДР-41. В установке было использовано два коллиматора и два полосовых фильтра (360-600 и 600-1000 нм), фокусировка пятна источника света сформированного коллиматором со стороны источника света в плоскости образца, и последующая фокусировка на входной щели монохроматора, осуществляется двумя зеркальными объективами ThorLabs LMM 15x UVV. Перед входной щелью монохроматора располагаются полосовые фильтры в зависимости от диапазона измерения.

На рисунке 3.1 приведены спектры поглощения в 2-х образцах ZnS разной толщины, примерно ~ 1 и 4 мкм. Биения в спектре поглощения образца № 1 обусловлены интерференцией света на толщине образца. Учитывая, что коэффициент преломления ZnS в видимой области равен примерно $n_{ZnS} \sim 2,355$, из периода биений можно оценить толщину образца № 1 порядка ~ 1 мкм. Толщина образца № 2 оценивается по величине коэффициента поглощения, она примерно в четыре раза больше коэффициента поглощения, она примерно в четыре раза больше коэффициента



Рисунок 3.1 – Спектры поглощения в 2-х образцах ZnS разной толщины, ~ 1 и 4 мкм, Для сравнения зелёной линией приведён спектр люминесценции, индуцированный лазером 405 нм. Пик люминесценции на 466 нм (2.66 эВ)

На рисунке 3.2 приведен спектр поглощения от алмаза (алмазной наковальни) толщиной ~ 2 мм, который служил подложкой для образцов.



Рисунок 3.2 – Спектр оптического поглощения алмазной наковальни. Измеренный спектр очень хорошо согласуется со спектрами алмаза Іа типа [2]

Из спектра поглощения можно оценить край поглощения (оптическую щель) E_{opt}~ 4 eV (308 нм). В нём также присутствует узкая безфононная линия поглощения при 415 нм (2,99 эВ) (БФЛ пик) и последующая полоса поглощения N3 (поглощение на N₃V- центрах). Спектры поглощения ZnS образцов показывают, что край поглощения отсутствует в исследуемом диапазоне длин волн до 308 нм (4 эВ) в УФ области. Для его изучения требуется использовать подложку с краем поглощения, расположенным дальше в УФ область (длина волны короче 308 нм), например сапфиром (Al₂O₃), и желательно с дейтериевой лампой в качестве источника света. Для сравнения на рисунке 3.1 зелёной линией приведён спектр люминесценции ZnS, индуцированный лазером 405 нм. Пик люминесценции приходится на длину волны 466 нм (2,66 эВ).

3.3.2. Разработка прототипа двухмерного сцинтилляционного детектора

Был разработан и изготовлен прототип двухмерного позиционно-чувствительного детектора нейтронов(П2Д) на основе сцинтилляторов ZnS/⁶LiF и твердотельных фотоэлектронных умножителей(SiPM). Базовая конструкция двухмерного ПЧС основана на комбинации сцинтиллятора ZnS/⁶LiF, световода и SiPM.

П2Д представляет собой композитную систему из сцинтиллятора-световода и SiPM. В качестве сцинтиллятора используется один слой нейтроно-чувствительного сцинтиллятора ZnS/⁶LiF, который прикреплен между двух слоев световода толщиной 2 мм с помощью оптического цемента.

Для сбора фотонов используются кремниевые фотоумножители, которые расположены по четырем краям детектора. Размер активной области детектора 50×50 мм. Принцип работы такого двухмерного ПЧС показан на рисунке 3.3.



кремниевый фотоциножитель

кремниевый фотоумножитель

Рисунок 3.3 – Принцип работы двухмерного ПЧС

В зависимости от места регистрации нейтрона длина пробега до каждого из 4 SiPM будет разная (за исключением попадания нейтрона точно по центру). Для примера, на рисунке 3.3 длина пробега L1-2-3-4 будет разная, следовательно, будет разное значение амплитуды на кремниевых фотоумножителях.

На рисунке 3.4 представлена фотография внешнего вида среза световода в месте крепления SiPM. На рисунке 3.5 представлен внешний вид активной области прототипа П2Д на основе сцинтиллятора ZnS/⁶LiF.



Рисунок 3.4 – Внешний вид среза световода в месте крепления SiPM. 1 – светоотражающий состав, 2 – световод на основе PLEXYGLASS, 3 – сцинтиллятор





В качестве диффузионного отражателя П2Д использован состав, основанный на BaSO₄ (40% акриловая дисперсия, аддитивы, вода и 60% BaSO₄). Состав способен отражать до 98,1% видимого излучения. Краска наносилась на весь объём световода, за исключением места крепления SiPM.

Регистрация нейтронов происходит следующим образом. Нейтрон, попав в сцинтиллятор, вызывает вспышку света, которая распространяется по световоду к

четырем кремниевым фотоумножителям, закрепленным на концах счетчика, и SiPM регистрируют дошедшие до них фотоны.

В зависимости от расстояния, пройденного светом, меняется его интенсивность. На этом основан метод получения координаты – на сравнении значений амплитуды и/или заряда с четырех SiPM, расположенных в торцах световода.

На рисунке 3.6 показан пример соотношения интенсивностей, смоделированных в программе TracePro для детектора с активной областью 50×50 мм с диффузионным отражателем на основе Фторпласт-4.



Рисунок 3.6 – Пример карты интенсивностей для двух противоположных SiPM Сигналы с четырех торцов световода регистрируются четырьмя кремниевыми фотоумножителями и поступают на зарядочувствительные предусилители. Затем через сумматор и дискриминатор нижнего уровня сигналы поступают в аналого-цифровой преобразователь (АЦП) для обработки, а затем в компьютер с регистрирующей программой, которая выводит полученный спектр с координатами зарегистрированных нейтронов. Анализируя амплитуды, можно получить координаты места регистрации нейтрона.

Выбор базовой конструкции прототипа П2Д на основе сцинтилляторов ZnS/⁶LiF и твердотельных фотоэлектронных умножителей основывается на новом методе определения координаты, а также с учетом следующих критериев:

 высокая эффективность регистрации (35–90%) в широком диапазоне длин волн падающего излучения;

 стабильность рабочих характеристик в процессе эксплуатации в течении длительного времени;

3) низкая чувствительность к гамма-излучению;

4) большой ресурс работы детектора без необходимости технического обслуживания;

5) надежность и простота обслуживания.

Для усиления сигнала и подачи питания на SiPM разработана схема предусилителя. Для организации работы с детектором требуется 4 канала. С каждого SiPM сигнал снимается двумя предусилителями: один канал – это усилитель со временем интегрирования около 2 мкс, второй – обычный не интегрирующий усилитель для анализа временных характеристик и формы сигнала. На рисунке 3.7 показан внешний вид разработанной электроники.



Рисунок 3.7 – Предусилитель 2ПД

3.3.3. Разработка и изготовление прототипа многоканального сферического дифрактометра с высоким разрешением

Для организации работы многоканального детектора разработана управляющая программа для Программируемой логической интегральной схемы, которая обеспечивает счет и накопление данных с множества каналов нейтронных детекторов для импульсных источников нейтронов (TDC). Блок-схема работы программы показана на рисунке 3.8.



Рисунок 3.8 – Блок-схема работы TDC

Логика работы: По приходу синхроимпульса, он обрабатывается цифровыми фильтрами и поступает на модуль задержки, где происходит задержка сигнала на величину, установленную в регистр задержки. После сигнал синхроимпульса запускает генератор ворот, который выдает 4096 импульсов для записи с интервалом, равным регистру ширины канала, и сигнал старта. По сигналу «сброс» происходит сброс индивидуального счетчика на каждом канале. По сигналу «запись» происходит суммирование текущего показания счетчика с данными в BRAM. После каждого входного сигнала стоит модуль цифровой обработки для фильтрации помех.

16 счетчиков и 16 ячеек BRAM объединены одним модулем верхнего уровня, который отвечает за запись и чтение памяти, распределения сигналов с генератора ворот, и обработку сигнала READY (запуск счета).

Тор Module Controller отвечает за обработку команд по UART интерфейсу (Чтение, запись, сигнал READY), установку регистров задержки и ширины канала. Также он отвечает за измерение частоты входного сигнала синхроимпульса.

Модуль UART работает на частоте 921600 бод, parity - нет, data bit - 8 bit, stop bit - 1 bit.

Логика работы программы была протестированна на источнике ИН-06 ИЯИ РАН, времяпролетный спектр полученный с 2х детекторов показан на рисунке 3.9.



Рисунок 3.9 – Настройка и тестирование TDC

4. Исследование структуры перспективных материалов, в том числе при экстремальных нагрузках (высоких давлениях, низких температурах, сильных магнитных полях

Настоящий проект направлен на исследование свойств, фазовых превращений и новых эффектов в простых и сложных материалах, возникающих при изменении межионных расстояний под воздействием сверхвысоких давлений (вплоть до 2-3 Meraбар), высоких температур (вплоть до 3000-5000 К), криогенных температур (2-300К), и сильных магнитных полей (до 9 Тесла). Такие давления и температуры создаются в камерах высокого давления с алмазными наковальнями. Это позволит решать важные прикладные и фундаментальные задачи материаловедения, задачи синтеза новых веществ, а также фундаментальные задачи геофизики, включая проблемы сильно коррелированных электронных систем (высокотемпературная сверхпроводимость, микроэлектроника, спинтроника, мультиферроики, нанотехнологии), синтез новых метастабильных фаз лёгких элементов с уникальными свойствами, изучение свойств и структуры кристаллов в условиях мантии и ядра Земли. Наряду с лабораторными методиками, будут использованы многообразные синхротронные методы для анализа функциональных свойств сильно сжатых материалов.

Предлагаемые исследования обеспечат развитие теоретической и прикладной базы для создания различных классов материалов, имеющих потенциальное применение в новой микроэлектронике, энергетике, обработке материалов и других отраслях индустрии. Часть этих исследований тесно связана с новой бурно развивающейся областью физики магнитных материалов – спинтроникой. Выяснение свойств и взаимодействий между магнитной и электронной подсистемами при изменении межатомных расстояний обеспечит теоретический и прикладной базис для оптимизации свойств и параметров материалов для создания спинтронных устройств. Изучение параметров синтеза и свойства новых материалов на основе лёгких элементов в экстремальных условиях является одной из приоритетных мировых проблем.

Решение этих задач должно обеспечить возможность создания принципиально новых продуктов, прорывных технологий и услуг, и содействовать прогрессу в решении научных задач, поставленных в ходе реализации Федеральных целевых программ.

Ниже приведена цель данной работы.

 Синтез при высоких давлениях методом лазерного нагрева в алмазных наковальнях полигидридов железа FeHx и исследование их свойств при высоких давлениях: статья 3 Приложения А.

 Исследование электронных и магнитных свойств чистого железа при высоких давлениях (вплоть до 241 ГПа) и низких температурах 4-300К: статья 4 Приложения А.

 Исследование уравнения состояния и фазового перехода в монооксиде никеля NiO при высоких давления (вплоть до 240 ГПа): статья 5 Приложения А.

 Исследование электрического транспорта, колебательных и структурных свойства эффективного термоэлектрического материала Cu₃Sb_{0.98}Al_{0.02}Se₄ под давлением: статья 6 Приложения А.

4.1. Синтез и магнитные свойства фаз полигидридов железа при высоких давлениях мегабарного диапазона

В условиях высоких давлениях до 157 ГПа (1 570 000 атмосфер) и высоких температур до 2000 К впервые синтезированы семь различных соединений железа с водородом FeHx с совершенно разными электронными и магнитными свойствами. Синтез проводился в системе Fe - боразан (NH₃BH₃) в камерах с алмазными наковальнями при лазерном нагреве образца. Обнаружено, что одно из этих соединений FeH₂ имеет тетрагональную кристаллическую структуру І4/тт и при давлении 82 ГПа является магнетиком до температуры около 174 К (рисунок 4.1 a,b,c слева). Также удивительным результатом является обнаружение одной из фаз FeHx, неизвестного пока состава, которая при давлении 128 ГПа остается магнитноупорядоченной в интервале температур от 4 до 300 К, а экстраполированное значение температуры Нееля может достигать ~ 2100 К ! (рисунок 4.1 b справа). Существование магнитных фаз соединений железа при таком рекордно высоком давлении является уникальным и не наблюдалось до настоящего времени. Следует отметить, что такие высокие давления характерны для области, находящейся на границе между нижней мантией и внешним ядром Земли, в составе которой преобладает железо. Поэтому полученные экспериментальные данные о магнитном состоянии и электронных свойствах фаз полигидридов железа очень важны как с фундаментальной точки зрения физики металлов и их магнетизма, а также с точки зрения физики Земли и земного магнетизма: статья 3 Приложения А.



Рисунок 4.1 – Фотография образца в камере высокого давления (**a** слева). Распределение фазы FeH₂ по образцу (**b** слева), а также дифрактограмма фазы *I*4/*mmm* – FeH₂ и её кристаллическая структура (**c** слева).

(а справа) – Температурная зависимость магнитного сверхтонкого поля *B*_{hf} на ядрах Fe-57 в тетрагональной фазе *I4/mmm*. FeH₂ при давлении 82 ГПа, температура Нееля ~ 174 К. (b справа) – Температурная зависимость магнитного сверхтонкого поля *B*_{hf} на ядрах Fe-57 в фазе FeH_x (I) при давлении 128 ГПа. Экстраполированное значение температуры Нееля ~ 2100 К

4.2. Электронные и магнитные свойства фазы железа ε-Fe при высоких давлениях до 241 ГПа в области температур 4-300 К

Магнитное и электронные состояния железа в гексагональной плотноупакованной (ГПУ) ε -Fe фазе исследованы методом синхротронной мессбауэровской спектроскопии на ядрах Fe-57 (методика NFS – nuclear forward scattering или ядерное рассеяние вперёд). Измерения выполнены при высоких давлениях $P \approx 55 - 241$ ГПа в диапазоне температур T от 4 до 300 K, а также во внешних магнитных полях до 5 Тесла. Установлено, что во всей P-T области атомы Fe находятся в немагнитном состоянии. Предполагаемая теорией магнитная неустойчивость и квантовые спиновые флуктуации, которые могут быть стабилизированы магнитным возмущением (например, внешним магнитным полем) не подтверждается нашими измерениями NFS спектров во внешнем магнитном поле. Установлено, что зависимость изомерного сдвига от давления IS(P) носит нелинейный характер (рисунок 4.2a), и при максимальном давлении 241 ГПа значение IS достигает колоссальной величины \approx - 0,8 мм/с, указывая на очень высокую электронную плотность на ядре. Резкое изменение электронной плотности на ядре железа при температурах 100-200 K (рисунок 4.2b) указывает на фазовый переход с изменением электронной структуры,

что может быть связано с резким увеличением проводимости или даже с возникновением сверхпроводимости (рисунок 4.2с): статья 4 Приложения А.



Рисунок 4.2 – (**a**) – Зависимость изомерного сдвига в железе от давления для различных температур. Сплошные линии – аппроксимация полиномом. (**b**) – Температурные зависимости изомерного сдвига для разных давлений (из аппроксимаций на рисунке (**a**)). Значения изомерных сдвигов даны относительно α-Fe, находящегося при комнатной температуре и атмосферном давлении. (**c**) – Фазовая Р-Т диаграмма железа: треугольными символами отмечены Р-Т точки, в которых измерялись NFS спектры в нашем эксперименте. Во всех измеренных точках железо находится в немагнитном состоянии

4.3. Структурный переход первого рода в NiO при высоких давлениях

Значение перехода изолятор-металл в сильно сжатом монооксиде никеля (NiO) для физики сильно коррелированных электронных систем стоит в одном ряду с проблемами высокотемпературной сверхпроводимости в купратах и другими ключевыми проблемами физики, такими, например, как проблема металлизации водорода под давлением. NiO исторически был первым материалом, который оказался испытательным полигоном для понимания сильно коррелированных электронных систем. В пионерских исследованиях Мотта и его сотрудников NiO рассматривался как классический пример «моттовского» изолятора с широкой энергетической щелью d-d (Eg), которая возникает из-за сильного локального кулоновского отталкивания электронов между 3d-электронами Ni. В данной работе мы обнаружили изоструктурный переходе в NiO, сопровождающий наблюдаемый нами ранее переход в металлическое состояние. Мы также подробно обсуждаем последние теоретические результаты и показываем, что наши данные подтверждают некоторые последние теоретические модели. Представлены результаты структурных исследований NiO в максимально широком на сегодняшний день диапазоне давлений (0-240 ГПа). Начиная с ~110 ГПа мы наблюдаем значительное тригональное искажение исходной кристаллической структуры типа NaCl. При более высоких давлениях экспериментально обнаружен структурный переход с падением объема ~2,7 % в области перехода изолятор-металл. Переход имеет большой гистерезис при разгрузке (рисунок 4.3): статья 5 Приложения А.



Рисунок 4.3 – (левая панель) – Экспериментальная зависимость давление–объём NiO при комнатной температуре. ((а) правая панель) – Эволюция синхротронных рентгеновских дифрактограмм при сканировании вдоль образца при давлении 208 ГПа. ((b) правая панель) – Эволюция рентгеновских дифрактограмм при сканировании вдоль образца при давлении 208 ГПа. (ср. правая панель) – Эволюция рентгеновских дифрактограмм при сканировании вдоль образца при давлении 208 гПа. (ср. правая панель) – Эволюция рентгеновских дифрактограмм при сканировании вдоль образца при давлении 133 гПа. Сосуществование двух фаз (высокого и низкого давления) при одном давлении указывает на переход первого рода с большим гистерезисом ((с) правая панель)

4.4. Сверхпроводимость в эффективном термоэлектрическом материале Cu3Sb0.98Al0.02Se4

Термоэлектрические материалы обладают богатым набором физических свойств важным как для фундаментальных исследований, так и для прикладных применений. В данной работе был исследован электрический транспорт, колебательные и структурные свойства эффективного термоэлектрического материала Cu₃Sb_{0.98}Al_{0.02}Se₄ под давлением до 40.1 ГПа. При критическом давлении 8.5 ГПа возникает сверхпроводящая фаза, которая сохраняется в исследованном диапазоне давлений. Обнаружен сверхпроводящий купол на фазовой диаграмме температура-давление Cu₃Sb_{0.98}Al_{0.02}Se₄. Между тем, структурный переход под давлением из начальной фазы в неупорядоченную объемно-центрированную кубическую структуру в Cu₃Sb_{0.98}Al_{0.02}Se₄ был подтвержден измерениями дифракции рентгеновских лучей и комбинационного рассеяния света. Интересно, что возникновение

сверхпроводимости совпадает структурным переходом, co сопровождающимся объема. Сверхпроводящая фаза наблюдалась уменьшением при окончательном образовании сплава Cu – Sb – Al – Se и была определена как Im-3m. Основываясь на измерениях коэффициента Холла, мы оценили концентрацию носителей Cu₃Sb_{0.98}Al_{0.02}Se₄, которая показывает резкое их увеличение в сверхпроводящем состоянии. Эти результаты предполагают, что новый сверхпроводник реализуется посредством механизма переноса заряда и возникает в результате структурного фазового перехода первого рода (рисунок 4.4): статья 6 Приложения А.



Рисунок 4.4 – Температурная зависимость сопротивления Cu₃Sb_{0.98}Al_{0.02}Se₄ при различных давлениях. (а) – Зависимость электрического сопротивления Cu₃Sb_{0.98}Al_{0.02}Se₄ от температуры под давлением до 24,5 ГПа в режиме сжатия. Для 3,6 ГПа приведено в масштабе R/110. (b) – Электрическое сопротивление Cu₃Sb_{0.98}Al_{0.02}Se₄ при 18,5 ГПа в интервале температур 1,8–300 К. На вставке показаны увеличенные изображения графика вблизи сверхпроводящего перехода и критерий определения Тс. (c) – Температурная зависимость сопротивления вблизи сверхпроводящего перехода и критерий определения Tc. (d) – Температурная зависимость сопротивления при различных давлениях в процессе декомпрессии. На вставке показано зависящее от температуры сопротивление сжатого образца при давлении 16,1 ГПа с различными магнитными полями. Фазовая диаграмма Cu₃Sb_{0.98}Al_{0.02}Se₄ под давлением. (е) – Барические зависимости Тс при сжатии (сплошные кружки и квадраты) и декомпрессии (светлые кружки). Переходы из одной структуры в другую в Cu₃Sb_{0.98}Al_{0.02}Se₄ при сжатии и разгрузке приведены в верхней части рисунка.

(f) – Зависимость от давления коэффициента Холла (оливковые шестиугольники) и концентрации носителей заряда (фиолетовые шары), измеренные при 10 К во втором цикле сжатия. Стрелки указывают соответствующие оси

4.5. Определение теплофизических свойств перспективных материалов

Теплоемкость твердых тел при высоких температурах отклоняется от закона Дюлонга-Пти и значительно превышает величину 3R. Экспериментальный факт увеличения теплоемкости при высоких температурах обычно объясняют ангармоническими эффектами. Однако в наших работах было предложено другое объяснение экстремально высокой теплоемкости вблизи температуры плавления за счет накопления дефектов кристаллической структуры с малой энергией образования. Избыточная теплоемкость Ge достигает почти 0,5R вблизи температуры плавления. Методами DFT с помощью программы QuantumESPRESSO было показано, что именно дефекты кристаллической структуры, а не ангармонизм фононных колебаний (как считалось ранее), дают основной вклад в высокотемпературную избыточную теплоемкость. Ангармонизм колебаний в Ge, был хорошо изучен методом неупругого рассеяния нейтронов ещё в начале 70-х годов прошлого века, высокотемпературная теплоемкость была исследована в 60-е. Это дает обширный экспериментальный материал для исследования вклада ангармонизма в высокотемпературную теплоемкость. Оказалось, что учет ангармонических поправок не позволяет полностью описать экспериментальные данные.

Нами был предложен альтернативный подход описания высокотемпературной теплоемкости с помощью накопления протяженных дефектов. В германии два типа планарных дефектов (ориентированных вдоль (111) и (100) направлений) обладают достаточно низкой энергией образования в пересчете на атом дефекта (примерно 1950 К/атом), что приводит к значительному вкладу в теплоемкость кристаллического Ge. Было показано, что кристаллический образец германия при высоких температурах разбивается на домены, в которых протяженные дефекты образуются вдоль одного определенного направления ((100) или (111)). Этим трехмерный кристалл германия отличается от двумерного графита, в котором протяженные дефекты в соседних графеновых плоскостях могут занимать случайные положения, тем самым приводя к максимальному теоретически возможному значения конфигурационного множителя (рисунок 4.5).



Рисунок 4.5 – Высокотемпературная теплоемкость германия. Символы обозначают различные экспериментальные данные, фиолетовые кривые – наши теоретические предсказания с учетом вклада планарных дефектов

1) С помощью рентгеновских дифрактометров ЛНИ были проведены структурные исследования различных образцов термостойкой керамики, синтезированной в ГНЦ РФ АО «ГНИИХТЭОС», перспективной для получения термостойких покрытий. Данный материал – керамика на основе корунда, полученная с использованием Y,Hf-алюмоксановых связующих, содержит несколько кристаллических фаз (количественный рентгенофазовый анализ прилагается (рисунок 4.6)): корунд, кубический и моноклинный оксиды гафния.



AlYHf ceramics 1500 grad Chi2: 1.9078

Рисунок 4.6 – Полнопрофильный анализ дифрактограммы Al
YHf керамики. $\lambda{=}1.5406{\rm \AA}$

2) Полуметаллические соединения представляют большой интерес для спинэлектроники и обладают разнообразными электрическими и магнитными свойствами. Нами проводились исследования магнитной структуры шпинели Cu_{0.5}In_{0.5}Cr₂ S ₄ методом порошковой дифракции нейтронов на установке ДИСК реактора ИР-8 (Курчатовский научный центр).

При температуре 12 К было обнаружено магнитное упорядочение с образованием коллинеарного антиферромагнетика, с вектором магнитного упорядочения k=(1,0,0) и величиной магнитных моментов на атомах Cr M=1.79 µB (рисунки 4.7, 4.8).



Рисунок 4.7 – Полнопрофильный анализ нейтронной дифрактограммы шпинели $Cu_{0.5}In_{0.5}Cr_2S_4$, полученной при 12К, λ =1.67Å



Рисунок 4.8 – Магнитная структура шпинели Cu_{0.5}In _{0.5}Cr₂S₄ при 12К.Указаны только магнитные атомы Cr

4.6. Исследование структуры жаропрочных сплавов методом МУРН

Продолжаются ранее начатые работы по исследованию малоуглового рассеяния на немагнитных сплавах, которые могут быть использованы для изготовления нейтронографических устройств, в частности камер высокого давления для исследований методом МУРН в магнитных полях. Поиск оптимального сплава для этих целей обусловлен как прочностными характеристиками, так и минимальным сечением рассеяния.

На установке «Горизонт» получены спектры МУРН образцов немагнитных жаропрочных сплавов на основе Ті: Ті — основной, Al — 6-7%, Mo – 2,8 — 3,8%, 38ХНВЮ (Ni — основной, Cr — 36-39%, W—5,5-6,5%, Al — 3,0-3,8%), а также для сравнения сплава 40ХНЮ (Ni — основной, 38-41% Cr, 3,3-3,8% Al) — см. рисунок 4.9. Для измерений применялась щелевая геометрия, две щели 0,5 мм на расстоянии 5,4 м. Для сбора спектров использовался двухкоординатный детектор (многопроволочная камера, заполненная гелием-3) производства ЛНФ ОИЯИ.



Рисунок 4.9 – Результаты малоуглового рассеяния нейтронов в сплаве NiCrAlW-all (черные точки), в сплаве NiCrAl (красные точки), в Ti (зеленые точки)

Из сравнения данных спектров следует, что наименьшим сечением рассеяния нейтронов в диапазоне 0,02-1,1 А⁻¹ обладает сплав на основе Ті, его сечение рассеяния на порядок меньше, чем 40ХНЮ.

5. Моделирование процессов, инициированных пучком протонов линейного ускорителя в установках Нейтронного комплекса ИЯИ РАН,

с целью улучшения и оптимизации параметров установок

5.1. Выбор методики, позволяющей решить обратную задачу восстановления спектра нейтронов

В нашем случае обратная задача является некорректно поставленной, т.к. не выполняется требование устойчивости решения. Общий математический подход к решению подобных задач был разработан академиком Тихоновым А.Н. и называется методом регуляризации [22]. Конкретный способ, используемый в данной работе, называется – метод итераций для нахождения приближённых решений.

Использовался программный комплекс, позволяющий путём некоторого количества приближающих итераций добиться получения энергетических спектров с лучшим разрешением, чем аппаратурные спектры см. рисунок 5.1. На нём приводятся спектры радиационного захвата нейтронов ядрами сурьмы (естественная смесь изотопов). Исходный спектр и восстановленный спектр. Как видно из графика, три неразрешённых резонанса после применения процедуры восстановления разделились. Энергетическое разрешение исходного спектра 35%, а восстановленного – 21%.



Рисунок 5.1 – Спектр 0-итерации (исходный спектр) и восстановленный методом итераций (Sb)

Проведено сравнение восстановленного спектра радиационного захвата нейтронов ядрами сурьмы с соответствующим спектром из базы данных JENDL [23], см. рисунок 5.2.



Рисунок 5.2 – Сравнение восстановленного спектра сурьмы и спектра из базы данных JENDL

Предложенный метод позволил выполнить методическую работу по определению составных частей экспериментального фона установки CB3-100 при использовании гамма-счётчика (см. рисунок 5.3). Из графика видно, какие конструкционные элементы вносили свой вклад в суммарный гамма-фон.



Рисунок 5.3 – Состав экспериментального фона установки CB3-100 при использовании гамма-счётчика в заданном энергетическом интервале

Функция отклика спектрометра (СВЗ-100), которая используется в программном комплексе имеет графическое представление (см. рисунок 5.4).



Рисунок 5.4 – Трёхмерное изображение функция отклика спектрометра CB3-100 (в условных единицах)

Исследование функции отклика CB3-100, учитывающее утечку нейтронов проводилось в работе [24].

В данной работе плотность нейтронного потока учитывалась с использованием данных полученных на детекторе с ${}_{3}{}^{7}$ Li, расположенным в измерительном канале.

5.2. Совершенствование приборной базы нейтронного комплекса с целью повышения информативности по контролируемым параметрам и безопасности за счет установки современных приборов контроля и наблюдения

На первом радиоактивном контуре нейтронного источника были установлены современные системы контроля параметров и безопасности:

- ультразвуковые и электромагнитные расходомеры,
- датчики температуры и давления,

 дозиметрический комплекс по нейтронному и гамма-излучениям и доступу персонала,

– система видеонаблюдения,

начаты работы по установке тепловизионного контроля.

Все приборы взаимно дублируют друг друга, что повышает надежность получаемой информации, которая в свою очередь выводится на пульт управления комплексом.

На установке РАДЭКС проводились пробные работы по облучению образцов и получения изотопов для медицинских целей.

5.3. Восстановление работоспособности СВЗ-100, в том числе пробный сеанс в декабре 2022 г.

После длительного простоя состоялась проводка пучка на CB3-100, подготовлены современные методики измерения параметров спектрометра по времени замедления в свинце и решаемых в пробном сеансе задач.

5.4. Работы в области разработки и создания перспективных компактных нейтронных источников

Предложена и обоснована возможная схема импульсного источника нейтронов на основе пучка протонов с энергией ~ 13 МэВ, с учетом высоких тепловых нагрузок и перспективных задач.

Определены расчетные тепловые и нейтронные параметры источника с использованием современных программ,

На основе экспериментальных и расчетных данных, сделана оценка времени жизни нейтронно-производящей бериллиевой мишени в потоках протонов высокой плотности, где основным ограничивающим фактором является накопление водорода в мишени после остановки протонов в мишени (блистеринг). Предложены меры его снижению и увеличению среднего времени жизни такой мишени. Результаты работы докладывались и обсуждались со специалистами [25, 26].

5.5. Радиационное материаловедение

Работа направлена на теоретическое определение максимально возможной концентрации вакансионных пор в металлах в зависимости от температуры радиационного облучения. В работе использовалась методика, ранее разработанная в [27], в рамках которой были дополнительно учтены эффекты, связанные с наличием небольшой доли одномерно движущихся междоузельных атомов. Как показано в [28], присутствие даже незначительного количества одномерно движущихся междоузельных атомов способно оказать существенное влияние на эволюцию ансамбля пор именно при относительно высоких концентрациях последних. В настоящем исследовании учитывались как средние величины потоков одномерно движущихся междоузельных атомов, так и их стохастические флуктуации. Частично результаты работы были представлены в докладе на международной конференции [29]. Готовится также отдельная статья для журнальной публикации.

6. Развитие новых методов исследований на нейтронных источниках

6.1. Определение временного распределения фона между импульсами ускорителя ММФ на нейтронном канале РАДЭКС

Измерения проводились на импульсном пучке нейтронов установки РАДЭКС ИЯИ РАН. Использованный канал ловушки импульсного пучка протонов линейного ускорителя ионов водорода (длительность 1 – 200 мкс, частота 1 – 100 Гц, средний ток 1 – 100 мкА) позволяет получать каскадные и испарительные нейтроны с энергией 1 – 300 МэВ.

На рисунке 6.1.*а* показан расчетный спектр каскадных нейтронов на экспериментальной мишени (10 м от W мишени) при среднем токе пучка протонов линейного ускорителя 50 мкА и различной энергии протонов (см. работу [30]).



Рисунок 6.1 – (*a*) – Плотность потока каскадных нейтронов на расстоянии 10 м от W мишени РАДЭКС при среднем токе пучка протонов линейного ускорителя 50 мкА для различной энергии протонов: *1* – поток нейтронов при энергии протонов 45 МэВ; *2* – поток нейтронов при энергии протонов 160 МэВ; *3* – поток нейтронов при энергии протонов 300 МэВ. (*б*) – Интенсивность рассеянных 1 метром трубы нейтроновода для нейтронов с энергией ≥10 МэВ в зависимости от расстояния до W мишени

Выбирая первоначальную энергию пучка протонов, можно определить оптимальные экспериментальные условия для исследования реакции ${}^{13}C(n, 2p){}^{12}Be^*$ при различной энергии каскадных нейтронов. Максимальный фон рассеянных нейтронов по расчетам проявляется на расстоянии от 10 до 15 м от мишени нейтронного источника (см. рисунок 6.1*б*). Поэтому детектирующую систему для регистрации частиц от исследуемой реакции ${}^{13}C(n, 2p){}^{12}Be^*$ желательно устанавливать на расстоянии от W мишени меньше 10 м либо больше 20 м.

Расчетные распределения нейтронных потоков из W мишени (7 см) в экспериментальный канал импульсного источника для пучка протонов с энергией 300 МэВ и интенсивностью 100 мкА составляют для каскадных нейтронов в направлении вперед – 5,3·10¹³ с⁻¹·стер⁻¹, которые затем распределяются по такой схеме: (10 –

100) МэВ = $3,1 \cdot 10^{13}$; (100 – 200) МэВ = 10^{13} ; (0,2 – 10) МэВ = $3 \cdot 10^{13}$; (1 – 200) кэВ = 10^{13} ; $E_n < 1$ кэВ = 10^{10} . Интегральное число рассеянных каскадных нейтронов вперед и вбок равно 0,1 и 0,6 от числа падающих на нейтроновод в определенном месте.

Эти потоки являются основными источниками импульсного фона в экспериментальной зоне (см. работу [30]). Кроме того, источниками фона служат гамма-кванты от процессов захвата и рассеяния нейтронов на оборудовании пролетных каналов.

Временные распределения для нейтронов импульсного источника (пролет 10 м): каскадные (>15 МэВ) < 0,2 мкс; время пролёта максимума интенсивности (≈500 кэВ) испарительных нейтронов (промежуточных, быстрых с энергией от 1 кэВ до 14,5 МэВ) < 2 мкс. То есть эти распределения, в основном, меньше длительности пучка, что исключает прямой фоновый вклад от этих процессов в исследуемый временной интервал.

Медленные нейтроны активируют экспериментальное оборудование за счёт фотозахватной реакции: от 1 мс для резонансных нейтронов до ~5 мс для тепловых.

При облучении алюминесодержащего оборудования возможно образование активационного фона в реакциях ²⁷Al(*n*, *p*)²⁷Mg (9.5 мин) с порогом 1,8 МэВ и сечением 4 – 74 мб и ²⁷Al(*n*, 2*n*)^{26m}Al (6,4 с) с порогом 13 МэВ и сечением 7 мб. Кроме того возможно образование короткоживущих изотопов, которые могут давать вклад фона в 20 мс промежуток между импульсами пучка: ²⁷Al(*n*, α)^{24m}Na (20 мс) и ²⁷Al(*n*, 5*n*)²³Al (0,47 с). При облучении стальных стенок нейтроновода каскадные нейтроны активируют ядра железа (⁵⁴Fe) и могут создавать короткоживущий фоновый радионуклид ⁵¹Fe (0,25 с).

Каскадные и быстрые нейтроны могут вызывать активацию воздуха вокруг детекторов. Активация изотопов азота ¹⁴N (99,6%), ¹⁵N (0,4%) в реакциях ¹⁴N(*n*, 2*p*)¹³B (19 мс), ¹⁵N(*n*, α)¹²B (20 мс) с порогом 7 МэВ (18 мб) создаёт короткоживущие βраспадные радионуклиды. В результате реакций на углероде ¹²C(*n*, *p*)¹²B (20 мс) с порогом 14 МэВ (0,2 мб) и ¹³C(*n*, *p*)¹³B (19 мс) с порогом 13 МэВ образуются короткоживущие радионуклиды. В реакции на изотопах кислорода ¹⁶O(*n*, *p*)¹⁶N (7,1 с) с порогом 3 МэВ (41 мб) и ¹⁸O(*n*, *p*)¹⁸N (0,6 с) образуются быстрораспадающиеся радионуклиды.

Параметры пучка ускорителя в этом сеансе составляли: длительность ≈0,3 мкс, частота следования 50 Гц при импульсном токе ускорителя 8 мА и энергии протонов 267 МэВ. Время работы ускорителя с другими параметрами пучка (1 Гц, 25 Гц и большей длительности пучка) было незначительным, поэтому приводятся только данные для временного интервала между импульсами ускорителя 20 мс.

В эксперименте использовались три детектора на сцинтилляционных кристаллах (см. рисунок 6.2), установленные на расстоянии 10 м от W ловушки. Детекторы Д₁ и Д₂ в

пределах коллимированного размера пучка (\emptyset 5 см), $Д_3$ – на расстоянии 25 см от оси пучка. Детекторы $Д_2$ и $Д_3$ изготовлены на основе кристаллов BGO размерами \emptyset 5.5 см, $Д_1$ – на жидком сцинтилляторе EJ301 \emptyset 5.5 см. $Д_2$ и $Д_3$ эффективно регистрировали гаммакванты. Сигналы детектора $Д_1$ обрабатывались по методу PSD – разделения по форме импульса для выделения нейтронных событий.



Рисунок 6.2 – Экспериментальная установка: *1* – коллиматор, Д_{2,3} – два сцинтилляционных детектора на основе BGO, Д₁ – нейтронный детектор на основе EJ301

Амплитуды и времена прихода сигналов синхроимпульса ускорителя и детекторов оцифровывались на сигнальных процессорах САЕN DT5720 (шаг оцифровки 4 нс) в режиме реального времени, циклы записи по ≈30 минут. Для оценки вкладов нейтронов и гамма-квантов во временные спектры в выделенных интервалах производилась запись форм сигналов на процессоре CAEN DT5742 (шаг 0,2 нс).

На рисунке 6.3*а* показан случай регистрации сигналов детектором $Д_1$ при некоторой промежуточной настройке пучка ускорителя за первые 500 мкс. Отметка времени 0 – это положение синхроимпульса. Через 200 мкс возникает пучок ускорителя (0,3 – 0,5 мкс). В большинстве измерений из-за настроек пучка присутствует 20 – 30 мкс дополнительного сброса перед и после основного. Провалы после импульсного пучка обусловлены перегрузкой сцинтилляционных детекторов. В виду большой интенсивности, малого времени сброса, наличия пьедестала, нормироваться на площадь пика сброса затруднительно, поэтому для сравнений показаний детекторов для различных настроек использовались значения измеряемого тока протонов.



Рисунок 6.3 – (*a*) – Временное распределение регистрируемых сигналов центральным детектором $Д_1$ с настройками пучка в начале сеанса, ось *z* – количество событий, ось *y* – амплитуда сигнала, ось *x* – время от синхроимпульса ускорителя (первые 500 мкс). (*б*) – Временное распределение амплитуд, регистрируемых сигналов $Д_1$, для такого пучка

На рисунке 6.36 показана зависимость амплитуд регистрируемых сигналов для этого распределения. Как и следовало ожидать, большие амплитуды (энергии частиц) сопровождают сброс нейтронного пучка. И затем следующая область увеличения амплитуд соответствует области захвата медленных нейтронов (≈5 мс) с генерацией гамма-квантов 3 – 5 МэВ. Из-за сильного разброса регистрируемых амплитуд сигналов PSD анализ на этом детекторе был затруднен.

На рисунке 6.4 приводится временное распределение сигналов центрального детектора Д₂ (BGO) для настроек пучка без пьедесталов.



N, отсч.



Условно можно выделить в спектре следующие области: 1 – непосредственно импульсный пучок $\approx 0,5$ мкс. На 2-м участке (область до 4 мс) временной спектр обусловлен вкладом нейтронов и гамма квантов от рассеяния каскадных и испарительных нейтронов на всем нейтроноводе (11 м от источника), соотношение счетности нейтронов и гамма-квантов примерно 1 к 3. Счет Д₂ и Д₃ отличается как 12/1. Видимый набор резонансных пиков на этом участке сохраняется при любых параметрах пучка; 3-й участок – широкий пик 100 – 5 мэВ с максимумом в 25 мэВ.

Таким образом, значительный вклад в важный для измерений периодов распада участок времени 0,4 – 20 мс вносят тепловые нейтроны. Вклад в спектры таких участков для детекторов Д₂ и Д₃ примерно одинаков – поэтому это скорее всего захват нейтронов на стенках нейтроновода.

По 4-му участку можно оценить величину фонового счета для экспериментов с более длительными циклами. Например, на участке в 100 мкс перед новым синхроимпульсом при среднем импульсном токе, фон в пересчете на среднее время составляет 100 имп.·с⁻¹ для $Д_2$ и 90 имп.·с⁻¹ для $Д_3$ и почти не меняется при изменении тока пучка в 3 раза. Т.е. возможно это отражение постоянного установившегося фона во время работы ускорителя. Перед включением ускорителя и после сеанса были измерены скорости счета для всех детекторов. Для $Д_2$ и $Д_3$ соответственно по 10 имп.·с⁻¹ – до сеанса и 60 ($Д_3$) – 70 ($Д_2$) сразу после выключения пучка.

На 4-м участке видны слабые пики при 10 мс, 17 мс, которые могут быть обусловлены обратным рассеянием быстрых и медленных нейтронов конструкцией нейтроновода, стенками защиты на 10 и 20 м, а также потоками из ловушки пучка нейтронов на 50 м.

Можно считать, что подавляющий вклад в интересующую нас временную область дает захват тепловых нейтронов на железе нейтроновода. Предположительно можно снизить этот вклад установкой графитового коллиматора.

Отработку регистрации сигналов от β -распадов предполагается проводить по следующей схеме: для исследования процесса образования ¹²Be в основном или низковозбужденном состояниях в ¹³C(*n*, 2*p*)¹²Be, как тестовую можно использовать близкую по кинематике реакцию на воздухе ¹⁴N(*n*, 2*p*)¹³B. В обеих реакциях образуются β -нестабильные изотопы бериллия и бора с близкими периодами полураспада около 20 мс. При импульсном потоке каскадных нейтронов 300 нейтронов·см⁻² за 1 импульс 0,3 мкс на пороге реакций (~40 МэВ) с сечением 1 мб в воздушной камере 1 литр может образоваться 0,01 ¹³B. Образоваться и зарегистрироваться в интервале 5 – 20 мс 0,005 β -

частиц. Скорость счета может быть до 0,25 с⁻¹ или 15 имп.-мин⁻¹. Предполагается регистрация с помощью радиометра МКС 01Р при введении управления путем блокировки времени измерения в интервале 0 – 5 мс через антисовпадение с синхроимпульсом ускорителя и регистрацией 2*p*. Аналогично при использовании 1 литровой камер с CO₂ в реакции перезарядки ¹²C(*n*, *p*)¹²B с сечением 0,2 бн (14,5 МэВ) за 1 импульс может образоваться один атом ¹³B с периодом полураспада $T_{1|2}$ =20 мс. При регистрации β-частиц можно получить скорость счета до 25 с⁻¹.

6.2. Оптимизация параметров выходного нейтронного канала W-Be фотонейтронного источника и совершенствование методов времяпролетной и позиционно-чувствительной регистрации нейтронов низких энергий

Измерения были выполнены на фотонейтронном источнике ИЯИ РАН на базе ускорителя электронов ЛУЭ-8. Пучок электронов генерирует тормозное излучение в вольфрамовой мишени. Поток нейтронов создается в ⁹Ве-мишени, которая установлена в центре замедлителя из полиэтилена в виде куба с линейным размером 1 м. Поток нейтронов выходит из коллиматора диаметром 3 см и длиной ~ 50 см и падает на позиционно-чувствительный детектор нейтронов (ПЧДН), состоящий из твердого слоя ¹⁰В и проволочной камеры. Для контроля общего потока нейтронов использовался стандартный счетчик на основе ³Не, который располагался непосредственно за ПЧДН. Детектор ПЧДН рассеивает и поглощает только малую долю нейтронов.

На рисунке 6.5 показано экспериментальное распределение нейтронов вдоль горизонтальной оси, измеренное ¹⁰В-детектором в отсутствии кадмиевого фильтра. Он располагался на расстоянии 204 см от центра мишени.



Рисунок 6.5 – Распределение тепловых и промежуточных нейтронов, измеренное на расстоянии 204 см от центра мишени из ⁹Ве позиционно-чувствительным детектором на основе ¹⁰В. Кривая – аппроксимация двумя гауссианами

На рисунке 6.6 показано экспериментальное распределение нейтронов, измеренное с помощью ПЧДН с кадмиевым фильтром перед ним. Его граничная энергия составляет около 0,55 эВ, то есть он задерживает тепловые нейтроны.



Рисунок 6.6 – Распределение промежуточных нейтронов с $E_n > 0,55$ эВ, измеренное на расстоянии 204 см от центра мишени из ⁹Ве позиционно-чувствительным детектором на основе ¹⁰В. Кривая – аппроксимация гауссианом

На рисунке 6.7 показано измеренное с помощью ПЧДН экспериментальное распределение нейтронов, которое соответствует разности между потоком нейтронов всех энергий и потоком нейтронов только промежуточных энергий. Поэтому это есть распределение только тепловых нейтронов с энергией ниже 0,55 эВ.



Рисунок 6.7 –Распределение тепловых нейтронов с $E_n < 0,55$ эВ, измеренное на расстоянии 204 см от центра мишени из ⁹Ве позиционно-чувствительным детектором на основе ¹⁰В. Кривая – аппроксимация двумя гауссианами

Одновременно с измерением распределения нейтронов с помощью ПЧДН распределение нейтронов измерялось и с помощью перемещаемого механически вдоль горизонтальной плоскости ³Не-счетчика. При установленном кадмиевом фильтре ³Не-счетчик, который располагался позади ПЧДН почти не регистрировал нейтронов. Это связано с тем, что эффективность ³Не-счетчика для промежуточных и быстрых нейтронов очень мала. В эксперименте записывалась осциллограмма сигналов, вместе с которыми записывалось геометрическое положение счетчика. Из осциллограммы принимались в рассмотрение только тепловые нейтроны с энергией менее 0,5 эВ. На рисунке 6.8 показано измеренное с помощью перемещаемого ³Не-счетчика экспериментальное распределение нейтронов. Распределение потока нейтронов, измеренное с помощью ПЧДН и ³Не-счетчика, находилось в согласии друг с другом с учетом различного пространственного разрешения.



Рисунок 6.8 – Распределение тепловых нейтронов с $E_n < 0,55$ эВ, измеренное на расстоянии 204 см от центра мишени из ⁹Ве перемещаемым счетчиком на основе ³Не. Кривая – аппроксимация двумя гауссианми и равномерным фоном

Мы аппроксимировали распределение потока промежуточных нейтронов с энергиями $E_n > 0,55$ эВ гауссианом как это представлено на рисунке 6.6 и получили полную ширину на половине максимума *w*, равную 4 см. Эта величина соответствует размеру коллиматора на расстоянии 204 см. Фон рассеянных промежуточных нейтронов существенно подавлен в измерении детектором ПЧДН. На рисунке 6.7 представлено разностное распределение, которое соответствует потоку тепловых нейтронов. Распределение нейтронов имеет форму в виде двух максимумов, один из которых расположен левее оси коллиматора, а другой правее его с минимумом вдоль оси коллиматора. Аппроксимация правого пика, вершина которого расположена при X = -

1,2 см для этого распределения дала величину ширины на половине максимума 2 см. Аппроксимация левого пика, вершина которого расположена при X = +5,5 см дала величину ширины на половине максимума 4 см. Аналогичный характер имеет и распределение, измеренное с помощью ³Не-счетчика на рисунке 6.8, где также наблюдаются два максимума с двух сторон от оси коллиматора. В таблице 6.1 представлены положения X и Θ пиков гауссианов аппроксимации в распределениях, выраженных в см и угловых градусах, соответственно, а также их ширины *w* на половине максимума, площади *A* под пиками и высота постоянного фона.

E_n	Х, см	Θ, град.	<i>w</i> , см	<i>А</i> , см ²	фон
$E_n > 0,55$ 3B	0	0	4	35	0
¹⁰ В-дет.					
$E_n < 0.55 \ \mathrm{B}^{-10} \mathrm{B}^{-10}$	-1,2	-0,34	2	19	0
дет.	+5,5	+1,54	4	41	
$E_n < 0.55$ $3B$	-1,4	-0,39	4	1800	40
³ Не-счет.	+5	+1,40	6,5	3200	

Таблица 6.1 – Положения пиков гауссианов аппроксимации в распределениях, их ширины на половине максимума, площади под пиками и высота постоянного фона

Можно заметить, что пики на рисунке 6.7 и рисунке 6.8 для тепловых нейтронов соответствуют друг другу по относительной величине и положению.

Мы предположили, что наличие двух максимумов в распределениях для тепловых нейтронов может быть связано с рассеянием нейтронов на внутренних боковых стенках коллиматора. В тоже время, распределение промежуточных нейтронов, которые не испытали взаимодействие с материалами коллиматора, хорошо аппроксимируется симметричным гауссианом, направленным вдоль его оси. Совместные работы с ОИЯИ по развитию нейтронных исследований. Развитие новых методов исследования фундаментальных взаимодействий при низких энергиях нейтронов

6.2.1. Разработка нового метода измерения времени жизни нейтрона с помощью спектрометрии по времени пролета

Измерение времени жизни нейтрона времяпролетным методом требует решения ряда сложных экспериментальных задач.

А) Необходимость сформировать пучок нейтронов, имеющий определенный спектральный состав.

Б) Разработать метод измерения фона запаздывающих нейтронов.

В) Разработка токового метода регистрации времяпролетных спектров.

6.2.2. Создание прототипа установки для измерения времени жизни нейтрона с помощью спектрометрии по времени пролета

Создана первая очередь прототипа установки для измерения времени жизни нейтрона с помощью спектрометрии по времени пролета.

Выполнены вакуумные испытания прототипа.

6.2.3. Исследование временных и фоновых характеристик ГЭК-1 реактора ИБР-2

Выполнены исследования фона запаздывающих нейтронов на 30-ти метровой базе 1-го канала реактора ИБР-2.

Аппроксимирована зависимость размножающей способности реактора во время паузы.

На рисунке 6.9 приведен пример восстановления фона запаздывающих нейтронов.



Рисунок. 6.9 – Черная линия – времяпролетный спектр нейтронов прошедших тантал и 20 см свинца, малиновая линия – времяпролетный спектр нейтронов прошедших самарий (1 см) и 20 см свинца, красная линия – восстановленная фоновая подложка

6.2.4. Разработка токового метода регистрации времяпролетных спектров

В настоящее время мы развиваем интегрально-компенсационный метод измерения времяпролетных спектров на реакторе ИБР-2. Так как реактор ИБР-2 находится на ремонте, проводятся работы по исследованию точности измерения потока нейтронов интегральным и счетным методом от источника нейтронов 10⁶ n/s.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

План работ на 2022 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

1. Задача «Развитие и применение транспортного кода SHIELD как инструмента математического моделирования взаимодействия частиц с веществом, включая развитие моделей ядерных реакций»

План работ на 2022 год выполнен полностью.

Транспортный код SHIELD применялся для оценки искажений регистрации запаздывающих нейтронов от 238U фотоделения сцинтилляционным спектрометром, помещенным в Pb-защиту. Рассмотрены искажения потоков и спектров быстрых нейтронов, образуемых при 238U-фотоделении с помощью сцинтилляционного спектрометра, помещаемого в "глухой" свинцовый "дом" пассивной защиты. Рассмотрены зависимости этих искажений от энергии нейтронов и толщины стенок Pb-"дома", выделены вклады процессов в стенах зала облучений.

Проект DARIA предусматривает создание компактных источников нейтронов на основе новых технологий линейных ускорителей и рассматривается в настоящее время как актуальное направление нейтронной физики. В России ведутся работы по созданию компактных источников нейтронов на основе ускорителей протонов.

В отчетном 2022 году методом Монте-Карло с использованием транспортного кода SHIELD <u>https://www.inr.ru/shield/</u> были рассчитаны потоки нейтронов, испускаемых из мишеней разной геометрии и состава: рассматривался тонкий слой бериллия 1-2 мм, либо трехмерная конструкция, включающая бериллий, медь и полиэтилен. Энергия пучка протонов принята низкой, E_p=13 МэВ. Вычислялись энергетические спектры нейтронов, вылетающих из мишени.

Выполненные работы посвящены развитию моделей образования и распада возбужденной ядерной и гиперъядерной материи. В работах проведено сравнение расчетов с имеющимися экспериментальными данными, представлен прогресс в развитии моделей образования (динамическая стадия) и распада (статистическое описание) возбужденной гиперъядерной и нормальной ядерной материи. Описание процессов испарения, Ферми-развала, деления и мультифрагментации обобщается на гиперъядра. Развиваются методы извлечения энергии связи гиперонов в ядрах.

2. Задача «Исследования по физике деления и нейтрон-ядерных взаимодействий»

План работ на 2022 год выполнен полностью.

Получены значимые научные результаты. Подготовлена версия пакета программ для реконструкции сечений радиационного захвата нейтронов ядром. Разработан и изготовлен (8 каналов) предусилитель для нового сцинтилляционного γ-детектора на базе больших кристаллов NaI. Проведен один сеанс установки ИНЕС с образцами золота ¹⁹⁷Au и тантала ¹⁸¹Ta на импульсном источнике нейтронов РАДЭКС центра коллективного пользования (ЦКП) ИЯИ РАН. Измерена зависимость в спектре нейтронов пучка от энергии. Измеренный спектр нейтронов имеет хорошее согласие со спектром нейтронов, смоделированным по программе MCNP. Измеренная фоновая составляющая в спектре радиационного захвата нейтрона ядром золота Au от энергии хорошо согласуется с независимым измерением радиационного спектра.

3. Задача «Развитие экспериментальной базы импульсного нейтронного источника ИН-06 ИЯИ РАН для исследования конденсированных сред»

План работ на 2022 год выполнен полностью.

Полученные результаты исследований объемного металлического стекла Ni44Nb56 с изотопным замещением с помощью глубоко неупругого рассеяния нейтронов согласуется с картиной, согласно которой беспорядок вызывает симметричное уширение дисперсии фононов кривых, а смягчение фононов ограничено низкоэнергетическими модами, несущими незначительную величину ядерной кинетической энергии [1]. Предполагается развитие исследований на основе глубоко неупругого рассеяния нейтронов на РАДЭКСе.

В экспериментальных исследованиях свойств новых материалов-метеоритов в экстремальных условиях при высоких давлениях показано, что при гидростатическом давлении до 1,8 ГПа обыкновенные хондриты теряют до 51 % своего исходного состояния.

Исследования в области сцинтилляционных детекторов. Предлагаемые результаты позволят оптимизировать параметры детекторов, расширить спектр возможных исследований с использованием сцинтилляционных детекторов, а также развить технологию изготовления сцинтилляционных детекторов нейтронов различного типа.

Проведено моделирование оптических параметров детекторов на основе органического световода и кремниевых фотоумножителей. Планируется исследования параметров детекторов.

Результаты исследования показывают, что 3-слойные детекторы имеют более высокую эффективность по сравнению с 2-слойными, и позволяют их рекомендовать для дооснащения исследовательских установок источника ИН-06 и РАДЭКС ИЯИ РАН.

4. Задача «Исследование структуры перспективных материалов, в том числе при экстремальных нагрузках (высоких давлениях, низких температурах, сильных магнитных полях»

План работ на 2022 год выполнен полностью.

При высоких давлениях методом лазерного нагрева в алмазных наковальнях были синтезированы полигидриды железа FeH_x: впервые синтезированы семь различных соединений железа с водородом FeHx с совершенно разными электронными и магнитными свойствами. Одна из этих фаз - FeH₂ имеет тетрагональную кристаллическую структуру *I4/mmm* и при давлении 82 ГПа является магнетиком до температуры около 174 К. Удивительным результатом является обнаружение фазы FeHx, неизвестного пока состава, которая при давлении 128 ГПа остается магнитноупорядоченной в интервале температур от 4 до 300 К, а экстраполированное значение температуры Нееля может достигать ~ 2100 К ! Это результат очень важен для понимания физики строения Земли: статья 3 Приложения А.

Магнитное и электронные состояния железа в гексагональной плотноупакованной (ГПУ) ε -Fe фазе исследованы методом синхротронной мессбауэровской спектроскопии (NFS) на ядрах Fe-57. Измерения выполнены при высоких давлениях $P \approx 55 - 241$ ГПа в диапазоне температур T от 4 до 300 K, а также во внешних магнитных полях до 5 Тесла. Установлено, что во всей P-T области атомы Fe находятся в немагнитном состоянии: статья 4 Приложения А.

Методом синхротронной рентгеновской дифракции было исследовано уравнение состояния монооксида никеля NiO в максимально широком на сегодняшний день диапазоне давлений (0-240 ГПа). Экспериментально обнаружен структурный переход с падением объема ~2,7 % в области перехода изолятор-металл (~225 ГПа). Переход имеет большой гистерезис при разгрузке: статья 5 Приложения А.

При критическом давлении 8,5 ГПа возникает сверхпроводящая фаза в эффективном термоэлектрическом материале Cu3Sb0.98Al0.02Se4, которая сохраняется в исследованном диапазоне давлений (0 – 40,1 ГПа). На фазовой диаграмме температурадавление обнаружен сверхпроводящий купол: статья 6 Приложения А.

Поучены новые данные по теплофизическим и магнитным свойствам некоторых полупроводников, керамики и полуметаллических соединений.

5. Задача «Моделирование процессов, инициированных пучком протонов линейного ускорителя в установках Нейтронного комплекса ИЯИ РАН, с целью улучшения и оптимизации параметров установок»

План работ на 2022 год выполнен полностью.

Задача разработки методики улучшения энергетического разрешения спектров, полученных на нейтронном спектрометре по времени замедления в свинце, для различных типов взаимодействия нейтронов с ядрами вещества выполнена с использованием функции отклика спектрометра определённой в гауссовом приближении. Метод позволяет исследовать микроколичества веществ с точностью лучшей, чем это было возможно ранее. Возможно определение изотопного состава изучаемого микрообразца. Данный метод можно использовать при исследовании делящихся веществ.

Работы по повышению эффективности работы установок и мишеней нейтронного комплекса на данном этапе выполнены и должны быть продолжены.

В рассмотрении кинетики радиационного повреждения металлов получены новые результаты, готовятся публикации.

6. Задача «Развитие новых методов исследований на нейтронных источниках»

План работ на 2022 год выполнен полностью.

Ha нейтронном канале РАДЭКС ИЯИ РАН предлагается проведение экспериментов по изучению кластерных структур в легких ядрах, в частности α-4n-α и ⁸Ве-4*n* в высоковозбужденном состоянии 12 Ве*. Это предполагает регистрацию заряженных частиц от β -распада ¹²Ве* при его образовании в реакции $n + {}^{13}$ С в промежутках между импульсами каскадных нейтронов. В районе предполагаемой $^{13}C(n, 2p)^{12}Be$ установки мишени для исследования реакции с помощью сцинтилляционных детекторов были измерены гамма и нейтронный фон. Определены основные источники фона, влияющие на измерения при регистрации заряженных частиц от захвата нейтронов, так и при последующей регистрации частиц от распада конечных продуктов реакции. Определены зависимости уровня фона в определенных временных интервалах циклов ускорителя при использовании пучка протонов частотой 50 Гц и длительностью 0,3 мкс. Определены необходимые условия для последующих измерений фоновой бета- активности в интервалах между сбросами.

В работе по оптимизации параметров выходного нейтронного канала W-Be фотонейтронного источника и совершенствовании методов времяпролетной и позиционно-чувствительной регистрации нейтронов низких энергий выполнялись измерения распределения промежуточных и медленных нейтронов из выводного коллимированного канала фотонейтронного источника. Для подавления тепловых нейтронов при измерении промежуточных нейтронов использовался кадмиевый фильтр. Для регистрации использовался позиционно-чувствительный детектор нейтронов на основе тонкого слоя ¹⁰В и пропорциональной камеры. Для контроля распределения потока

нейтронов использовался перемещаемый в процессе измерений стандартный гелиевый счетчик. В эксперименте с помощью позиционно-чувствительного ¹⁰В-детектора и перемещаемого ³Не-счетчика было обнаружено существенное различие в форме распределения двух групп нейтронов с энергией выше и ниже кадмиевой границы. Если распределение промежуточных нейтронов имеет симметричную гауссову форму, то форма распределения медленных нейтронов носит сложный характер. Наблюдаемое небольшое угловое расхождение в направлении потоков промежуточных и тепловых нейтронов относительно оси коллиматора можно использовать для одновременного измерения на двух установках как с тепловыми, так и промежуточными энергиями в одном эксперименте.

В работах по подготовке совместных экспериментов с ОИЯИ, на основе развития новых подходов к нейтронным исследованиям, получены важные промежуточные результаты.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Force constant disorder in the $Ni_{44}Nb_{56}$ bulk metallic glass as observed by deep inelastic neutron scattering augmented by isotopic substitution / M. Krzystyniak [et al.] // Phys. Scr. – 2022. – Vol. 97. – P. 065702. – doi.org/10.1088/1402-4896/ac698a.

Demagnetization of Ordinary Chondrites under Hydrostatic Pressure up to 1.8GPa/ N.
 Bezaeva, [et al.]// Geochem. Int. – 2022. – Vol. 60, N5. – P. 421-429. – doi: 10.1134/S0016702922050032.

3. Kanada-En'yo Y., Ogata K. Microscopic calculation of inelastic proton scattering off 18 O, 10 Be, 12 Be, and 16 C to study neutron excitation in neutron-rich nuclei// Phys. Rev. C. – 2019. – Vol. 100. – P. 064616(1-13).

4. Energy levels of light nuclei A=12/ J.H. Kelley [et al.]// Nucl. Phys. A. – 2017. – Vol. 968. – P. 71-253.

5. Study of four-neutron correlations in cluster decay of ¹²Be highly-excited states on RADEX channel/ A.A. Kasparov [et al.]// NUCLEUS – 2021: Fundamental problems and applications: Proc. LXXI Int. Conf./ Saint-Petersburg (20-25 September, 2021) – St. Petersburg, 2021. – P. 317.

6. Modeling kinematics of the cluster decay of excited states of ¹²Be from RADEX cascade neutrons/ A.A. Kasparov [et al.]// Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. – 2022. – Vol. 86, №. 9. – P. 1099-1101.

7. Possibility of determining microimpurities in materials using an activation measuring complex based on a photoneutron source / A.V. Andreev [et al.]// Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. – 2017. – Vol. 81, №. 6. – P. 748-751.

8. Studying the spatial distribution of a neutron flux using detectors based on helium-3 and boron-10/ I.V. Meshkov [et al.]// Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. – 2020. Vol. 84, №. 4. – P. 382-384.

9. The possibility of reconstructing the low-energy part of the neutron spectrum of a photoneutron source via neutron activation analysis/ A.A. Afonin [et al.]// Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. -2018. - Vol. 82, No. 6. - P. 731-735.

10. Hybrid boron-10 gaseous detector for slow and fast neutron simultaneous detection/
S. Potashev [et al.]// EPJ Web of Conf. – 2020. – Vol. 231. – P. 05010(1-5).

11. Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика. Книга 1: Физика атомного ядра. Ч. II: Ядерные взаимодействия. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – С. 320.

12. Сорокин П.В. В кн.: Труды II сем. "Электромагнитные взаимодействия ядер при малых и средних энергиях". – М.: Наука, 1973. – С. 348.

13. Латышева Л.Н., Соболевский Н.М. LOENT – программа моделирования переноса нейтронов в сложных геометриях методом Монте-Карло // Препринт ИЯИ РАН № 1200/2008. – 2008. – С. 38.

14. Исследование формы сигналов в Не3 счетчике при регистрации нейтронов/
И.А. Васильев [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 2020. – № 2. – С.13 – 20.

15. Djilkibaev R.M., Khlustin D.V. Capture neutron cross sections measurement of rare earth isotopes // Fundamental Interactions & Neutrons, Nuclear Structure, Ultracold Neutrons: Proc. 28th International Seminar on Interactions of Neutrons with Nuclei/ JINR, Dubna, (2021). – URL: http://www.isinn.jinr.ru.

16. Температурная зависимость кинетической энергии в аморфном сплаве Zr40Be60/ Γ. Φ. Сырых [и др.]// Письма в ЖЭТФ. – 2017. – Т. 105, Вып. 9. – С. 559-562.

17. Demagnetization of terrestrial and extraterrestrial rocks under hydrostatic pressure up to 1.2 GPa/ N.S. Bezaeva [et al.]// Physics of the Earth and Planetary Interiors. – 2010. – Vol. 179. – P. 7-20.

18. Nonmagnetic high-pressure cell for magnetic remanence measurements up to 1.5 GPa in a superconducting quantum interference device magnetometer/ R.A. Sadykov [et al.]// Review of Scientific Instruments. – 2008. – Vol. 79 – P. 115102.

19. Material properties of Ni–Cr–Al alloy and design of a 4 GPa class non-magnetic high-pressure cell / Yoshiya Uwatoko [et al.] // J. Phys.: Condens. Matter. – 2002. – Vol. 14. – P. 11291–11296.

20. Новый тип сцинтилляционных детекторов тепловых нейтронов на основе ZnS(Ag)/LiF и лавинных фотодиодов / В.Н. Марин [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2015. – Т. 41, Вып 18. – С. 96-101.

21. RU 177 857 U1, 2018, Бюл. № 8. (RU177857U1 – Кольцевой детектор тепловых нейтронов – Google Patents).

22. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М: Наука, 1979. – 285 с.

23. URL: https://www-nds.iaea.org/exfor/endf.htm – Page generated: 2016/02/20,06:40:22 by E4-Servlet on localhost [fwd:www-nds.iaea.org].

24. Шорин В.С. Компьютерная модель спектрометра нейтронов по времени замедления в свинце// ВАНТ. Сер. ЯДЕРНЫЕ КОНСТАНТЫ. – Вып. 1-2. – 2008. – С.60-86.

25. Импульсные источники нейтронов ИЯИ РАН. Концепция, расчеты, оптимизация, сравнение с экспериментом/ С.Ф. Сидоркин [и др.]// Конференция в Нижнем Новгороде «Проект DARIA»/ г. Ниж. Новгород, (июль 2022).

26. Сидоркин С.Ф. Технические возможности и опыт реализации мишенных сборок в мире. Описание технических проблем, альтернативные варианты теплоотвода // Научный семинар-совещание «Компактные источники нейтронов»/ Балтийский федеральный университет имени И. Канта, (14-16 сентября 2022 г.)

27. Semenov A.A., Woo C.H. Void nucleation at elevated temperatures under cascadedamage irradiation // Phys. Rev. B. – 2002. – Vol. 66. – P. 024118-1 - 0241118-10.

28. Semenov A.A., Koptelov E.A. Absence of random voids in the spatially ordered void ensemble // J. Nucl. Mater. – 2020. – Vol. 537. – P. 152212-1 - 152212-8.

29. Semenov A.A., Koptelov E.A. Fluctuations of 1-D interstitial fluxes under cascade damage irradiation // International Advances in Applied Physics & Materials Science: 12th APMAS 2022 Congress & Exhibition/ Oludeniz, Turkey, (October 13-19, 2022). (in press).

Программа экспериментальных исследований на установке РАДЭКС/ Б.А.
 Бенецкий [и др.] // Препринт ИЯИ РАН №1058. – 2001.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Список публикаций исполнителей отчета за 2022 г.

1. Studying the directional sensitivity of a two-coordinate neutron detector based on a 10 B layer and a wire chamber/ S.I. Potashev [et al.]// Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. – 2022. – Vol. 86, No. 8. – P. 898-900.

2. Исследование направленной чувствительности двухкоординатного детектора нейтронов на основе слоя ¹⁰В и проволочной камеры/ С.И. Поташев [и др.]// Изв. РАН. Сер. физ. – 2022. – Т. 86, №. 8. – С. 1087-1090.

 Синтез и магнитные свойства фаз полигидридов железа при высоких давлениях мегабарного диапазона / А. Г. Гаврилюк [и др.] // Письма в ЖЭТФ. – 2022. – Т. 116, № 11. – С. 779-792.

4. Электронные и магнитные свойства фазы железа ε-Fe при высоких давлениях до
241 ГПа в области температур 4-300 К/ А. Г. Гаврилюк [и др.]// Письма в ЖЭТФ. – 2023. –
Т. 117, №. 2. (принята в печать).

5. The first-order structural transition in NiO at high pressure/ A.G. Gavriliuk [et al.] // Communications Physics. – 2022. (in press).

6. Superconductivity in efficient thermoelectric material Cu₃Sb_{0.98}A_{10.02}Se₄/ Xiaomiao Zhao [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. – 2022. – Vol. 890. – P. 161828.

7. Intrinsic planar defects in germanium and their contribution to the excess specific heat at high temperatures/ M.V. Kondrin [et al.]// Physica status solidi (b). – February, 2022.– P. 2100463.

Искажения регистрации на импульсном ЛУЭ запаздывающих нейтронов от 238U
 фотоделения сцинтилляционным спектрометром в Pb-защите/ Л.З. Джилавян [и др.]//
 Известия РАН. Серия физическая. – 2022 – Т. 86, № 4 – С. 588-594

9. Distortions in the Registration of Delayed Neutrons from 238U Photofission on a Pulsed Electron Linac Using a Scintillation Spectrometer in Pb Shielding / L.Z. Dzhilavyan [et al.]// Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2022. – Vol. 86, No. 4. – P. 488-494.

10. Моделирование методом Монте-Карло мишени компактного источника нейтронов проекта DARIA/ Л.Н. Латышева [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, Синхротронные и Нейтронные Исследования. – 2022. – № 11 – С. 103-106.

11. Monte Carlo Simulation of the Target of the DARIA-Project Compact Neutron Source / L.N. Latysheva [et al.]// Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2022. – Vol. 16, No. 6. – P. 1019-1022.

12. A new model of intranuclear neutron-antineutron transformations in 16-8-O / J.L. Barrow [et al.]// Phys. Rev. C. – 2022. – Vol.105. – P. 065501.

13. Status and initial physics performance studies of the MPD experiment at NICA/ V. Abgaryan V. [et al.] (The MPD Collaboration) // Eur. Phys. J. A. – 2022. – Vol.58. – P. 140. – URL: https://doi.org/10.1140/epja/s10050-022-00750-6.

14. Калибровка черенковского монитора протонного пучка / С. В. Акулиничев [и др.]// Приборы и техника эксперимента. – 2023. – № 2. (принята в печать).

15. Force constant disorder in the Ni₄₄Nb₅₆ bulk metallic glass as observed by deep inelastic neutron scattering augmented by isotopic substitution / M. Krzystyniak [et al.] // Phys. Scr. – 2022. – Vol. 97. – P. 065702. – doi.org/10.1088/1402-4896/ac698a.

16. Demagnetization of Ordinary Chondrites under Hydrostatic Pressure up to 1.8GPa / N. S. Bezaeva [et al.] // Geochem. Int. – 2022. – Vol. 60, N5. – P. 421-429. – doi: 10.1134/S0016702922050032.

17. Branching ratio of the ⁷Li ground and excited states during interaction between neutrons with energies above 1 MeV and ¹⁰B nuclei/ S.I. Potashev [et al.] // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. -2022. – Vol. 86, No. 9. – P. 1079-1082.

18. Соотношение выходов каналов распада основного и возбужденного состояния ядра ⁷Li при взаимодействии нейтрона с энергией свыше 1 МэВ и ядра ¹⁰В / С.И. Поташев [и др.]// Изв. РАН. Сер. физ. – 2022. – Т. 86, №. 9. – С. 1304-1308.

19. SANS research of heat-resistant nonmagnetic alloys at neutron reflectometer and SANS instrument «GORIZONT» in INR RAS / В.С. Литвин [и др.]// Междунар. конф. «Condensed Matter Research at the IBR-2»/ ОИЯИ, г. Дубна, (25-29 апреля 2022 г.).

20. Botvina A. Production of nuclei and hypernuclei in relativistic ion reactions. // Talk at the 28th International Nuclear Physics Conference – INPC2022/ Cape Town, South Africa, (September 11-16, 2022). – URL: https://inpc2022.org/program/parallel-session-speakers/

21. Y,Hf-алюмоксановое связующее для корундовой керамики/ А.С. Похоренко [и др.] // Функциональные материалы и высокочистые вещества: Материалы конф./ г. Суздаль (3-7 октября 2022 г.). – С. 233-235.

22. Semenov A.A., Koptelov E.A. Fluctuations of 1-D interstitial fluxes under cascade damage irradiation// International Advances in Applied Physics & Materials Science: 12th APMAS 2022 Congress & Exhibition/ Oludeniz, Turkey, (October 13-19, 2022). (in press).

23. Джилкибаев Р.М., Хлюстин Д.В. Расчет спектров и времени диффузии быстрых нейтронов из мишени импульсного источника нейтронов на базе ускорителя протонов// Вторая всероссийская научно-практическая конференция: «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред»/ г. Дубна, (21-23 ноября 2022 г.).