

Федеральное агентство научных организаций РФ
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)

УДК 539.1; 539.12; 539.123

№ госрегистрации 115070610042

Инв.№

УТВЕРЖДАЮ
директор ИЯИ РАН
член-корр. РАН д.т.н.



Л.В.Кравчук

24 января 2017 года

ОТЧЁТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД, МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, В ТОМ
ЧИСЛЕ РАДИАЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, НЕЙТРОННАЯ
ФИЗИКА, ФИЗИКА И ТЕХНИКА ИСТОЧНИКОВ НЕЙТРОНОВ
(промежуточный за 2016 год)
0031-2014-0068

Научный руководитель
заместитель директора по научной работе
д.ф.-м.н.

А.В.Фещенко
19 января 2017 года

Москва 2017

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы д.ф.-м.н.



А.В.Фещенко (реферат, введение,
разделы 1-4, заключение)

19.01.2017

Исполнители темы:



д.ф.-м.н. Коптелов Э.А. (разделы 1-3)
19.01.2017



д.ф.-м.н. Недорезов В.Г. (раздел 3)
19.01.2017



к.ф.-м.н. Конобеевский Е.С. (раздел 3)
19.01.2017

РЕФЕРАТ

Отчёт содержит: 59 с., 14 рис.

НАНОСТРУКТУРА, НЕЙТРОННЫЕ СЕЧЕНИЯ, ЗАМЕДЛЕНИЕ НЕЙТРОНОВ, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ТРАНСМУТАЦИЯ ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ДЕТЕКТОР НЕЙТРОНОВ, ВРЕМЯПРОЛЁТНЫЙ СПЕКТРОМЕТР, НЕЙТРОННЫЙ ДИФФРАКТОМЕТР, БЫСТРЫЕ НЕЙТРОНЫ

В отчёте представлены результаты фундаментальных и прикладных работ, проведённых по государственному заданию в соответствии с планом научных исследований ИЯИ РАН на 2016 год. Из полученных результатов можно выделить следующие важнейшие результаты работ:

Проведено расчётно-теоретическое обоснование конфигураций нейтронных мишеней spallation-типа, поиску оптимальной конфигурации мишени с высоким выходом нейтронов на основе нептуния ^{237}Np .

Проведен расчётный сравнительный анализ источников нейтронов ИН-06 и РАДЭКС по спектрам и потокам замедленных нейтронов, на поверхности замедлителей и в 10 м от поверхности замедлителей.

Освоены четыре вычислительных программы, позволяющие детально рассчитывать накопление радиоактивных элементов в материалах мишени и в ADS. На их основе проведена оценка времени предельного накопления плутония ^{238}Pu в материале мишени на основе нептуния ^{237}Np и времени вывода мишени из эксплуатации.

Выполнено теоретическое описание и компьютерное моделирование адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействий в широком диапазоне энергий с целью предсказания свойств ядерной материи в экстремальных условиях.

Продолжалась разработка и совершенствование программного обеспечения для моделирования взаимодействия частиц и ядер различного спектрального состава со сложными макроскопическими мишенями; опубликованы результаты применения транспортного кода SHIELD, а также других доступных кодов, для расчётно-теоретических исследований в актуальных для Института областях, в том числе, моделирование нейтронного фона космогенного происхождения в подземных экспериментальных залах, в зависимости от состава материалов экспериментальных установок и окружающего грунта, а также расчеты взаимодействия космического излучения с метеоритами, поверхностью Луны, космическими аппаратами и эффекты космогенного происхождения на поверхности земли.

Исследованы потери протонного пучка на входе в рабочее тело (свинец) спектрометра СВЗ-100.

Выполнен цикл работ по физике гиперядер. Статистическая модель мультифрагментации ядер, модели Ферми-распада, испарения и деления распространены на гиперядра.

В эксперименте на дифрактометре ID18 на синхротроне ESRF, Гренобль, Франция проведено измерение плотности фононных состояний натурального монокристалла алмаза и двух монокристаллов, облучённых быстрыми нейтронами, показано существенная перестройка фононного спектра алмаза после облучения эпитепловыми нейтронами.

В эксперименте на спектрометре эпитепловых нейтронов VESUVIO, на импульсном источнике нейтронов ISIS, Великобритания показано существенное уширение резонансных пиков спектров неупругого нейтронного рассеяния с повышением температуры. Получены численные характеристики: кинетическая энергия для каждого химического элемента системы, среднеквадратичное смещение атомов, факторы Дебая-Валлера.

С помощью дифракции нейтронов в сотрудничестве с Курчатовским институтом проведены исследования кристаллической и магнитной структуры шпинелей.

Совместно с ИФВД проведён поиск предполагаемых структур кристаллических углеводородов. Были рассмотрены возможные варианты кристаллической структуры и предложены возможные подходы их синтеза.

Исследована кристаллическая структура α -тетрагонального бора; существование орторомбической фазы бора было предсказано теоретически, но впервые обнаружено экспериментально.

Изучено влияния давления на режим туннелирования и колебательные спектры водорода в α - $\text{MnH}_{0.07}$ методом неупругого рассеяния нейтронов.

Исследованы магнитные характеристики синтезированного однодоменного моноклинного пирротина, что имеет важное значение в области палеомагнетизма метеоритов.

Проведено исследование структуры Каптона – одного из наиболее радиационноустойчивых полимеров; обнаружено возникновение дальнего порядка с характерными расстояниями 50–100 Å.

Проведены измерения NFS-спектров от ядер Sn-119 в диапазоне давлений 0–150 ГПа, температур 4.8 - 300 К и магнитных полей 0 - 1.5 Т в сероводороде. Показано, что в ZFC режиме охлаждения-нагрева магнитное поле на ядрах Sn-119 эффективно экранируется сероводородом вплоть до температуры ~ 145 К при давлении $P \sim 150$ ГПа, что указывает на сверхпроводящее состояние II-го рода в сероводороде.

Исследован монокристалл BiTeCl при давлениях до 50 ГПа. Приложение давления, впервые индуцировало, теоретически предсказанное ранее, изолирующее состояние, а

затем сверхпроводящую фазу с нормальным состоянием в форме диэлектрика. При сильном сжатии происходит переход в другую сверхпроводящую фазу, у которой нормальное состояние является металлическим.

Исследован купрат $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$, являющийся идеальной модельной системой для изучения механизма сверхпроводимости, при приложении давления. Наблюдалось усиление двухмагнетонной моды, что, вероятно, связано с ростом T_c . Получено прямое и убедительное доказательство роли магнитных колебаний для спаривания носителей в купратных сверхпроводниках.

Исследованы свойства нового мультиферроика из семейства лангаситов новым методом синхротронной мессбауэровской спектроскопии. При давлениях выше 20 ГПа наблюдается сильное повышение температуры Нееля T_N , связанное со структурным переходом. Обнаружено разделение образца на два магнитных состояния с различными значениями T_N от ~ 50 и 130 К, что можно объяснить сильным двумерным магнитным упорядочением в плоскости и трёхмерным упорядочением, обусловленным взаимодействием между соседними плоскостями.

Исследованы структурные свойства лангасита при высоких гидростатических давлениях до 60 ГПа, создаваемых в камерах с алмазными наковальнями. Обнаружены три структурных фазовых перехода при $P \sim 3$ и при ~ 20 ГПа и ~ 40 ГПа. При втором переходе объём ячейки падает скачком на 7 %, что объясняет колоссальное увеличение точки Нееля в этом кристалле при давлениях выше 20 ГПа.

Разработан новый способ детектирования сверхпроводимости в образцах микронного размера при высоких давлениях методом мессбауэровской спектроскопии на изотопе Sn-119".

Обнаружено соединение на основе европия, демонстрирующее необычное сочетание дальнего магнитного порядка и сильных спиновых и зарядовых флуктуаций.

Проведено исследование аномалий динамики решетки в высших боридах редкоземельных элементов. Законы дисперсии, измеренные нейтронными методами, удалось описать при помощи разработанной модели суператома.

Методами малоуглового рентгеновского рассеяния и рентгеновской дифракции исследованы образцы полимерных композиционных материалов — диэлектриков с высокой теплопроводностью на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена и наночастиц алюминия с оксидным покрытием.

В рамках классической теории фазовых переходов первого рода продолжена разработка теории зарождения новой фазы при наличии макроскопических градиентов химических потенциалов веществ в исходной фазе.

Методом молекулярной динамики исследована диффузия гелия в вольфраме. Показано, что термическая диффузия следует закону Аррениуса только при достаточно низких температурах (< 500 К). При температурах выше 700 К происходит существенное отклонение от данного закона. Теоретически возможные физические причины данного поведения были также подтверждены соответствующим компьютерным моделированием.

В рамках исследований нейтрон - ядерных взаимодействий с помощью дифракции нейтронов на монокристаллах была сделана топография всех имеющихся в наличии монокристаллов KBr.

С целью создания и использования новых методов обработки данных при дифракции нейтронов на регулярных структурах, был предложен метод измерения когерентной амплитуды при дифракции нейтронов.

Создана и подготовлена к эксплуатации многопроволочная пропорциональная камера регистрации осколков деления и α - частиц. Подготовлена к экспериментальным измерениям система регистрации и обработки данных.

На втором канале установки ИРЭН создан прототип установки по исследованию Т-неинвариантной и Р - чётной амплитуды (n, γ) – реакции в низко лежащих резонансах ^{232}Th .

Развит метод нейтронной радиографии на белом пучке с использованием нейтронно-чувствительных пластин типа IP Fuji. Пластины типа Image Plate чувствительны только к гамма, но благодаря покрытию из оксида гадолиния становится возможно регистрировать нейтронное излучение. Пластины обладают эффектом памяти, и для очистки изображение с них необходимо использовать яркие люминесцентные лампы. Благодаря высокой разрешающей способности считывателя (50 мкм) они идеально подходят для радиографических исследований. Были получены радиографические изображения камер высокого давления с дефектами и без.

Создан W-Be-фотонейтронный источник и запущен на пучке электронов линейного ускорителя ЛУЭ-8-5 ИЯИ РАН. Оригинальная конструкция источника позволяет проводить как облучение образцов во внутренней камере источника, так и работу с выведенными пучками нейтронов (быстрых – 0.5-5 МэВ, тепловых, или промежуточных). Экспериментально измерены плотности потока тепловых нейтронов в измерительной полости источника и в выводном канале источника, которые составляют, соответственно, $\sim 10^7 - 10^8$ нейтрон/см²с и $\sim 10^4 - 10^5$ нейтрон/см²с при среднем токе электронов 30–40 мкА. Создан двухкоординатный твердомерно-газовый детектор тепловых нейтронов и прототип

детектора быстрых нейтронов с энергиями $\sim 1 - 10$ МэВ с возможностью определения направления вылета нейтрона.

С помощью активационно-измерительного комплекса, включающего W-Be-фотонейтронный источник нейтронов и низкофоновый гамма-спектрометр, проведены измерения содержания элементов в различных материалах. Отработана методика и проведены измерения ультрамалых содержаний элементов в воздушных аэрозольных фильтрах. Показано, что для большого числа элементов пределы определения микропримесей могут составлять $10^{-3} - 10^{-6}$ г/г.

Полученные результаты находятся на уровне лучших мировых или превышают их и представляют собой существенное продвижение в фундаментальных исследованиях природных явлений.

СОДЕРЖАНИЕ

Реферат	3
Введение	9
Основные результаты	10
1 Лаборатория нейтронных исследований	10
2 Разработка методов и аппаратуры низкофоновых измерений гамма-излучений с использованием германиевых гамма-спектрометров	41
3 Разработка источника медленных нейтронов на базе линейного ускорителя ЛУЭ-8	49
Заключение	59

ВВЕДЕНИЕ

Выполнялись работы по программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы, пункт 16. Современные проблемы ядерной физики, в том числе физики элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий, включая физику нейтрино и астрофизические и космологические аспекты, а также физики атомного ядра, физики ускорителей заряженных частиц и детекторов, создание интенсивных источников нейтронов, мюонов, синхротронного излучения и их применения в науке, технологиях и медицине.

Работы проводились в следующих направлениях:

получение прецизионных данных по рассеянию и реакциям с участием протонов, нейтронов, гамма-квантов, лёгких и делящихся ядер, спектрам нейтронов деления и других данных, необходимых для ядерной энергетики и других приложений;

развитие на этой основе троичного ядерно-физического комплекса: создание мощных источников синхротронного, нейтронного и иных ядерных излучений;

разработка новых прецизионных методов детектирования элементарных частиц;

исследования и разработки устройств детектирования излучений и высокотемпературных, радиационно-стойких систем для ядерно-физических комплексов и перспективных технологий;

использование методов рассеяния нейтронов и синхротронного излучения для исследования структуры и динамики конденсированных сред;

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1 Лаборатория нейтронных исследований

1 СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель работ д.ф.-м.н. Э.А. Коптелов

Исполнители:

Алексеев Андрей Алексеевич	н.с.
Аксенов Сергей Николаевич	м.н.с.
Гаврилюк Александр Григорьевич	с.н.с., к.ф.-м.н.
Латышева Людмила Николаевна	н.с.
Лебедь Юлия Борисовна	н.с., к.б.н.
Литвин Василий Сергеевич	м.н.с. к.ф.-м.н
Клементьев Евгений Станиславович	с.н.с., к.ф.-м.н.
Кузнецов Валерий Леонидович	с.н.с., к.ф.-м.н.
Кузнецова Евгения Васильевна	с.н.с., к.ф.-м.н.
Садыков Равиль Асхатович	зав.сект., к.ф.-м.н.
Сидоркин Станислав Федорович	зав.сект., к.ф.м.н.
Семенов Алексей Алексеевич	с.н.с., к.ф.-м.н.
Соболевский Николай Михайлович	зав.сект, д.ф.-м.н.
Трунов Дмитрий Николаевич	м.н.с.

1 ВВЕДЕНИЕ

Научная и научно-организационная деятельность Лаборатории нейтронных исследований ИЯИ РАН направлена на проведение и развитие работ по выполнению Государственного задания, в том числе разработку и оснащение научным оборудованием импульсного источника тепловых нейтронов ИН-06 (spallation типа) на основе сильноточного линейного ускорителя ионов водорода, разработку и реализацию программы фундаментальных и прикладных исследований на базе Нейтронного комплекса (включая облучательное устройство мишенно-ловушечного узла на прямом канале протонов – установку РАДЭКС, импульсный нейтронный источник ИН-06, спектрометр по времени замедления в свинце СВЗ-100), подбор и подготовку необходимых высококвалифицированных научных и инженерно-технических кадров.

В состав Лаборатории нейтронных исследований входят:

Расчетно-теоретический сектор.

Сектор конденсированных сред.

Сектор импульсных нейтронных источников, включая группу нейтрон-ядерных взаимодействий.

Сектор электроники и технического обеспечения.

Основные задачи лаборатории и входящих в нее секторов определены Государственным заданием на 2016 год.

1 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

1.1 Развитие Нейтронного комплекса ИЯИ РАН, приборного парка и средств математического моделирования для исследований по физике деления, нейтрон-ядерных взаимодействий и конденсированных сред

Научные руководители:

Эдуард Алексеевич Коптелов,
Александр Степанович Ботвина

Ответственные исполнители:

Василий Сергеевич Литвин,
Станислав Фёдорович Сидоркин,
Андрей Алексеевич Алексеев,
Николай Михайлович Соболевский,
Людмила Николаевна Латышева

1.1.1 Импульсный нейтронный источник ИН-06 ИЯИ РАН

Научный руководитель - заведующий сектором ЛНИ, кфмн С.Ф.Сидоркин.

Расчётно-теоретическое обоснование конфигураций нейтронных мишеней spallation-типа. Математическое моделирование процессов, инициированных пучком протонов линейного ускорителя в установках Нейтронного комплекса ИЯИ, с целью уточнения и улучшения параметров установок, планирования новых экспериментов и приложений.

Ведутся расчётно-теоретические работы по поиску оптимальной конфигурации мишени с высоким выходом нейтронов на основе нептуния ^{237}Np . Рассматриваются основные физико-технические особенности этих мишеней в сочетании с теплоносителями и конструкционными материалами, оптимальные форма и другие параметры, условия применимости такой мишени.

Проведен расчетный сравнительный анализ источников нейтронов ИН-06 и РАДЭКС по спектрам и потокам замедленных нейтронов, на поверхности замедлителей и в 10 м от поверхности замедлителей (работа в стадии подготовки публикации).

Получены и освоены четыре зарубежных программы, позволяющие детально рассчитывать накопление радиоактивных элементов в материалах мишени и в ADS. На их основе, в частности, проводятся расчеты по определению времени предельного накопления плутония ^{238}Pu в материале мишени на основе нептуния ^{237}Np , что накладывает ограничения на время вывода мишени из эксплуатации и перевода ее в режим хранения.

Продолжены работы по исследованиям возможных конфигураций ADS стенда применительно ко второму свободному боксу радиационной защиты нейтронного комплекса. В частности, продолжается расчетное моделирование поведения расплавов жидких солей на основе LiF-NaF-KF в экспериментальных каналах такого стенда (трансмутация в жидких солях), которые могли бы быть установлены вместо PbBi вставок в рассматриваемой конфигурации мишени. Продолжаются исследования других конфигураций стенда с целью демонстрации его возможностей и привлечения сторонних организаций к его созданию.

Продолжаются консультации с потенциальными зарубежными инвесторами по созданию ADS стенда. Определены первоочередные организационные шаги и проводились переговоры с представителями Российских организаций корпорации РОСАТОМ по их возможному участию в создании стенда.

1.1.1 ПУБЛИКАЦИИ

В 2016 году издательством Springer International Publishing Switzerland глава под названием «Proposal of the ADS Research Stand Based on the Linac of the Institute for Nuclear Research of the Russia Academy of Sciences» в сборнике «Thorium Energy for the World». Авторы: С.Ф. Сидоркин, А.Д. Рогов, Л.И. Пономарев, Э.А. Коптелов.

Пепелышев Ю.Н., Рогов А.Д., "Высокопоточный источник нейтронов на основе двухкаскадного бустера". Устный доклад на Научно-технической конференции: «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики (Нейтроника-2016)». 23 по 25 ноября 2016 года, г.Обнинск.

Сектор импульсных источников нейтронов обеспечивал текущие работы на нейтронном комплексе, как во время сеанса, так и в период подготовки к сеансу. Проведена работа по комплексной проверке оборудования нейтронных мишеней и приборной части. Проводится анализ отказов оборудования для последующего ремонта и устранения отмеченных отказов в случае открытия дополнительного финансирования. Подготовлены предложения по использованию ультразвуковых расходомеров.

1.1.2 Математическое моделирование процесса взаимодействия адронов и ядер со сложными макроскопическими мишенями.

Научный руководитель - заведующий сектором ЛНИ, проф Н.М.Соболевский

Исполнители:

с.н.с. А.С.Ботвина,

н.с. Л.Н.Латышева

Математическое моделирование является необходимым этапом широкого круга исследований в фундаментальной и прикладной ядерной физике.

При планировании, подготовке и интерпретации результатов экспериментов в физике атомного ядра, элементарных частиц и ядерной астрофизике на ускорителях, в подземных экспериментах, на спутниках и орбитальных станциях, необходимо компьютерное моделирование экспериментальной установки с целью предсказания фоновых условий, вклада конкурирующих процессов, отклика детекторов и т. п.

Ряд важных научно-технических проблем включает, как необходимый этап их решения, расчетно-теоретические исследования физики ядерно-каскадного процесса в среде. Расчеты генерации нейтронов, тепловыделения и образования нуклидов в протяжённых тяжёлых мишенях под действием интенсивного пучка протонов ("spallation"-процесс) необходимы в контексте проблем электроядерного бридинга, трансмутации отходов ядерной энергетики и ядерных материалов, при проектировании и разработке интенсивных импульсных источников нейтронов. Можно указать и другие не менее важные приложения, такие как пучковая терапия онкологических заболеваний, радиационное материаловедение, радиационная безопасность на ускорителях и в космосе и др., где компьютерное моделирование взаимодействия частиц с веществом играет важную роль.

Основным методом теоретического описания взаимодействия частиц высоких энергий со сложными мишенями является метод Монте-Карло. Поэтому универсальные компьютерные программы – транспортные коды, – позволяющие проводить такое моделирование, являются обязательной частью современного инструментария в физике атомного ядра и элементарных частиц. В качестве примера можно привести известные программы GEANT, FLUKA, MCNPX.

В ИЯИ РАН создан и развивается оригинальный отечественный транспортный код SHIELD (<http://www.inr.ru/shield/>). Он включает известные российские модели ядерных реакций, разработанные в ОИЯИ (Дубна) и ИЯИ РАН, которые постоянно совершенствуются. Транспортный код SHIELD предназначен для решения того же круга задач, что упомянутые выше коды, и имеет свои особенности и преимущества.

Код SHIELD в течение долгого времени с успехом применяется в контексте различных актуальных приложений и в фундаментальных исследованиях:

- генерация нейтронов, производство энергии и трансмутация нуклидов под действием пучка ускорителя (Accelerator Driven Systems);
- адронная терапия в онкологии – моделирование взаимодействия пучков протонов и легких ионов с тканезквивалентными средами;

- радиационные условия в космических аппаратах и на поверхности Луны; накопление космогенных изотопов в метеоритах и земных породах;
- взаимодействия ионного пучка в трактах транспортировки современных ускорителей тяжелых ионов;
- моделирование фоновых условий в подземных низкофоновых экспериментах;
- моделирование экспериментальных установок и др.

Качество и возможности транспортного кода существенно зависят от используемого генератора ядерных реакций. Транспортный код SHIELD включает известные российские модели ядерных реакций, разработанные в ОИЯИ (Дубна) и ИЯИ РАН, которые постоянно совершенствуются и активно применяются при решении актуальных задач ядерной физики промежуточных и высоких энергий.

Выполнено теоретическое описание и компьютерное моделирование адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействий в широком диапазоне энергий с целью предсказания свойств ядерной материи в экстремальных условиях, интерпретации и анализа экспериментальных данных (с.н.с. А.С. Ботвина). Публикации [1-3].

Продолжалась разработка и совершенствование программного обеспечения для моделирования взаимодействия частиц и ядер различного спектрального состава со сложными макроскопическими мишенями. Результаты применения транспортного кода SHIELD, а также других доступных кодов, для расчетно-теоретических исследований в актуальных для Института областях отражены в публикациях [4-7]. (Н.М.Соболевский, Л.Н.Латышева).

1.1.2 ПУБЛИКАЦИИ

1. S.P.Avdeyev, V.A.Karnaukhov, W.Karcz, V.V.Kirakosyan, P.A.Rukoyatkin, V.I.Stegaylov, H.Oeschler, A.S.Botvina. Source velocity at relativistic beams of ^4He . Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. v. 80 (no.3), p.330-332, 2016.

2. N.Buyukcizmeci, R.Ogul, A.S.Botvina. Theoretical analyses of FAZIA data with a statistical approach. Proceedings of IWM-EC 2016, GANIL, Caen, France, May 9-12, 2016. (II Nuovo Cimento Conf. Proc.)

3. N.Vonta, G.A.Souliotis, W.D.Loveland, Y.K.Kwon, K.Tshoo, S.C.Jeong, M.Veselsky, A.Bonasera, A.Botvina. Neutron-rich rare isotope production from projectile fission of heavy beams in the energy range of 20 MeV/nucleon. Phys. Rev. C **94**, 064611 (14 pages), 2016.

4. Л.Н.Латышева, С.Г.Лебедев, Н.М.Соболевский, А.В.Фещенко. Стенд для облучения электронных плат на линейном ускорителе протонов ИЯИ РАН: потоки частиц, активация и мощность дозы. Препринт ИЯИ РАН 1426/2016, Москва, 2016, 10 с.

5. N.Sobolevsky. Simulation of hadron cascades in tissue equivalent materials with the SHIELD-HIT transport code. Radiation Environment and Risk Analysis At and Near the Lunar Surface. Face-to-face Meeting #3, 5–7 April, 2016, Moscow.

6. A.Ergun, N.Sobolevsky, A.Botvina, N.Buyukcizmeci1, L.Latysheva, R.Ogul. Linear energy transfer in water phantom within SHIELD-HIT transport code. Turkish Physical Society 32nd International Physics Congress, 6-9 September 2016, Bodrum, Turkey. To be published in AIP Conf. Proc.

7. J.Norbury, N.Sobolevsky, T.Slaba, B.Reddell. Comparisons of Nuclear Isotopic and Pion Production Spectra from SHIELD, HZETRN, GEANT, FLUKA, MCNP and PHITS Transport Codes with Simple Shielding Geometries. Mars Radiation Modeling Workshop, Southwest Research Institute (SwRI), Boulder, Colorado, USA, June 28–30, 2016.

1.1.3 Исследования по физике деления и нейтрон – ядерных взаимодействий

Научный руководитель - рук.группы ЛНИ н.с. А.А.Алексеев.

Изучались потери протонного пучка на входе в рабочее тело (свинец) спектрометра СВЗ-100, путём исследования активации заменённого конечного участка ионопровода, подводящего протоны к мишенному узлу.

Исследовалась временная зависимость потока нейтронов вылетающих с грани свинцовой сборки примыкающей к графитовой призме и затем замедляющихся в ней до тепловой энергии.

1.1.4 Исследования и разработки устройств детектирования излучений для ядерно-физических комплексов и перспективных технологий

Научный руководитель - рук.группы ЛНИ н.с. А.А.Алексеев.

Проведено измерение потоков нейтронов, в зависимости от времени после импульса протонного ускорителя, в пространстве между свинцовой сборкой и биологической защитой, с использованием борного счётчика. Оценена возможность создания комбинированного нейтронного спектрометра совмещающего характеристики время-пролётного и спектрометра по времени замедления см. рис.

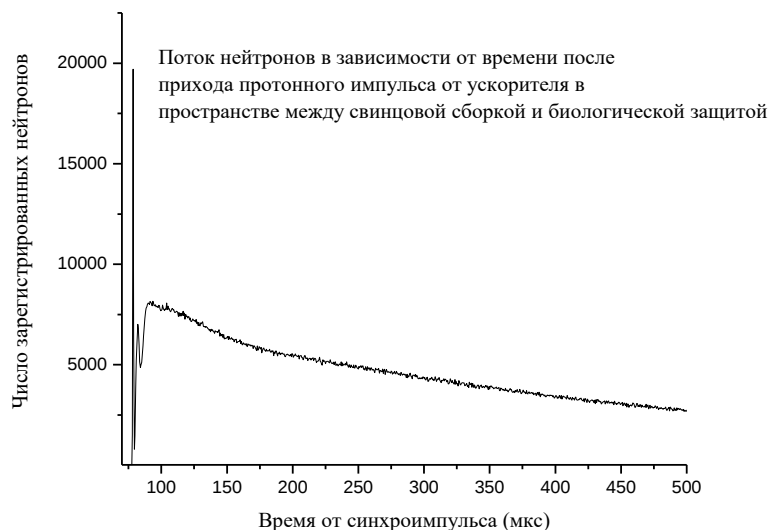


Рисунок 1.1.4 Зарегистрированные нейтроны в пространстве между свинцовой сборкой и блоками биологической защиты как функция времени задержки от синхроимпульса ускорителя протонов.

1.1.5. Математическое моделирование ядерных реакций и процессов взаимодействия частиц с веществом

Научный руководитель – А.С.Ботвина.

Использование результатов в высокотехнологичных приложениях и фундаментальных исследованиях.

Выполнен цикл работ по актуальной в настоящее время физике гиперядер. Статистическая модель мультифрагментации ядер (SMM), модели Ферми-распада, испарения и деления распространены на гиперядра. Оценены процессы последующих слабых распадов гиперядер [8-16].

8. A.S.Botvina, M.Bleicher, J.Pochodzalla, J.Steinheimer. Relativistic ion collisions as the source of hypernuclei. Eur. Phys. J. A 52 (2016) no.8, p.242.

9. A.S.Botvina, K.K.Gudima, J.Steinheimer, M.Bleicher, J.Pochodzalla. Formation of hypernuclei in heavy-ion collisions around the threshold energies. arXiv:1608.05680 [nucl-th].

10. A.S.Botvina, N.Buyukcizmeci, A.Ergun, R.Ogul, M.Bleicher, J.Pochodzalla. Formation of hypernuclei in evaporation and fission processes. Phys. Rev. **C94**, 054615 (2016).

11. A.S.Botvina, M.Bleicher, J.Pochodzalla, J.Steinheimer. Formation of hypernuclear in relativistic ion collisions. Proceedings HYP2015, Japan. Journal of the Physical Society of Japan (Supplement), 2016.

12. N.Buyukcizmeci, A.S.Botvina, R.Ogul. Influence of the hyper-terms in mass formulae on yield of hypernuclei in nuclear reactions code. Proceedings of the 32th International Conference of Turkish Physical Society, Bodrum, 5-10 Sept, 2016. To be published in AIP Conf. Proc.

13. A.S.Botvina. Formation of hypernuclei in relativistic ion collisions. Invited talk at the Workshop on 'Production and study of neutron-rich hypernuclei. Physics and potentialities at FAIR/R3B'. CEA-Saclay DSM, Saclay, France. January 19-21, 2016.
<http://esnt.cea.fr/Phoceca/Page/index.php?id=54>

14. A.Botvina. Production of hypernuclei from excited nuclear systems. A talk at the IWM-EC2016 workshop (International Workshop on Multi facets of EOS and Clustering). GANIL, Caen, France, May 9-12, 2016 . <http://pro.ganil-spiral2.eu/events/workshops/iwm/2016>

15. A.S. Botvina. Formation of hypernuclei in relativistic ion collisions. Invited talk at ICNFP2016 : 5th International Conference on New Frontiers in Physics. 6-14 July 2016, Kolymbari, Crete, Greece.

https://indico.cern.ch/event/442094/attachments/1146630/1958110/program_11july_full.pdf

16. A.S. Botvina. Formation of hypernuclei in relativistic ion collisions. A plenary talk at EXON2016 : 8th International Symposium on Exotic Nuclei. 4-10 September, 2016. Kazan, Russia. Book of Abstracts, E7-2016-53, JINR, Dubna, 2016, (ISBN 978-5-9530-0452-7), p.93.

Традиционной областью применения транспортного кода SHIELD является моделирование нейтронного фона космогенного происхождения в подземных экспериментальных залах, в зависимости от состава материалов экспериментальных установок и окружающего грунта, а также расчеты взаимодействия космического излучения с метеоритами, поверхность Луны, космическими аппаратами и эффектов космогенного происхождения на поверхности земли [17,18].

17. К.В.Мануковский, О.Г.Ряжская, Н.М.Соболевский, А.В.Юдин. Генерация нейтронов мюонами космических лучей в различных веществах. Ядерная Физика 79 (2016) 417–426.

18. В.Э.Янц, С.Г.Лебедев, Н.М.Соболевский. Геохронология и мониторинг космических лучей по накоплению космогенных изотопов ^{53}Mn и ^{10}Be в земных породах. Космические исследования. Принято к печати в 2016 году.

Применение транспортного кода SHIELD и других доступных кодов для моделирования нейтронных источников ИЯИ РАН позволило подготовить и подать заявку на изобретение фотонейтронного источника на базе электронного ускорителя ЛУЭ8 ЛФЯР [19].

19. А.В.Андреев, С.В.Зуев, Е.С.Конобеевский, Л.Н.Латышева, М.В.Мордовской, Н.М.Соболевский, Г.В.Солодухов. Фотонейтронный источник. МПК: G21G 4/02 (2016.01).

1.2 Использование методов рассеяния нейтронов, рентгеновского и гамма излучения для исследования структуры и динамики конденсированных сред

1.2.1 Эксперимент на дифрактометре ID18 на синхротроне ESRF, Гренобль, Франция.

Цель проведенного эксперимента – исследование атомной динамики системы, полученной в экстремальных условиях. Было проведено измерение плотности фононных состояний натурального монокристалла алмаза и двух монокристаллов облученных быстрыми нейтронами с флюенсами 2×10^{19} и 5×10^{19} н /см². Нейтронное облучение алмазов используется для модификации их физических свойств, что делает возможным их применение в области электроники. Облучение приводит к непрерывному и контролируемому нарушению структуры ближнего порядка алмаза. При этом происходит уменьшение средней макроскопической плотности системы вплоть до 45%. Интересно, что до 5% уменьшения плотности происходит только разрыв межатомных связей без появления графитовой фазы. Исследованы образцы с изменением плотности 3.7 и 5%. Измерения проводились на спектрометре ID18 (ESRF, Grenoble, France) в интервале энергий от 15 мэВ до +200 мэВ с разрешением 0.5 мэВ, которое достигается за счет применения ядерного резонансного анализа. Для достижения полного усреднения по переданному импульсу, каждый образец измерялся в четырех различных позициях. Измеренные спектры неупругого рассеяния синхротронного излучения показывают существенную перестройку фононного спектра алмаза после облучения тепловыми нейтронами.

1.2.2 Эксперимент на спектрометре тепловых нейтронов VESUVIO, на импульсном источнике нейтронов ISIS, Великобритания.

Цель эксперимента – исследование атомной динамики в металлических аморфных системах. В качестве образца был взят аморфный сплав $Zr_{40}Be_{60}$, полученный быстрой закалкой из расплава на поверхности вращающегося медного диска в гелиевой атмосфере. Образец измерялся при трех температурах: 10 К, 200 К и 300 К (при каждой из температур измерение длилось 24 часа). Измерения проводились на спектрометре глубокого неупругого нейтронного рассеяния VESUVIO (ISIS, Великобритания) в интервале энергий от 1 эВ до 150 эВ с разрешением 0.45 мэВ, которое обеспечивается за счет применения ядерно-резонансного фильтра - золотой фольги. В эксперименте использовалась обратная геометрия рассеяния (на углы: 130°-163°) для получения более высокой точности. Измеренные времяпролетные спектры неупругого нейтронного рассеяния показывают существенное уширение резонансных пиков с повышением температуры. Получены численные характеристики (кинетическая энергия для каждого хим. элемента системы,

среднеквадратичное смещение атомов, факторы Дебая-Валлера), проведены сравнения полученных величин с теоретически предсказанными величинами. Готовится публикация в ЖЭТФ.

1.2.3 Исследования кристаллической и магнитной структуры шпинелей

С помощью дифракции нейтронов (дифрактограммы были получены на установке реактора ИР-8 в Курчатовском институте) проводились исследования кристаллической и магнитной структуры шпинелей $\text{Cu}_{0.5}\text{In}_x\text{Fe}_{0.5-x}\text{Cr}_2\text{S}_4$.

1.2.4 Поиск структур кристаллических углеводородов

Совместно с ИФВД проведена работа по поиску предполагаемых структур кристаллических углеводородов. Известные в настоящее время углеводороды, при обычных условиях представляют собой жидкости или линейные полимерные цепочки. Однако, были проведены квантовохимические расчеты (М.В. Кондрин, ИФВД) с использованием программы quantumESPRESSO, которые показывают, что возможно существование трехмерных, ковалентно-связанных кристаллических углеводородов, которые будут энергетически более выгодными, чем бензол. Кристаллическая структура таких углеводородов получается из структуры алмаза или лонсдейлита, в которой часть атомов углерода отсутствует, и в образовавшихся пустотах присоединены атомы водорода в отношении С:Н приблизительно 1:1. Из геометрических соображений были рассмотрены возможные варианты кристаллической структуры углеводородов и предложены возможные подходы их синтеза [1].

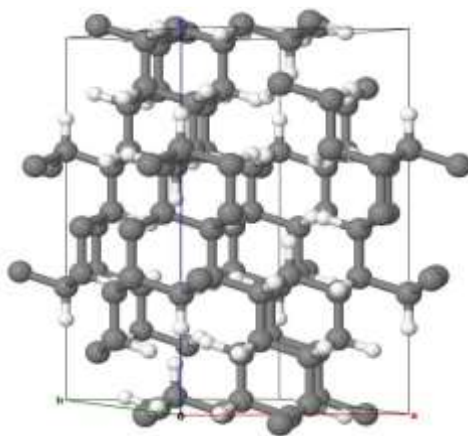


Рисунок 1.2.4.1 Предполагаемая структура кристаллического углеводорода (моногидрида алмаза) серые и белые атомы – углерод и водород соответственно.

1.2.5 Исследование кристаллической структуры α -тетрагонального бора

Была продолжена работа по исследованию кристаллической структуры α -тетрагонального бора, синтезированного Екимовым Е.А., ИФВД в 2011 году. Было

обнаружено, что в ячейке α -тетрагонального бора, которая содержит 52 атома, имеется до 7 атомов водорода, наиболее энергетически выгодные положения которых были определены с помощью квантовохимических расчетов. При нагревании данного гидрида бора происходит фазовый переход – водород выходит из кристаллической решетки и бор переходит в новую, более стабильную фазу с орторомбической решеткой. Существование орторомбической фазы бора было предсказано теоретически, но впервые в нашей работе обнаружено экспериментально [2].

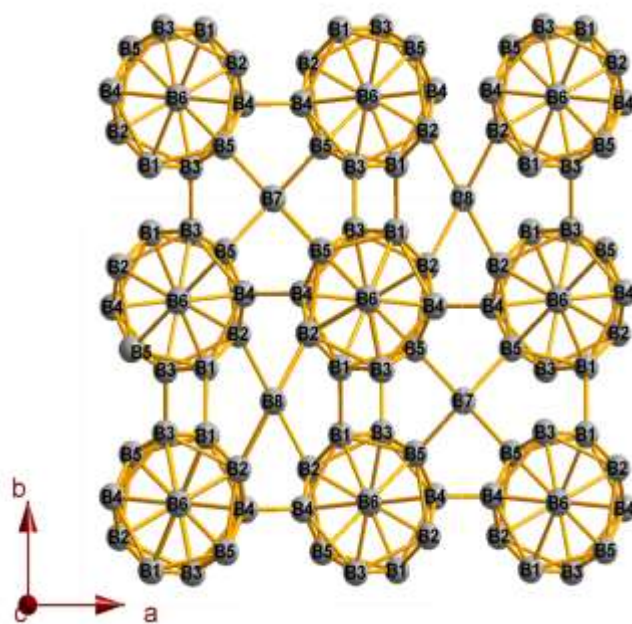


Рисунок 1.2.4.2 Кристаллическая структура орторомбической фазы бора.

1.2.6 Изучение влияния давления на режим туннелирования и колебательные спектры водорода в α -MnN_{0.07} методом неупругого рассеяния нейтронов

Применение гидростатического давления до 30 кбар показало сдвиг как оптической моды водорода, так и пика туннелирования для более высоких энергий. Первопринципные расчеты показывают, что потенциал для водорода в α -Mn становится в целом более крутой с ростом давления. В то же время, высота потенциального барьера и его протяженность в направлении уменьшения туннелирования и расчеты говорят о том, что значительные изменения динамики водорода в α -Mn при 100 кбар, когда оцененное туннельное расщепление основного состояния водорода превышает высоту барьера [3].

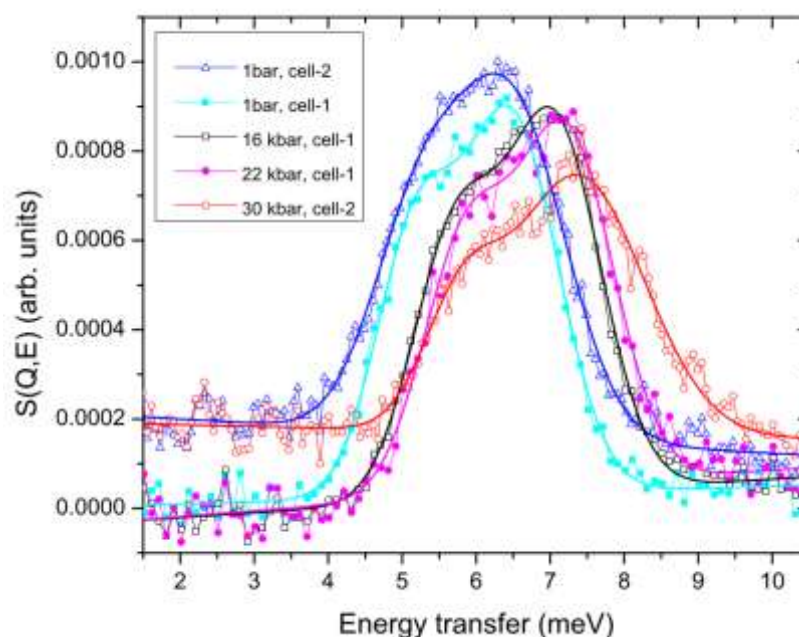


Рисунок 1.2.6 Спектры неупругого рассеяния нейтронов на α -MnH_{0.07} при T = 1.5 K и различных давлениях при E_i = 12 meV; Фон от камеры высокого давления и криостата вычтен.

2.7 Исследование комплексной магнитной характеристики синтезированного неидеального однодоменного моноклинного пирротина

Исследована комплексная магнитная характеристика синтезированного неидеального однодоменного (SD) моноклинного пирротина (Fe₇S₈). Образцы были изготовлены в виде порошка и порошка, диспергированного в эпоксидную смолу. "Неидеальности" относится к порошковой фракции преимущественно SD размера с небольшим вкладом малых PSD зерен. Было установлено, что такой неидеальный пирротин SD обеспечивает остаточную намагниченность в нескольких типах метеоритов (углистых хондритов, SNC и т.д.), что оправдывает использование синтетических композиций как аналог природных образцов. Данные были получены в диапазоне от 10 до 633 K и включают низкополевую магнитную восприимчивость (χ_0), термомагнитные кривые, основные петли гистерезиса, обратно-полевые кривые остаточной намагниченности размагничивания, кривые разворота первого порядка (НЦВО), переменное поле и размагничивание давлением изотермического насыщения остаточной намагниченности (SIRM), данные при низких температурах, а также спектры дифракции рентгеновских лучей и мессбауэровские. Характерный переход наблюдается при ~33 K. Применение гидростатического давления до 2 ГПа с помощью немагнитных клеток высокого давления привело к размагничиванию образца на 32-38%. Повторные циклы от 1,8 ГПа до атмосферного давления и обратно

привели к общему снижению остаточной намагниченности 44% (после 3 циклов). Эксперименты по размагничиванию под давлением имеют важное значение в области палеомагнетизма метеоритов и предполагают, что некоторые опубликованные данные метеоритов с неидеальным SD моноклинного пирротина в качестве носителя остаточной намагниченности может выходить за допустимые пределы [4].

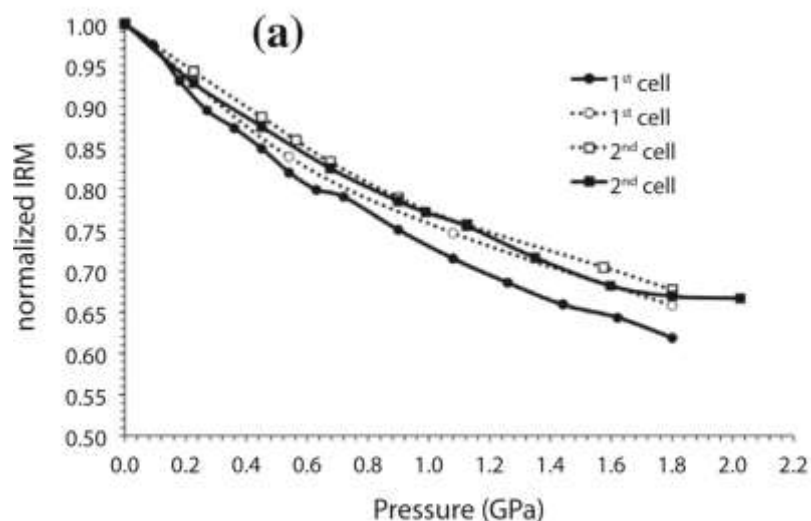


Рисунок 1.2.7 Независимые измерения при давлениях 0–1.8 ГПа и 0–2 ГПа. Зависимости остаточной изотермической реманентной от гидростатического давления 1.8 ГПа и 2 ГПа.

1.2.8 Исследование Каптона

Каптон – один из наиболее радиационноустойчивых полимеров, который используется в качестве изолятора при электрофизических сборках, в микрочипах, в том числе предназначенных для эксплуатации в экстремальных условиях, в военном и космическом оборудовании, атомных электростанциях, сверхпроводящих магнитах. Диапазон рабочих температур каптона от 4 до 674 К. Каптон обладает механической прочностью, устойчив к действию органических растворителей, кислот и щелочей. Нами получены данные о структуре каптона, облученного ионами свинца с энергией 8.6 МэВ/нуклон (флюенс 10^{10} - 10^{12} ион/см²) в результате комплексного исследования методами малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР) и дифракции, оптического поглощения в видимом диапазоне, ИК-спектроскопии и спектроскопии характеристических потерь энергии электронов. В результате облучения обнаружено возникновение дальнего порядка в каптоне с характерными расстояниями 50–100 Å [5].

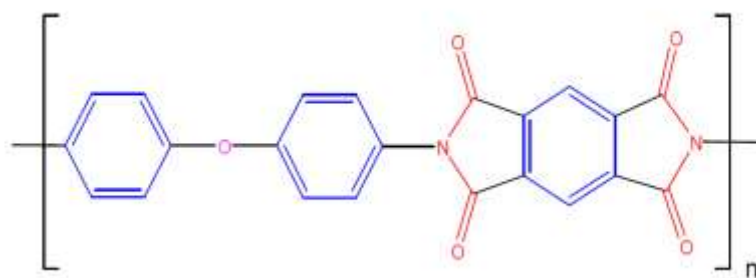


Рисунок 1.2.8.1 Химическая структура каптона.

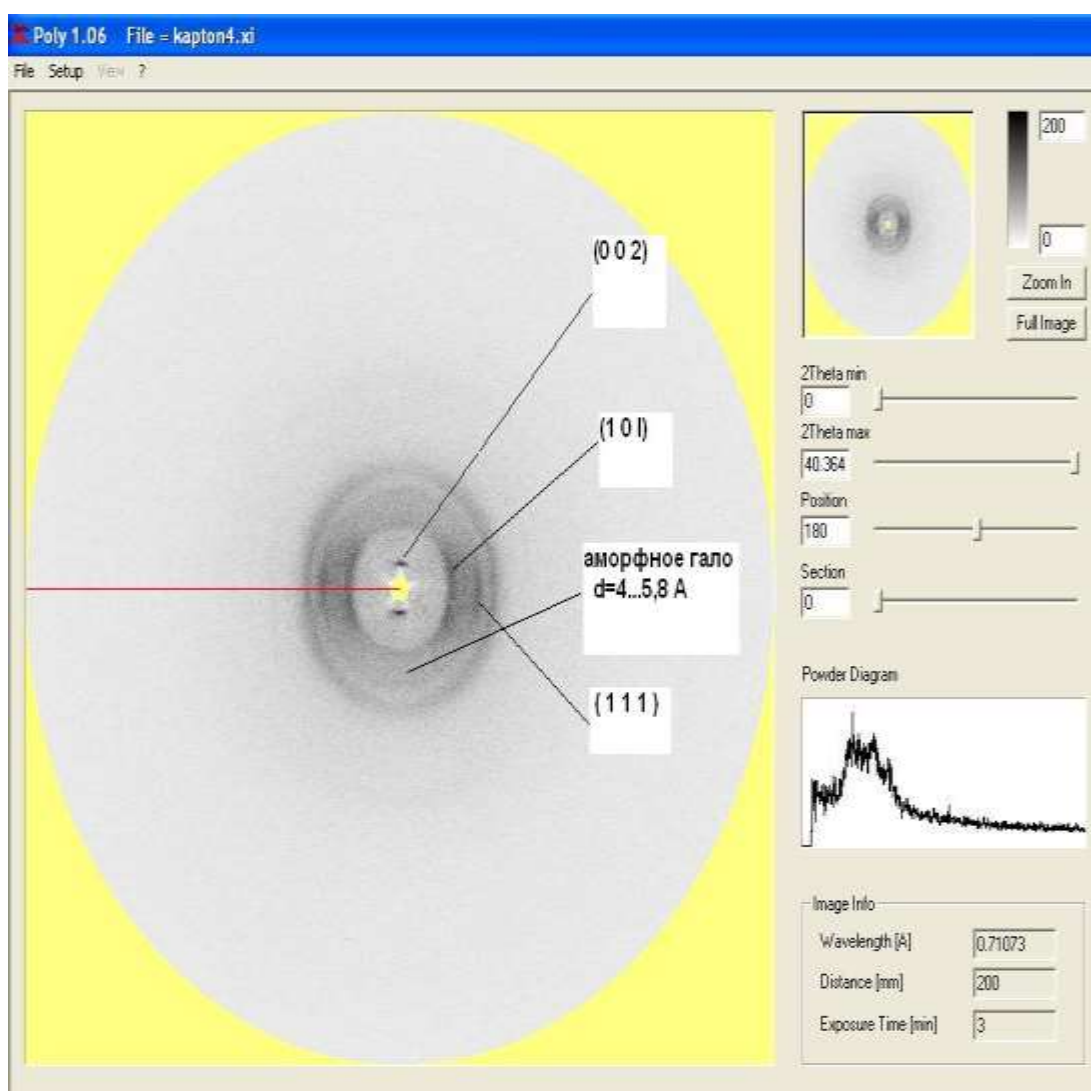


Рисунок 1.2.8.2 Двумерная рентгеновская дифракционная картина каптона, полученная на детекторе дифрактометра IPDS II ($MoK\alpha$ излучение).

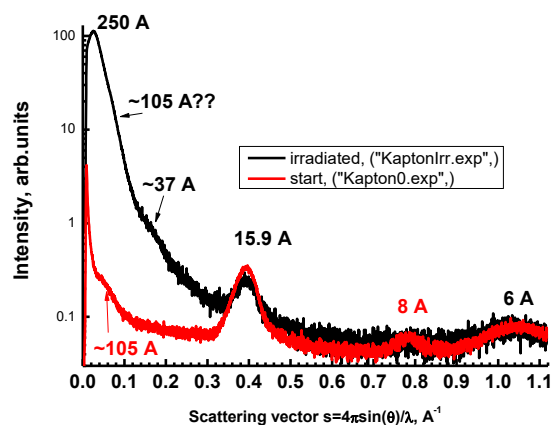


Рисунок 1.2.8.3 Кривые малоуглового рентгеновского рассеяния исходного и облученного каптона.

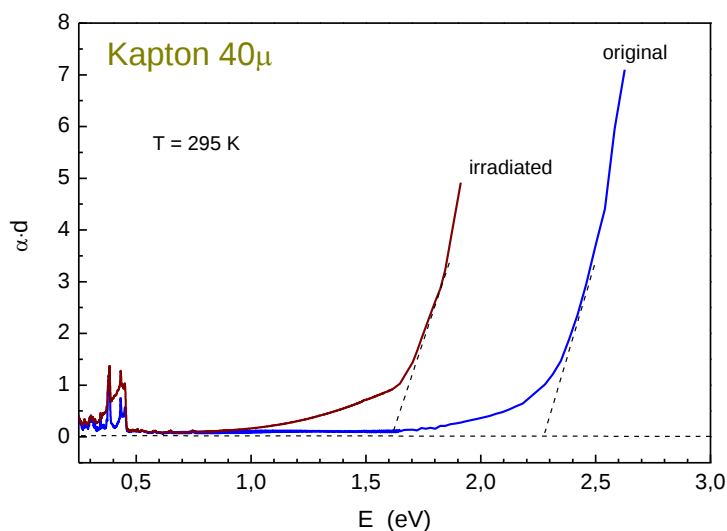


Рисунок 1.2.8.4 Сравнение ИК-спектров и спектров оптического поглощения в каптоне до (синяя линия) и после (коричневая линия) облучения ионизирующим излучением.

1.2.9 Измерения NFS-спектров от ядер Sn-119 в диапазоне давлений 0-150 ГПа

Проведены измерения NFS-спектров от ядер Sn-119 в диапазоне давлений 0-150 ГПа, и температур 4.8 - 300 К и магнитных полей 0 - 1.5 Т в сероводороде (H_2S). Исследованы магнитные поля на ядрах Sn-119 в сверхпроводящем и нормальном состоянии H_2S . Показано, что в ZFC режиме охлаждения-нагрева магнитное поле на ядрах Sn-119 эффективно экранируется сероводородом H_2S вплоть до температуры ~ 145 К при давлении

$P \sim 150$ ГПа, что указывает на сверхпроводящее состояние II-го рода в сероводороде при этих P-T условиях. По результатам экспериментов опубликована статья в журнале Science [6].

1.2.10 Исследования монокристалла BiTeCl

В Рашба-полупроводниковом монокристалле BiTeCl были проведены измерения сопротивления, коэффициента Холла и спектров комбинационного рассеяния света при высоких давлениях до 50 ГПа. Мы считаем, что приложение давления, впервые индуцировало, теоретически предсказанное ранее, изолирующее состояние, а затем сверхпроводящую фазу с нормальным состоянием в форме диэлектрика. При сильном сжатии происходит переход в другую сверхпроводящую фазу, у которой нормальное состояние является металлическим. Барическая зависимость критической температуры сверхпроводящего перехода имеет форму купола. Одновременно наблюдается кроссовер от электронной к дырочной проводимости при пересечении фазовой границы между этими двумя сверхпроводящими фазами. Всё это указывают на то, что возможна реализация топологического состояния диэлектрической и сверхпроводящей фазы в этом материале. По результатам экспериментов опубликована статья в журнале Phys. Rev. B (Rapid Communications) [7].

1.2.11 Исследование купрата $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$

Оптимально легированный купрат $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ является идеальной модельной системой для изучения механизма сверхпроводимости, при приложении давления. При этом можно избежать сложных конкурирующих эффектов в недодопированном режиме и исследовать чистые внутренне присущие эффекты, а не вторичные эффекты, связанные с изменением концентрации носителей. Путем тщательного изучения спектров комбинационного рассеяния при высоких давлениях и низких температурах, мы наблюдали усиление двухмаглонной моды и связали это с ростом на 10 К T_c (впервые была достигнута T_c более 100 К в этой системе) четко разграничивая эффект индуцированного давлением эффекта переноса заряда, который должен подавлять T_c . Наши эксперименты демонстрируют прямое и убедительное доказательство роли магнитных колебаний для спаривания носителей в купратных сверхпроводниках. Результаты доложены на APS March Meeting 2016.

1.2.12 Исследованы свойства нового мультиферроика из семейства лангаситов

Исследованы свойства нового мультиферроика из семейства лангаситов $\text{Ba}_3\text{TaFe}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ при высоких давлениях в камере с алмазными наковальнями в интервале

температур 4.2-295 К. Исследования проводились новым методом синхротронной мессбауэровской спектроскопии (SMS). При давлениях выше 20 ГПа наблюдается сильное повышение температуры Нееля T_N , связанное со структурным переходом. Наибольшее значение T_N составляет около 130 К, что почти в пять раз больше, чем значение при давлении окружающей среды (около 27 К). Было высказано мнение о том, что высокое значение T_N возникает за счет перераспределения ионов Fe между 3f и 2d тетраэдрическими позициями структуры лангасита. В этом случае короткие расстояния Fe-O и предпочтительные углы связи Fe-O-Fe создают условия для сильных сверхобменных взаимодействий между ионами железа, и в результате возникает эффективное двумерное (2D) магнитное упорядочение в (ab) плоскости. Обнаружено разделение образца на два магнитных состояния с различными значениями T_N от ~ 50 и 130 К, что можно объяснить сильным двухмерным магнитным упорядочением в (ab) плоскости и трёхмерным упорядочением, обусловленным взаимодействием между соседними плоскостями. По результатам экспериментов направлена статья в журнал JETP Letters [8].

1.2.13 Исследования структурных свойств лангасита $Ba_3NbFe_3Si_2O_{14}$ при высоких гидростатических давлениях

Проведены синхротронные рентгенографические исследования структурных свойств лангасита $Ba_3NbFe_3Si_2O_{14}$ при высоких гидростатических давлениях до 60 ГПа, создаваемых в камерах с алмазными наковальнями. Также при давлениях до 12 ГПа изучены мессбауэровские спектры поглощения ядер ^{57}Fe и спектры оптического поглощения. Обнаружены три структурных фазовых перехода при $P \sim 3$ и при ~ 20 ГПа и ~ 40 ГПа. При первом переходе происходит смещение легких атомов кислорода и повышается локальная симметрия 3f кислородных тетраэдров в окружении железа. Скачок объёма при переходе составляет порядка ~1.5 %. При втором переходе сильно уменьшается параметр c элементарной ячейки и объём ячейки падает скачком на 7 %. Значительное уменьшение параметра c при структурном переходе должно привести к существенному увеличению обменных взаимодействий между ионами железа в соседних плоскостях (ab), что объясняет колоссальное увеличение точки Нееля в этом кристалле при давлениях выше 20 ГПа. Третий переход при ~ 41 ГПа, носит размытый характер и скорее всего является переходом второго рода. По результатам экспериментов направлена статья в журнал JETP Letters [9].

1.2.14 Новый способ детектирования сверхпроводимости

Разработан новый способ детектирования сверхпроводимости в образцах микронного размера при высоких давлениях методом мессбауэровской спектроскопии на изотопе Sn-119". Подана заявка и получен патент.

1.2.15 Обнаружено необычное соединение на основе европия

Обнаружено соединение на основе европия, демонстрирующее необычное сочетание дальнего магнитного порядка и сильных спиновых и зарядовых флуктуаций. Обычно несовместимые типы основного состояния твердых тел реализуются в одном семействе интерметаллидов. Установлена фазовая диаграмма семейства соединений валентно-нестабильного европия $\text{EuCu}_2(\text{SixGe}_{1-x})_2$. Экспериментальные исследования проводились нейтронными (дифракция и неупругое рассеяние нейтронов) и синхротронными методами. Результаты работ опубликованы в журнале Phys. Rev. B. [10].

1.2.16. Исследование аномалий динамики решетки в высших бориды редкоземельных элементов

Проведено исследование аномалий динамики решетки в высших бориды редкоземельных элементов. Законы дисперсии, измеренные нейтронными методами, удалось описать при помощи разработанной модели суператома. Этот подход позволил хорошо описать акустические фононные моды и нижние оптические фононные ветви. Изучен эффект аномального смягчения продольных акустических фононов в нескольких кристаллографических направлениях. Показано, что смягчение акустических ветвей достигается за счет введения отрицательных констант силового межатомного взаимодействия между редкоземельными ионами. Изучены: структурная неустойчивость гексаборидов на основе 4f-элементов, роль валентной нестабильности в динамике решетки, влияние числа f-электронов на степень смягчения фононных мод. Результаты работ опубликованы в журнале ЖЭТФ [11].

1.2.17 Исследование материалов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена и наночастиц алюминия с оксидным покрытием

Методами малоуглового рентгеновского рассеяния и рентгеновской дифракции исследованы образцы полимерных композиционных материалов — диэлектриков с высокой теплопроводностью на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена и наночастиц алюминия с оксидным покрытием [12].

1.2.18 Исследование кинетики упрочняющего отжига

Кинетика упрочняющего отжига исследована методами нейтронной дифракции и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) [3], а также с помощью двухкристального нейтронного спектрометра (совместно с НИЦ КИ). При температуре 450 °С наблюдается рост интенсивностей дифракционных пиков фазы Ni_3Al , эти изменения происходят в течении длительного времени, более 10 часов. На кривых ДСК при нагреве до 1000 °С обнаружена особенность только при 950 °С, которая может быть связана с распадом фазы Ni_3Al . Также обнаружена корреляция между уширением прямого пучка нейтронов и ростом твердости, вызванного термообработкой образца, что свидетельствует об образовании не только нано- но и микрочастиц в процессе упрочняющего отжига.

Результаты были представлены на Первом Российском кристаллографическом конгрессе.

1.2 ПУБЛИКАЦИИ

Доклады

1. Elucidating the driving force of superconductivity increase in compressed optimally doped $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ / Chen, X.-J., Struzhkin, V.V., Zhang, J.-B., Gavriluk, O. G., Goncharov, A.F., Mao, H.-K., Lin, H.-Q., Gu, G. // APS March Meeting. - 2016. - abstract № C25.004.

2. Нейтронографические исследования кинетики упрочняющего отжига немагнитного сплава 40ХНЮ. - Литвин В.С., Садыков Р.А., Трунов Д.Н., Аксенов С.Н., Шушунов М.Н., Борисова П.А., Глазков В.П., Arravou M.S., Ioffe A. - Первый Российский кристаллографический конгресс, 21-26 ноября, 2016г., Москва. Стендовый доклад.

Публикации по теме:

1. Structure and topology of three-dimensional hydrocarbon polymers / Kondrin, M.V., Lebed, Y.B., Brazhkin, V.V // ActaCryst. Section B: Structural Science.- 2016.- v. 72.- p.634-641.

2. A new orthorhombic boron phase B51.5–52 obtained by dehydrogenation of “a-tetragonal boron” / E.A. Ekimov, Y.B. Lebed, N.U. Shirai, T.B. Shatalova, V.P. Sirotkin// J. Mater. Res. - 2016. - v. 11. - pp. 1232-1244.

3. Pressure effect on hydrogen tunneling and vibrational spectrum in $\alpha\text{-Mn}$ / A.I. Kolesnikov, A. Podlesnyak, R.A. Sadykov, V.E. Antonov, M.A. Kuzovnikov, G. Ehlers, G.E. Granroth // PHYS. REV. B 94. - 2016. - 134301.

4. Magnetic characterization of non-ideal single-domain monoclinic pyrrhotite and its demagnetization under hydrostatic pressure up to 2 GPa with implications for impact demagnetization / N.S. Bezaeva, D.A. Chareev, P. Rochette, M. Kars, J. Gattacceca, J.M. Feinberg, R.A. Sadykov, D.M. Kuzina, S.N. Axenov // Physics of the Earth and Planetary Interiors. - 2016.- v. 257.- pp. 79-90.

5. НАНОСТРУКТУРА ПОЛИМЕРА КАПТОНА, ОБЛУЧЕННОГО ИОНАМИ СВИНЦА / Р.А.Садыков, А.А. Ширяев, А.Г. Гаврилюк, И.Р. Садыкова, Б.А. Кульницкий, В.Д. Бланк, Ю.Б. Лебедь, Э.А. Коптелов // ПОВЕРХНОСТЬ. РЕНТГЕНОВСКИЕ, СИНХРОТРОННЫЕ И НЕЙТРОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.- 2016.- № 10.- с. 64–68.

6. Observation of superconductivity in hydrogen sulfide from nuclear resonant scattering / I. A. Troyan, O. G. Gavriluk, R. Rüffer, A. Chumakov, A. A. Mironovich, I. S. Lyubutin, D. Perekalin, A. Drozdov, M. Eremets // Science . - 2016. - v. 351.- pp. 1303-1306.

7. Realization of insulating state and superconductivity in the Rashba semiconductor BiTeCl / J.-J. Ying, V.V. Struzhkin, Zi-Yu Cao, A.F. Goncharov, H.-K. Mao, F. Chen, X.-H. Chen, O. G. Gavriluk, and X.-J. Chen // Phys. Rev. B. - v. 93(rapid communications).- p. 100504(R).

8. Magnetic phase separation and strong enhancement of the Neel temperature at high pressures in a new multiferroic Ba₃TaFe₃Si₂O₁₄ / I. S. Lyubutin, S. S. Starchikov, A. G. Gavriluk, I. A. Troyan, Yu. A. Nikiforova, A. G. Ivanova, A.I. Chumakov, R. Rüffer // JETP Letters, submitted November (2016).

9. Structural Transitions in Iron Based Ba₃NbFe₃Si₂O₁₄ Langasite at High Pressures / I. S. Lyubutin, A. G. Gavriluk, Yu. A. Nikiforova, A. G. Ivanova, I. A. Troyan, S. S. Starchikov, S. N. Aksenov, and K. V. Glazyrin // JETP Letters. submitted November (2016).

10. Europiummixed-valence, long-rangemagneticorder, and dynamic magnetic response in EuCu₂(SixGe1-x)₂ / K.S. Nemkovski, D.P. Kozlenko, P.A. Alekseev, J.-M. Mignot, A.P. Menushenkov, A.A. Yaroslavtsev, E.S. Clementyev, A.S. Ivanov, S. Rols, B. Klobes, R.P. Hermann, A.V. Gribov // Phys. Rev. B: Condensed Matter and Materials Physics. - 2016. - v. 94.- p. 195101.

11. Analysis of lattice instabilities in carcasse-cluster systems by superatom model / D.A. Serebrennikov, E.S. Clementyev, P.A. Alekseev // JETP . - 2016. - v. 123. - Issue 3.- p. 452.

12. РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИЕ И НЕЙТРОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ВЫСОКОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬЮ ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ ЭТИЛЕНА НА НАНОЧАСТИЦАХ АЛЮМИНИЯ / В. С. Литвин // XIII-ой Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов» : сб. науч. тр. / ИМЕТ РАН .- Москва. - 2016.- стр. 399-400.

Выпускные квалификационные работы:

ЧЕРНЫШЁВА Д.И. / Исследование наноматериалов методом рентгеновского и нейтронного малоуглового рассеяния // Диссертация на соискание уч. степени магистра по специальности «Прикладная математика и физика». — Москва, МФТИ, 2016.

Патенты:

Способ детектирования сверхпроводимости в образцах микронного размера при высоких давлениях методом мессбауэровской спектроскопии на изотопе Sn-119 / И. А. Троян, А. Г. Гаврилюк, И. С. Любутич // Заявка на патент № 2016143023 от 01 ноября 2016 г.

1.3 Радиационное материаловедение

Научный руководитель с.н.с. ЛНИ А.А. Семенов

В рамках классической теории фазовых переходов первого рода продолжена разработка теории зарождения новой фазы при наличии макроскопических градиентов химических потенциалов веществ в исходной фазе. Переработанная статья “Non-equilibrium formulation of Zeldovich-Frenkel equation for homogeneous nucleation via long-range diffusion” направлена для публикации в журнале Physica A.

Методом молекулярной динамики исследована диффузия гелия в вольфраме. Показано, что термическая диффузия следует закону Аррениуса только при достаточно низких температурах (< 500 K). При температурах выше 700 K происходит существенное отклонение от данного закона. Теоретически возможные физические причины данного поведения были также подтверждены соответствующим компьютерным моделированием. По результатам работы была подготовлена статья Haohua Wen, A. A Semenov and C. H. Woo “Understanding diffusion behavior of Helium in BCC Tungsten”, которая направлена для публикации в Journal of Nuclear Materials.

1.4 Развитие экспериментальной техники для исследования материалов тепловыми и эпитепловыми нейтронами

Научный руководители: с.н.с. ЛНИ В.Л. Кузнецов, Е.В. Кузнецова

В рамках исследований нейтрон - ядерных взаимодействий с помощью дифракции нейтронов на монокристаллах была сделана топография всех имеющихся в наличии монокристаллов KBr.

С целью создания и использования новых методов обработки данных при дифракции нейтронов на регулярных структурах, был предложен метод измерения когерентной амплитуды при дифракции нейтронов.

Результаты доложены на 24-th International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei: "Fundamental Interactions & Neutrons, Nuclear Structure, Ultracold Neutrons, Related Topics". (poster №24. Kuznetsov V., Kuznetsova E., Sedyshev P. Measurements of the amplitude

of the coherent neutron scattering in the diffraction.), Dubna, Russia, May 23-27, 2016 <http://isinn.jinr.ru/>

Результаты доложены на 24-th International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei: "Fundamental Interactions & Neutrons, Nuclear Structure, Ultracold Neutrons, Related Topics" (poster №20. Kuznetsov V., Kuznetsova E., Sedyshev P. New method of the measurements of the coherent neutron amplitude.), Dubna, Russia, May 23-27, 2016 <http://isinn.jinr.ru/>

Создана и подготовлена к эксплуатации многопроволочная пропорциональная камера регистрации осколков деления и α - частиц. Подготовлена к экспериментальным измерениям система регистрации и обработки данных. В виду отсутствия слоёв ^{235}U и ^{239}Pu работы приостановлены.

На втором канале установки ИРЭН создан прототип установки по исследованию Т-неинвариантной и Р - четной амплитуды (n,γ) – реакции в низко лежащих резонансах ^{232}Th .

1.5 Развитие методов нейтронной радиографии и томографии применительно к импульсным источникам нейтронов.

Научный руководитель зав. Сектором Р.А.Садыков

В текущем году было произведено развитие методов нейтронной радиографии на белом пучке с использованием нейтронно-чувствительных пластин типа IP Fuji. Пластины типа Image Plate чувствительны только к гамма, но благодаря покрытию из оксида гадолиния становиться возможно регистрировать нейтронное излучение. Пластины обладают эффектом памяти, и для очистки изображение с них необходимо использовать яркие люминесцентные лампы. Благодаря высокой разрешающей способности считывателя (50 мкм) они идеально подходят для радиографических исследований.

В течение года были проведены ряд исследований для развития методов нейтронной радиографии на белом пучке. Были получены радиографические изображения камер высокого давления с дефектами и без.

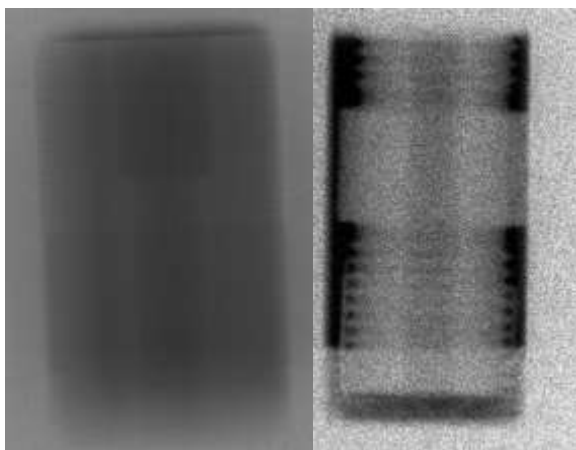


Рисунок 1.5.1 Камера высокого давления с трещиной и без трещины

Из полученных изображений видно, что на белом пучке можно получить четкое изображения внутренних дефектов для различных объектов. Это позволяет проводить неразрушающий контроль внутреннего состояния материалов.

Также во время работы ИН-06 был измерен образец - кости. В результате измерений имеем изображение низкого качества. Связано это с белым пучком, большая расходимость которого сказывается на размытости изображения. По результатам измерений можно сделать вывод что радиография на белом пучке не применимо для биологических объектов типа кость.



Рисунок 1.5.2 Радиография кости.

Также были проведены исследования для оценки влияния бериллиевого фильтра и коллиматора Соллера на фактическое разрешение полученное на пластине IP. В результате измерений выявилось, что в случае бериллиевого фильтра и коллиматора Соллера становится сложно получить качественное изображение т.к. сказывается недостаточная мощность источника нейтронов. Это приводит к увеличению времени экспозиции что в свою очередь увеличивает общий фон пластины и отношение сигнал/шум сильно уменьшается.

1 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа сотрудников ЛНИ в 2016 году продемонстрировала возможности проведения исследований и получения значимых результатов по ряду актуальных направлений современной физики, в том числе с использованием экспериментальных возможностей Лаборатории в ИЯИ РАН. Ряд результатов получен в результате сотрудничества с коллегами в России и за рубежом. Эффективность работ была бы выше при финансировании – достаточном для развития и модернизации экспериментальной базы нейтронного комплекса ИЯИ РАН.

1 ПУБЛИКАЦИИ

1. «Proposal of the ADS Research Stand Based on the Linac of the Institute for Nuclear Research of the Russia Academy of Sciences» в сборнике «Thorium Energy for the World». Авторы: С.Ф. Сидоркин, А.Д. Рогов, Л.И. Пономарев, Э.А. Коптелов
2. S.P.Avdeyev, V.A.Karnaukhov, W.Karcz, V.V.Kirakosyan, P.A.Rukoyatkin, V.I.Stegaylov, H.Oeschler, A.S.Botvina. Source velocity at relativistic beams of ^4He . Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. v. 80 (no.3), p.330-332, 2016.
3. N.Buyukcizmeci, R.Ogul, A.S.Botvina. Theoretical analyses of FAZIA data with a statistical approach. Proceedings of IWM-EC 2016 , GANIL, Caen, France, May 9-12, 2016. (II Nuovo Cimento Conf. Proc.)
4. N.Vonta, G.A.Souliotis, W.D.Loveland, Y.K.Kwon, K.Tshoo, S.C.Jeong, M.Veselsky, A.Bonasera, A.Botvina. Neutron-rich rare isotope production from projectile fission of heavy beams in the energy range of 20 MeV/nucleon. Phys. Rev. C94, 064611 (14 pages), 2016.
5. Л.Н.Латышева, С.Г.Лебедев, Н.М.Соболевский, А.В.Фещенко. Стенд для облучения электронных плат на линейном ускорителе протонов ИЯИ РАН: потоки частиц, активация и мощность дозы. Препринт ИЯИ РАН 1426/2016, Москва, 2016, 10 с.
6. N.Sobolevsky. Simulation of hadron cascades in tissue equivalent materials with the SHIELD-HIT transport code. Radiation Environment and Risk Analysis At and Near the Lunar Surface. Face-to-face Meeting #3, 5–7 April, 2016, Moscow.
7. J.Norbury, T.Slaba, B.Reddell, N.Sobolevsky. Transport Calculations Progress since Technical Interchange Meeting #2. Radiation Environment and Risk Analysis At and Near the Lunar Surface. Face-to-face Meeting #3, 5–7 April, 2016, Moscow.
8. J.Norbury, N.Sobolevsky, T.Slaba, B.Reddell. Comparisons of Nuclear Isotopic and Pion Production Spectra from SHIELD, HZETRN, GEANT, FLUKA, MCNP and PHITS Transport Codes with Simple Shielding Geometries. Mars Radiation Modeling Workshop, Southwest Research Institute (SwRI), Boulder, Colorado, USA, June 28–30, 2016.
9. A.S.Botvina, M.Bleicher, J.Pochodzalla, J.Steinheimer. Relativistic ion collisions as the source of hypernuclei. Eur. Phys. J. A 52 (2016) no.8, p.242.
10. A.S.Botvina, K.K.Gudima, J.Steinheimer, M.Bleicher, J.Pochodzalla. Formation of hypernuclei in heavy-ion collisions around the threshold energies. arXiv:1608.05680 [nucl-th].
11. A.S.Botvina, N.Buyukcizmeci, A.Ergun, R.Ogul, M.Bleicher, J.Pochodzalla. Formation of hypernuclei in evaporation and fission processes. Phys. Rev. C94, 054615 (2016).
12. A.S.Botvina, M.Bleicher, J.Pochodzalla, J.Steinheimer. Formation of hypernuclear in relativistic ion collisions. Proceedings HYP2015, Japan. Journal of the Physical Society of Japan (Supplement), 2016.

13. N.Buyukcizmeci, A.S.Botvina, R.Ogul. Influence of the hyper-terms in mass formulae on yield of hypernuclei in nuclear reactions code. Proceedings of the 32th International Conference of Turkish Physical Society, Bodrum, 5-10 Sept, 2016. To be published in AIP Conf. Proc.
14. A.Ergun, N.Sobolevsky, A.Botvina, N.Buyukcizmeci, L.Latysheva, R.Ogul. Linear energy transfer in water phantom within SHIELD-HIT transport code. Turkish Physical Society 32nd International Physics Congress, 6-9 September 2016, Bodrum, Turkey. To be published in AIP Conf. Proc.
15. A.S.Botvina. Formation of hypernuclei in relativistic ion collisions. Invited talk at the Workshop on 'Production and study of neutron-rich hypernuclei. Physics and potentialities at FAIR/R3B'. CEA-Saclay DSM, Saclay, France. January 19-21, 2016.
<http://esnt.cea.fr/Phoceca/Page/index.php?id=54>
16. A.Botvina. Production of hypernuclei from excited nuclear systems. A talk at the IWM-EC2016 workshop (International Workshop on Multi facets of EOS and Clustering). GANIL, Caen, France, May 9-12, 2016 . <http://pro.ganil-spiral2.eu/events/workshops/iwm/2016>
17. A.S. Botvina. Formation of hypernuclei in relativistic ion collisions. Invited talk at ICNFP2016 : 5th International Conference on New Frontiers in Physics. 6-14 July 2016, Kolymbari, Crete, Greece.
http://indico.cern.ch/event/442094/attachments/1146630/1958110/program_11july_full.pdf
18. A.S. Botvina. Formation of hypernuclei in relativistic ion collisions. A plenary talk at EXON2016 : 8th International Symposium on Exotic Nuclei. 4-10 September, 2016. Kazan, Russia. Book of Abstracts, E7-2016-53, JINR, Dubna, 2016, (ISBN 978-5-9530-0452-7), p.93.
19. К.В.Мануковский, О.Г.Ряжская, Н.М.Соболевский, А.В.Юдин. Генерация нейтронов мюонами космических лучей в различных веществах. Ядерная Физика 79 (2016) 417–426.
20. В.Э.Янц, С.Г.Лебедев, Н.М.Соболевский. Геохронология и мониторинг космических лучей по накоплению космогенных изотопов ^{53}Mn и ^{10}Be в земных породах. Космические исследования. Принято к печати в 2016 году.
21. А.В.Андреев, С.В.Зуев, Е.С.Конобеевский, Л.Н.Латышева, М.В.Мордовской, Н.М.Соболевский, Г.В.Солодухов. Фотонейтронный источник. МПК: G21G 4/02 (2016.01).
22. Structure and topology of three-dimensional hydrocarbon polymers / Kondrin, M.V., Lebed, Y.B., Brazhkin, V.V // ActaCryst. Section B: Structural Science.- 2016.- v. 72.- p.634-641.

23. A new orthorhombic boron phase B51.5–52 obtained by dehydrogenation of “a-tetragonal boron” / E.A. Ekimov, Y.B. Lebed, N.U. Shirai, T.B. Shatalova, V.P. Sirotinkin// J. Mater. Res. - 2016. - v. 11. - pp. 1232-1244.
24. Pressure effect on hydrogen tunneling and vibrational spectrum in α -Mn / A.I.Kolesnikov, A. Podlesnyak, R.A. Sadykov, V.E. Antonov, M.A. Kuzovnikov, G. Ehlers, G.E. Granroth // PHYS. REV. B 94. - 2016. - 134301.
25. Magnetic characterization of non-ideal single-domain monoclinic pyrrhotite and its demagnetization under hydrostatic pressure up to 2 GPa with implications for impact demagnetization / N.S. Bezaeva, D.A. Chareev, P. Rochette, M. Kars, J. Gattacceca, J.M. Feinberg, R.A. Sadykov, D.M. Kuzina, S.N. Axenov // Physics of the Earth and Planetary Interiors. - 2016.- v. 257.- pp. 79-90.
26. НАНОСТРУКТУРА ПОЛИМЕРА КАПТОНА, ОБЛУЧЕННОГО ИОНАМИ СВИНЦА /Р.А.Садыков, А.А. Ширяев, А.Г. Гаврилюк, И.Р. Садыкова, Б.А. Кульницкий, В.Д.Бланк, Ю.Б. Лебедь, Э.А. Коптелов // ПОВЕРХНОСТЬ. РЕНТГЕНОВСКИЕ, СИНХРОТРОННЫЕ И НЕЙТРОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.- 2016.- № 10.- с. 64–68.
27. Observation of superconductivity in hydrogen sulfide from nuclear resonant scattering / I. A. Troyan, O. G. Gavriluk, R. Rüffer, A. Chumakov, A. A. Mironovich, I. S. Lyubutin, D. Perekalin, A. Drozdov, M. Eremets // Science . - 2016. - v. 351.- pp. 1303-1306.
28. Realization of insulating state and superconductivity in the Rashba semiconductor BiTeCl / J.-J. Ying, V.V. Struzhkin, Zi-Yu Cao, A.F. Goncharov, H.-K. Mao, F. Chen, X.-H. Chen, O. G. Gavriluk, and X.-J. Chen // Phys. Rev. B. - v. 93(rapid communications).- p. 100504(R).
29. Magnetic phase separation and strong enhancement of the Neel temperature at high pressures in a new multiferroic Ba₃TaFe₃Si₂O₁₄ / I. S. Lyubutin, S. S. Starchikov, A. G.Gavriluk, I. A. Troyan, Yu. A. Nikiforova, A. G. Ivanova, A.I. Chumakov, R. Rüffer // JETP Letters, submitted November (2016).
30. Structural Transitions in Iron Based Ba₃NbFe₃Si₂O₁₄ Langasite at High Pressures / I. S. Lyubutin, A. G. Gavriluk, Yu. A. Nikiforova, A. G. Ivanova, I. A. Troyan, S. S. Starchikov, S. N. Aksenov, and K. V. Glazyrin // JETP Letters. submitted November (2016).
31. Europiummixed-valence, long-rangemagneticorder, and dynamic magnetic response in EuCu₂(SixGe1–x)₂ / K.S. Nemkovski, D.P. Kozlenko, P.A. Alekseev, J.-M. Mignot, A.P. Menushenkov, A.A. Yaroslavtsev, E.S. Clementyev, A.S. Ivanov, S. Rols, B. Klobes, R.P. Hermann, A.V. Griбанov // Phys. Rev. B: Condensed Matter and Materials Physics. - 2016. - v. 94.- p. 195101.
32. Analysis of lattice instabilities in carcasse-cluster systems by superatom model / D.A. Serebrennikov, E.S. Clementyev, P.A. Alekseev // JETP - 2016. - v. 123. - Issue 3.- p. 452.

33. РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИЕ И НЕЙТРОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ВЫСОКОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬЮ ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ ЭТИЛЕНА НА НАНОЧАСТИЦАХ АЛЮМИНИЯ / В. С. Литвин // Труды XIII-ой Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов»: сб. науч. тр. / ИМЕТ РАН .- Москва. - 2016.- стр. 399-400.

34. К.В.Мануковский, О.Г.Ряжская, Н.М.Соболевский, А.В.Юдин. Генерация нейтронов мюонами космических лучей в различных веществах. Ядерная Физика 79 (2016) 417–426.

35. Л.Н.Латышева, С.Г.Лебедев, Н.М.Соболевский, А.В.Фещенко. Стенд для облучения электронных плат на линейном ускорителе протонов ИЯИ РАН: потоки частиц, активация и мощность дозы. Препринт ИЯИ РАН 1426/2016, Москва, 2016, 10 с.

36. J.Steinheimer, A.Botvina and M.Bleicher. Sub-threshold charm production in nuclear collisions. arXiv:1605.0343, 2016. Submitted to PRC.

37. J.Steinheimer, A.S.Botvina and M.Bleicher. Recent results from strangeness in transport models. J. Phys.: Conf. Ser. v.668, p. 012007 (8 pages), 2016. DOI: 10.1088/1742-6596/668/1/012007

38. A.S.Botvina, N.Buyukcizmeci, A.Ergun, R.Ogul, M.Bleicher, J.Pochodzalla. Formation of hypernuclei in evaporation and fission processes. Accepted in PRC.

39. СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ НЕЙТРОНОВ ОСНОВЕ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ И СВЕТОВОДОВ- В. С. Литвин, В. Н. Марин, С. Х. Караевский, Д. Н. Трунов, С. Н. Аксёнов, А. А. Столяров, Р. А. Садыков. - КРИСТАЛЛОГРАФИЯ, 2016, том 61, № 1, с. 103–107

Доклады

1. Elucidating the driving force of superconductivity increase in compressed optimally doped $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ / Chen, X.-J., Struzhkin, V.V., Zhang, J.-B., Gavriluk, O. G., Goncharov, A.F., Mao, H.-K., Lin, H.-Q., Gu, G. // APS March Meeting. - 2016. - abstract № C25.004.

2. Нейтронографические исследования кинетики упрочняющего отжига немагнитного сплава 40ХНЮ. - Литвин В.С., Садыков Р.А., Трунов Д.Н., Аксенов С.Н., Шушунов М.Н., Борисова П.А., Глазков В.П., Appavou M.S., Ioffe A. - Первый Российский кристаллографический конгресс, 21-26 ноября, 2016г. , Москва. Стендовый доклад.

3. 24-th International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei: "Fundamental Interactions & Neutrons, Nuclear Structure, Ultracold Neutrons, Related Topics". (poster №24. Kuznetsov V., Kuznetsova E., Sedyshev P. Measurements of the amplitude of the coherent neutron scattering in the diffraction.), Dubna, Russia, May 23-27, 2016. <http://isinn.jinr.ru/>

4. 24-th International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei: "Fundamental Interactions & Neutrons, Nuclear Structure, Ultracold Neutrons, Related Topics" (poster №20. Kuznetsov V., Kuznetsova E., Sedyshev P. New method of the measurements of the coherent neutron amplitude.), Dubna, Russia, May 23-27, 2016 <http://isinn.jinr.ru/>
5. J.Norbury, N.Sobolevsky, T.Slaba, B.Reddell. Comparisons of Nuclear Isotopic and Pion Production Spectra from SHIELD, HZETRN, GEANT, FLUKA, MCNP and PHITS Transport Codes with Simple Shielding Geometries. Mars Radiation Modeling Workshop, Southwest Research Institute (SwRI), Boulder, Colorado, USA, June 28–30, 2016.
6. A.S. Botvina. Formation of hypernuclei in relativistic ion collisions. Invited talk at ICNFP2016 : 5th International Conference on New Frontiers in Physics. 6-14 July 2016, Kolymbari, Crete, Greece.
https://indico.cern.ch/event/442094/attachments/1146630/1958110/program_11july_full.pdf
7. A. Botvina. Production and yields of light hypernuclei. Invited talk at the Super-FRS Collaboration Meeting. Moerfelden-Walldorf, Hessen, Germany. April 20-22, 2016.
<https://indico.gsi.de/conferenceDisplay.py?confid=4413>
8. N.Buyukcizmeci, R.Ogul, A.S.Botvina. Theoretical analyses of FAZIA data with a statistical approach. Proceedings of IWM-EC 2016 , GANIL, Caen, France, May 9-12, 2016 . (II Nuovo Cimento Conf. Proc.)
9. Новый тип немагнитных камер высокого давления для исследований конденсированных сред с помощью тепловых нейтронов на основе с нулевой матрицей TiZr. - Р. А. Садыков – Стендовый доклад. Научно практическая конференция « Научное приборостроение – современное состояние и перспективы развития», 15-16 ноября 2016 г., ФАНО, Москва.
10. Нейтронографический комплекс для исследования конденсированных сред и нанодиагностики на базе импульсного источника нейтронов ИН-06 ИЯИ РАН: Современное состояние, Садыков Р.А., Литвин В.С., Клементьев Е.С., Трунов Д.Н., Аксенов С.Н., Кузнецов С.П., Мешков И.В., Лапушкин Ю.А., Алексеев А.А., Марин В.Н., Поташев С.И., Сидоркин С.Ф., Соболевский Н.М., Фещенко А.В., Серов В.Л., Алексеев П.А., Булкин А.П., Ульянов В.А., Коптелов Э.А., Кравчук Л.В. - Первый Российский кристаллографический конгресс, 21-26 ноября, 2016г., Москва. - Стендовый доклад.
11. Многоцелевая нейтронографическая установка «ДРАКОН», Соменков В.А., Глазков В.П., Эм В.Т., Гуреев А.И., Садыков Р.А., Трунов Д.Н., Аксенов С.Н., Кравчук Л.В., Важенцев А.И. - Первый Российский кристалло-графический конгресс, 21-26 ноября, 2016г., Москва. - Устный доклад

12. Линейные и кольцевые детекторы на основе твердотельных сцинтилляционных детекторов тепловых нейтронов. В.Н. Марин, Р.А. Садыков, Д.Н. Трунов, В.С. Литвин, С.Н. Аксенов, А.А. Столяров, Ю.Б. Лебедь - Рабочее совещание «Дифракция нейтронов – 2016» ПИЯФ, 18-19 февраля, 2016, Гатчина)

13. Линейные и кольцевые детекторы на основе твердотельных сцинтилляционных детекторов тепловых нейтронов. В.Н. Марин, Д.Н. Трунов, Р.А. Садыков, В.С. Литвин, С.Н. Аксенов. – Стендовый доклад. Научно практическая конференция « Научное приборостроение – современное состояние и перспективы развития», 15-16 ноября 2016 г., ФАНО, Москва.

14. N.Sobolevsky. Simulation of hadron cascades in tissue equivalent materials with the SHIELD-HIT transport code. Radiation Environment and Risk Analysis At and Near the Lunar Surface. Face-to-face Meeting #3, 5–7 April, 2016, Moscow.

15. A.Ergun, N.Sobolevsky, A.Botvina, N.Buyukcizmeci1, L.Latysheva, R.Ogul. Linear energy transfer in water phantom within SHIELD-HIT transport code. Turkish Physical Society 32nd International Physics Congress, 6-9 September 2016, Bodrum, Turkey. To be published in AIP Conf. Proc.

2 Разработка методов и аппаратуры низкофоновых измерений гамма-излучений с использованием германиевых гамма-спектрометров

Научный руководитель: А.В.Андреев.

Соисполнители: ЛФЯР ИЯИ РАН

Основные исполнители:

Зуев С.В., снс, кфмн

Бурмистров Ю.М., мнс

Мордовской М.В, зав.сект., кфмн

Исполнители

Солодухов Г.В., зав.сект., кфмн

Поташёв С.И., снс, кфмн

Сабинин С.Л.

Тишин В.В.

1 РЕФЕРАТ

Отчет 9 с., 3 рис., 1 табл.

НЕЙТРОННО-АКТИВАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ, ГАММА СПЕКТРОМЕТР, НИЗКОФОНОВАЯ КАМЕРА, ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ, ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ, ФОТОНЕЙТРОННЫЙ ИСТОЧНИК, АКТИВАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС

Цель работы – разработка методов и аппаратуры низкофоновых измерений гамма-излучений с использованием германиевых гамма-спектрометров.

В процессе исследований проводились работы по разработке новых методик нейтронно-активационного анализа с улучшенными метрологическими характеристиками, исследования конденсированных сред, радиационного материаловедения и других физических задач с использованием новых ядерно-физических установок.

В результате исследований впервые создана новая ядерно-физическая установка – активационно-измерительный комплекс на базе W-Be фотонейтронного источника ИЯИ РАН на серийном промышленном электронном ускорителе ЛУЭ-8-5 и низкофонового гамма-спектрометра. С помощью комплекса проведены измерения содержания элементов в различных материалах. Отработана методика и проведены измерения ультрамалых содержаний элементов в воздушных аэрозольных фильтрах. Проведены измерения содержания Au, As, Sb, Mn, Fe, W и других элементов в образцах различных материалов. Проведенные оценки пределов определения микропримесей в материалах показали, что для большого числа элементов пределы могут составлять $10^{-3} - 10^{-6}$ г/г.

2 ВВЕДЕНИЕ

В рамках Приоритетного направления развития науки, технологий и техники в Российской Федерации «Рациональное природопользование» и Критических технологий Российской Федерации – «Технологии поиска, разведки, разработки месторождений полезных ископаемых и их добычи» и «Технологии мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации ее загрязнения» актуальным является использование новых ядерно-физических установок для нейтронно-активационного анализа (НАА), который получил широкое распространение в анализе высокочистых веществ и геологических проб. При этом большое значение для определения содержания микропримесей в веществах имеет наличие интенсивных источников нейтронов и высокоэффективных прецизионных гамма-спектрометров, работающих в условиях малого естественного фона.

2 ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В ИЯИ РАН создан активационно-измерительного комплекс, включающий W-Be-фотонейтронный источник нейтронов на базе линейного ускорителя электронов и низкофоновый гамма-спектрометр.

В качестве источника электронов использован серийный промышленный низкоэнергетический ускоритель электронов ЛУЭ-8-5 Института ядерных исследований РАН. Фотонейтронный источник показан на рис. 2.1.



Рисунок 2.1 – W-Be-фотонейтронный источник на пучке электронов ускорителя ЛУЭ-8-5 ИЯИ РАН

Оригинальная конструкция источника позволяет проводить как облучение образцов во внутренней камере источника, так и работу с выведенными пучками нейтронов (быстрых – 0.5-5 МэВ, тепловых, или промежуточных). Плотность потока тепловых нейтронов в измерительной полости источника составляет $\sim 10^7 - 10^8$ нейтрон/см²с при среднем токе электронов 30–40 мкА.

Измерительная часть комплекса включает низкофоновую камеру с «пассивной» защитой, германиевый гамма-спектрометр и систему регистрации, сбора и обработки информации с детектора. Текущий вариант защиты обеспечивает значение скорости счета фона менее 3 имп/с в диапазоне энергий регистрации гамма-квантов 100 – 2500 кэВ.

Для определения содержания микропримесей в веществах используется метод нейтронно-активационного анализа. Создана база данных и библиотека спектров изотопов различных нуклидов, облученных потоками нейтронов фотонейтронного источника. На рис. 2.2 показан спектр образца золота, который используется в качестве эталона при анализе образцов материалов.

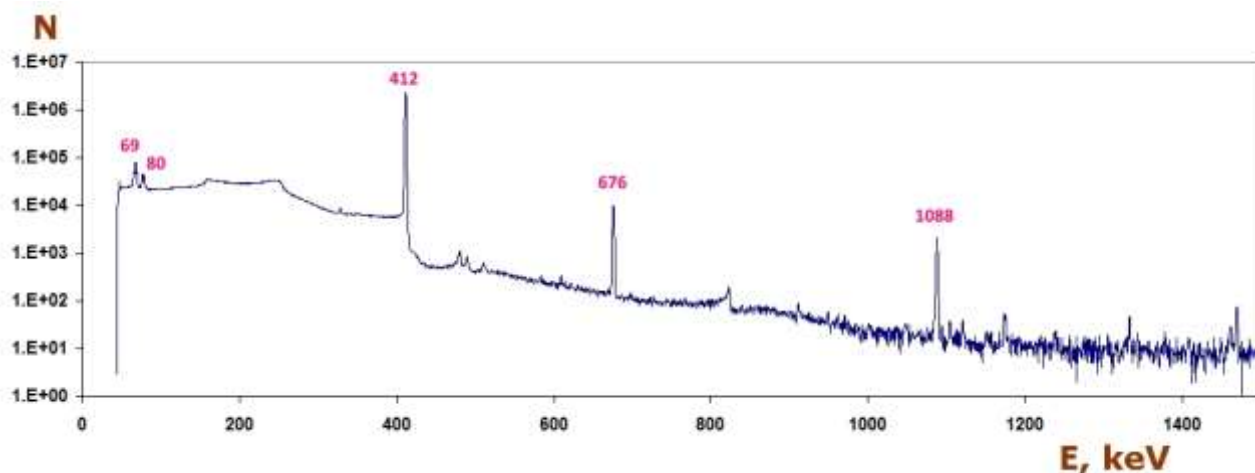


Рисунок 2.2 – Гамма-спектр активированного образца золота массой 0.6 г. Время активации – 2 часа, плотность потока тепловых нейтронов $\sim 10^7$ нейтрон /с·см²

Разработан набор компьютерных программ для автоматической расшифровки спектров с идентификацией пиков от различных изотопов.

Помимо основного вклада от тепловых нейтронов в спектре нейтронов фотонейтронного источника присутствуют вклады быстрых нейтронов и эпитепловых. В рамках НАА площадь пика i -го радионуклида в гамма-спектре активированного образца представляется в виде:

$$S_i = \frac{m_i g_i N_A p_i a_i}{M_i \lambda_i} J_i E(t_a, t_e, t_u), \quad (1)$$

где J_i – скорость реакции:

$$J_i = \int_0^{\infty} \sigma_i(E) \Phi(E) dE, \quad (2)$$

$$E(t_a, t_e, t_u) = (1 - e^{-\lambda_i t_a}) e^{-\lambda_i t_e} (1 - e^{-\lambda_i t_u}), \quad (3)$$

$S_i = S_i^{общ} - S_i^{фон}$ – число отсчетов в аналитическом пике изотопа i -го элемента; $S_i^{общ}$ – общее число отсчетов в аналитическом пике изотопа i -го элемента; $S_i^{фон}$ – число отсчетов фона в аналитическом пике изотопа i -го элемента; m_i – масса искомого элемента; N_A – число Авогадро; g_i – содержание аналитического изотопа i -го элемента в естественной смеси изотопов; p_i – выход гамма-квантов на один распад образовавшегося радиоактивного изотопа; M_i – атомный вес искомого элемента; $a_i = a_{\text{погл}} \cdot \varepsilon_{\text{эфф}} \cdot a_{\text{мертв}} \cdot a_{\text{сам}}$ – коэффициент, учитывающий экспериментальные условия; $a_{\text{погл}}$ – коэффициент, учитывающий поглощение в образце; $\varepsilon_{\text{эфф}}$ – эффективность регистрации излучения наведенной активности, испущенного из точки, соответствующей центру расположения образца; $a_{\text{мертв}}$ – коэффициент, учитывающий «мертвое» время регистрирующей аппаратуры; $a_{\text{сам}}$ – множитель, учитывающий самопоглощение характеристического излучения наведенной активности в образце; $\sigma_i(E)$ – сечение ядерной реакции в зависимости от энергии нейтронов E ; $\Phi(E)$ – спектральная плотность потока нейтронов; t_a – время активации; t_e – время выдержки после облучения; t_u – время измерения; λ – постоянная радиоактивного распада.

Активность A_i и удельная активность $A_i^{\text{уд}}$ i -го радионуклида на момент окончания облучения образца нейтронами рассчитываются как

$$A_i^{\text{уд}} = A_i / m_i = \frac{S_i \lambda_i}{m_i E(t_a, t_e, t_u)} = \frac{g_i N_A p_i}{M_i \lambda_i} a_i J_i \quad (4)$$

Для исключения свертки J_i сечения по спектральной плотности потока нейтронов обычно используют относительный метод, когда одновременно с исследуемым образцом облучается ряд эталонных образцов тех элементов, содержание которых надо определить в образце. Масса искомого элемента m_i тогда связана с массой эталонного образца того же элемента $m_{iЭ}$ соотношением:

$$m_i = m_{iЭ} \frac{A_i}{A_{iЭ}^{\text{уд}}}. \quad (5)$$

Однако в случае многоэлементного анализа проб, состав которых заранее может быть не известен, нами использовался вариант компараторного метода. В этом случае

одновременно с исследуемым образцом облучается образец элемента-компаратора. Согласно (4):

$$A_i^{yd} / A_k^{yd} = \left(\frac{g_i N_A p_i}{M_i \lambda_i} a_i J_i \right) / \left(\frac{g_k N_A p_k}{M_k \lambda_k} a_k J_k \right) = K_{ik} . \quad (6)$$

Набор величин K_{ik} (фактор радионуклида i по отношению к радионуклиду k) получаем, используя базу данных (библиотеку) спектров изотопов различных нуклидов, облученных потоками нейтронов фотонейтроного источника. Тогда соотношение (5) преобразуется к виду:

$$m_i = m_{kk} \frac{A_i}{K_{ik} A_{kk}} , \quad (7)$$

где m_{kk} и A_{kk} – масса и активность компаратора.

Для оценки возможностей установки была рассчитана чувствительность определения содержания различных элементов при облучении тепловыми нейтронами фотонейтронного источника при токе пучка ускорителя ~ 10 мкА, частоте следования – 50 Гц, времени облучения 1 час, времени измерения гамма-спектра 1000 с (не оптимизированные параметры), приведенная в таблице 2.1 и на рис. 2.3.

Таблица 2.1 – Чувствительность определения содержания различных элементов

Элементы	Чувствительность, мкг / г
Au, Dy, Eu, In, Mn, V	< 1
Ar, Ga, I, Ir, Kr, Lu, Re, Sm, U	1 – 10
As, Br, Cl, Co, Cs, Cr, Eu, Ho, La, Na, Nb, Sb, Sc, Sr, Th, W	10 – 100
Al, Ba, Cd, Gd, Ge, Hf, Ib, K, Mg, Nd, Ni, Pr, Pt, Rh, Tb, Te, Tm, Zn	100 – 1000
Ag, Ce, Cr, Hg, Mo, Os, Pd, Ru, Se, Ta, Ti, Zr	> 1000

Чувствительность определения может быть улучшена более чем в 10 раз при оптимизации условий активации и измерений для конкретных изотопов: увеличением плотности потока тепловых нейтронов в рабочей камере источника путем увеличения частоты (с 50 до 100 Гц) и тока пучка (с 10 до 100 мкА), а также увеличением длительности активации (с 1 до 3 – 5 ч).

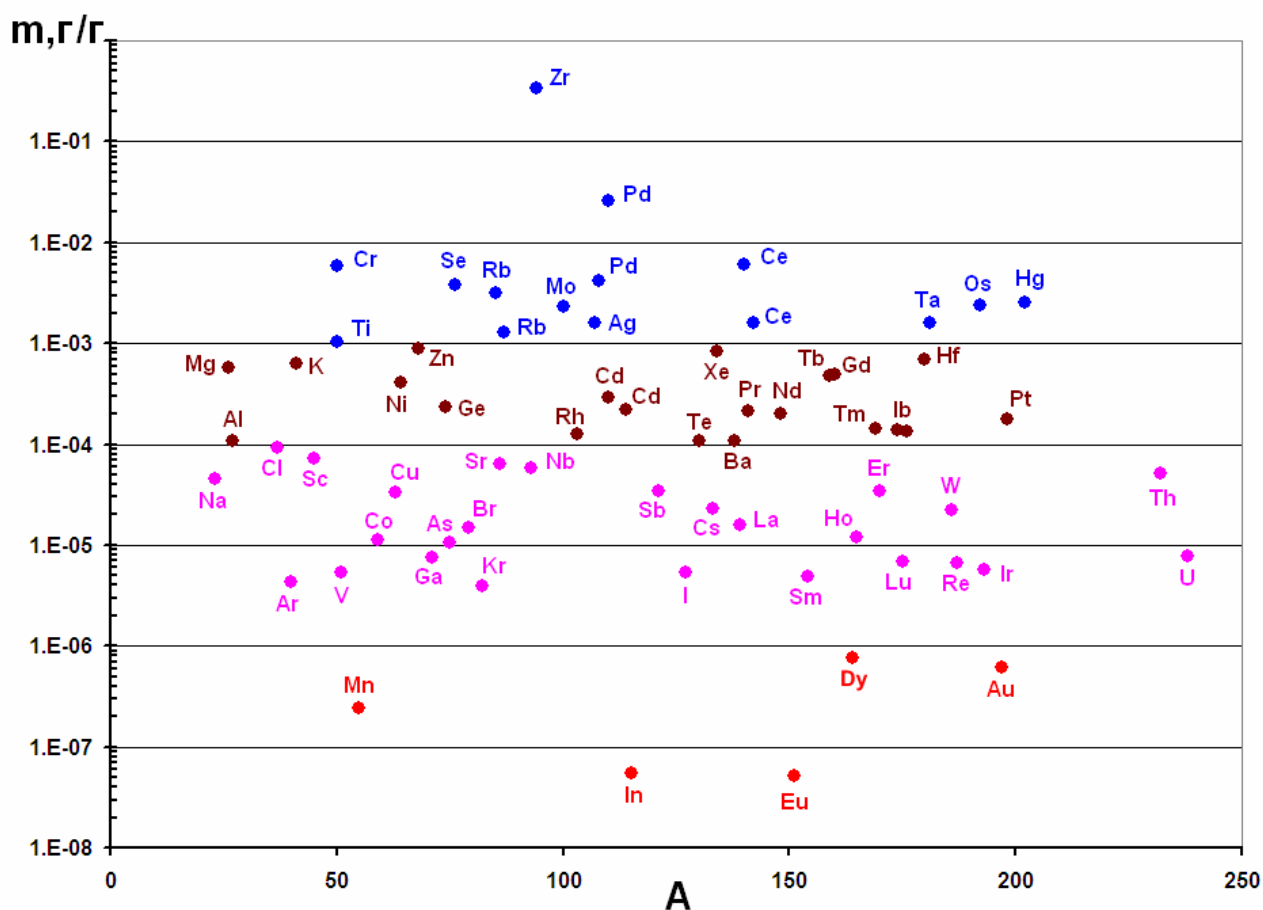


Рисунок 2.3 – Чувствительность определения содержания различных элементов
(m – масса в г/г, A – атомный вес)

2 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью активационно-измерительного комплекса, включающего W-Be-фотонейтронный источник нейтронов и низкофоновый гамма-спектрометр проведены измерения содержания элементов в различных материалах. Отработана методика и проведены измерения ультрамалых содержаний элементов в воздушных аэрозольных фильтрах. Проведены измерения содержания Au, As, Sb, Mn, Fe, W и других элементов в образцах различных материалов. Проведенные оценки пределов определения микропримесей в материалах показали, что для большого числа элементов пределы могут составлять $10^{-3} - 10^{-6}$ г/г.

Результаты проведенных в 2016 году работ доложены на Международных конференциях NUCLEUS 2016 [1-2] и ICPPA - 2016 [3].

2 ПУБЛИКАЦИИ

- 1 А.В.Андреев, Ю.М.Бурмистров, С.В.Зуев, Е.С.Конобеевский, М.В.Мордовской, В.Г.Недорезов Возможности определения микропримесей в материалах на измерительно-активационном комплексе на базе фотонейтронного источника Известия РАН. Сер. Физ. 2017. Т. 81 (в печати)
- 2 Ю.М.Бурмистров, С.В.Зуев, Е.С.Конобеевский, М.Н.Лифанов, М.В.Мордовской, В.Г.Недорезов Исследование радиационно-защитных свойств материалов с использованием метода γ -поглощения в широком диапазоне энергий γ -квантов Известия РАН. Сер. Физ. 2017. Т. 81 (в печати)
- 3 В.Г.Недорезов, Е.С.Конобеевский, С.В.Зуев, А.Л.Полонский, А.А.Туринге Возбуждение изомерных состояний ^{111m}Cd , ^{113m}In , ^{115m}In фотонами с энергией до 8 МэВ Ядерная физика. 2017. Т. 81 (в печати)
- 4 S Potashev, Yu Burmistrov, A Drachev, S Karaevsky, E Konobeevski and S Zuyev Two-dimensional solid state gaseous detector based on ^{10}B layer for thermal and cold neutrons Journal of Physics: Conference Series. 2017 (in print)
- 5 S Potashev, Yu Burmistrov, A Drachev, S Karaevsky, E Konobeevski, S Zuyev Two-dimensional solid state gaseous detector based on ^{10}B layer for thermal and cold neutrons arXiv:1612.06664v1 [physics.ins-det] 20 Dec 2016

Патенты:

- 1 Ляшук В.И., Зуев С.В., Кулешов Д.А., Шейфлер А.А. Стенд для исследования параметров светодиодов. Патент РФ на полезную модель № 163 505, G01R 31/00, 05.11.2015.
- 2 Бурмистров Ю.М., Зуев С.В., Конобеевский Е.С., Лифанов М.Н., Мордовской М.В. Стенд для исследования радиационно-защитных свойств материалов (подана заявка на патент на полезную модель).
- 3 Поташев С.И., Поташев А.С. Программа для автоматического построения систем сбора данных из модулей КАМАК (PAFDASC). Патентная регистрация программы Российской Федерации Заявка: 201,6612936, дата поступления 01 апреля 2016 г. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 31 мая 2016 г.

Доклады на международных конференциях

1. A.V.Andreev, Yu.M.Burmistrov, N.A.Fedorov, E.S.Konobeevsky, M.V.Mordovskoy, V.G.Nedorezov, S.V.Zuyev A possibility of determination micro-impurities in materials using a measuring-activation complex on the base of photoneutron source 66-я Международная конференция по проблемам ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра «ЯДРО-2016», Саров, 11-14 октября 2016 г. Тезисы, с. 142

2. Yu.M.Burmistrov, E.S.Konobeevsky, M.N.Lifanov, M.V.Mordovskoy, V.G.Nedorezov, S.V.Zuyev Study of radiation-protective properties of materials using γ -ray attenuation method in a wide range of γ -energies 66-я Международная конференция по проблемам ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра «ЯДРО-2016», Саров, 11-14 октября 2016 г. Тезисы, с. 174
3. S.I.Potashev, Yu.M.Burmistrov, A.I.Drachev, S.Kh.Karaevsky, E.S.Konobeevski, S.V.Zuyev Two-dimensional hybrid solid state gas detector based on ^{10}B layer for thermal and cold neutrons The 2nd international conference on particle physics and astrophysics. ICPPA – 2016. October 10 – 14. 2016. Moscow

3 Разработка источника медленных нейтронов на базе линейного ускорителя ЛУЭ-8

Научные руководители: Г.В.Солодухов, А.В.Андреев.

ЛАЯ ИЯИ РАН совместно с ЛФЯР и ЛНИ ИЯИ РАН

Отв. исполнители:

Громов А.М.,

Пономарёв В.Н.

Зуев С.В., снс, кфмн

Бурмистров Ю.М., мнс

Конобеевский, Е.С., зав.лаб., кфмн

Мордовской М.В., снс, кфмн

Исполнители

Скоркин В.М., снс, кфмн

Сабинин С.Л.

Тишин В.В.

3 РЕФЕРАТ

ТЕПЛОВЫЕ И БЫСТРЫЕ НЕЙТРОНЫ, ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ, ФОТОНЕЙТРОННЫЙ ИСТОЧНИК, УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ, АКТИВАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС

Цель работы – создание интенсивного W-Be-фотонейтронного источника на основе серийного промышленного электронного ускорителя ЛУЭ-8-5 ИЯИ РАН, вольфрамовой тормозной мишени, фото-нейтронной бериллиевой мишени и замедлителя быстрых нейтронов.

В результате работы создан W-Be-фотонейтронный источник и запущен на пучке электронов линейного ускорителя ЛУЭ-8-5 ИЯИ РАН.

В процессе работы проводились экспериментальные исследования характеристик источника. Экспериментально измерены плотности потока тепловых нейтронов в измерительной полости источника и в выводном канале источника, которые составляют, соответственно, $\sim 10^7 - 10^8$ нейтрон/см²с и $\sim 10^4 - 10^5$ нейтрон/см²с при среднем токе электронов 30–40 мкА.

В результате исследований впервые создана новая ядерно-физическая установка – активационно-измерительный комплекс на базе W-Be фотонейтронного источника и низкофоновом гамма-спектрометре для проведения работ по нейтронно-активационному анализу с улучшенными метрологическими характеристиками, исследованию конденсированных сред, радиационному материаловедению и другим физическим задачам с использованием тепловых и быстрых нейтронов.

Для регистрации нейтронов вне источника для мониторинга и других физических задач ведутся работы по созданию детекторов тепловых и быстрых нейтронов. Создан двухкоординатный твердотельно-газовый детектор тепловых нейтронов и прототип детектора быстрых нейтронов с энергиями $\sim 1 - 10$ МэВ с возможностью определения направления вылета нейтрона.

3 ВВЕДЕНИЕ

Сокращение парка больших и дорогостоящих ядерно-физических установок, таких как ядерные реакторы и нейтронные генераторы, диктует необходимость создания новых, современных, универсальных, компактных, мобильных и, в то же время, достаточно экономичных ядерно-физических установок для широкого круга современных задач.

В связи с этим в качестве более экономичной замены, представляет интерес создание фотонейтронных источников на базе промышленных низкоэнергетических линейных ускорителей электронов на энергии 6 - 10 МэВ.

Такие источники могут обеспечить поток тепловых нейтронов порядка $10^8 - 10^9$ нейтрон/см²·с, что сравнимо с параметрами реакторных источников нейтронов, нейтронных генераторов и микротронов при достаточно низком гамма-фоне и удовлетворительных размерах поля облучения.

3 ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В ИЯИ РАН создан активационно-измерительного комплекс, включающий W-Be-фотонейтронный источник нейтронов на базе линейного ускорителя электронов и низкофоновый гамма-спектрометр.

В качестве источника электронов использован серийный промышленный низкоэнергетический ускоритель электронов ЛУЭ-8-5 Института ядерных исследований РАН. Фотонейтронный источник показан на рис. 2.1.

Для оптимального использования источника были проведены работы по модернизации линейного ускорителя электронов: установлен дополнительный удлинитель вакуумпровода, проведена юстировка пучка, установлено дополнительное охлаждение вольфрамовой мишени. В результате модернизации ускорителя ток пучка электронов увеличен с 10 до 40 – 60 мкА. Также увеличена продолжительность непрерывной работы ускорителя.

Оригинальная конструкция источника позволяет проводить как облучение образцов во внутренней камере источника, так и работу с выведенными пучками нейтронов (быстрых – 0.5-5 МэВ, тепловых, или промежуточных). Плотность потока тепловых нейтронов в измерительной полости источника и в выводном канале источника составляет,

соответственно, $\sim 10^7 - 10^8$ нейтрон/см²с и $\sim 10^4 - 10^5$ нейтрон/см²с при среднем токе электронов 30–40 мкА.

Для регистрации нейтронов вне источника для мониторинга и других физических задач ведутся работы по созданию детекторов тепловых и быстрых нейтронов.

Создан двухкоординатный твердотельно-газовый детектор тепловых нейтронов на основе 3-мкм чувствительного слоя ¹⁰B и газовой камеры с площадью 128 x 128 мм². Детектор испытывался при работе фотонейтронного источника при плотности потока тепловых нейтронов внутри источника $\sim 10^7$ с⁻¹. Для определения координат использовался метод деления заряда. Эффективность детектора составляет 4-8%. Соотношение между эффективностью регистрации фоновых событий и эффективностью регистрации нейтронов не превышает 10^{-5} . Амплитудное разрешение составляет $\sim 15\%$ и пространственное разрешение – ~ 2.5 мм при напряжении 700В для координаты X с газовой смесью Ar + 25%CO₂ + 0.3% CF₃Br при нормальных условиях.

Проводятся также исследования прототипа детектора быстрых нейтронов с энергиями $\sim 1 - 10$ МэВ с возможностью определения направления вылета нейтрона. Детектор состоит из трех сцинтилляторов (жидкостного, аналога NE-213, и двух литиевых стекол, обогащенных ⁶Li), замедлителя из пластика и двух фотоэлектронных умножителей ФЭУ. Быстрые нейтроны регистрируются в жидкостном сцинтилляторе (с предусмотренной возможностью n-гамма разделения), замедляются до тепловых энергий в жидкостном сцинтилляторе и замедлителе и регистрируются в литиевых стеклах. Регистрация двумя ФЭУ позволяет значительно подавлять шумовые и фоновые события в детекторе.

Начаты работы по нейтронно-активационному анализу с использованием нейтронов фотонейтронного источника в составе активационно-измерительного комплекса.

3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан W-Be-фотонейтронный источник и запущен на пучке электронов линейного ускорителя ЛУЭ-8-5 ИЯИ РАН. Оригинальная конструкция источника позволяет проводить как облучение образцов во внутренней камере источника, так и работу с выведенными пучками нейтронов (быстрых – 0.5-5 МэВ, тепловых, или промежуточных). Экспериментально измерены плотности потока тепловых нейтронов в измерительной полости источника и в выводном канале источника, которые составляют, соответственно, $\sim 10^7 - 10^8$ нейтрон/см²с и $\sim 10^4 - 10^5$ нейтрон/см²с при среднем токе электронов 30–40 мкА. Начаты работы по нейтронно-активационному анализу с использованием нейтронов фотонейтронного источника в составе активационно-измерительного комплекса. Для регистрации нейтронов вне источника для мониторинга и других физических задач

ведутся работы по созданию детекторов тепловых и быстрых нейтронов. Создан двухкоординатный твердоотно-газовый детектор тепловых нейтронов и прототип детектора быстрых нейтронов с энергиями $\sim 1 - 10$ МэВ с возможностью определения направления вылета нейтрона.

Фотонейтронный источник нейтронов включен в состав Уникальной научной установки ИЯИ РАН «Радиационный комплекс на базе линейного ускорителя электронов ЛУЭ-8-5 ИЯИ».

Результаты работы доложены на Международных конференциях NUCLEUS 2016 [1-2] и ICPPA - 2016 [3] и др.

3 ПУБЛИКАЦИИ

1 А.В.Андреев, Ю.М.Бурмистров, С.В.Зуев, Е.С.Конобеевский, М.В.Мордовской, В.Г.Недорезов Возможности определения микропримесей в материалах на измерительно-активационном комплексе на базе фотонейтронного источника Известия РАН. Сер. Физ. 2017. Т. 81 (в печати)

2 S Potashev, Yu Burmistrov, A Drachev, S Karaevsky, E Konobeevski and S Zuyev Two-dimensional solid state gaseous detector based on ^{10}B layer for thermal and cold neutrons Journal of Physics: Conference Series. 2017 (in print)

3 S Potashev, Yu Burmistrov, A Drachev, S Karaevsky, E Konobeevski, S Zuyev Two-dimensional solid state gaseous detector based on ^{10}B layer for thermal and cold neutrons arXiv:1612.06664 [physics.ins-det] 20 Dec 2016

4 Andreev A.V., Mordovskoy M.V., Skorkin V.M Method for Detection of Solar Cosmic Rays by Detecting Neutrons. Physics of Atomic Nuclei. 2016. Vol. 79. No. 9. P. 1

5 Skorkin V.M., Belyanski K.L., Skorkin A.V. Monitoring System of Radiation Exposure Proton Linac. Physics of Atomic Nuclei. 2016. Vol. 79. No. 9. P. 5

Патенты:

1 Ляшук В.И., Зуев С.В., Кулешов Д.А., Шейфлер А.А. Стенд для исследования параметров светодиодов. Патент РФ на полезную модель № 163 505, G01R 31/00, 05.11.2015.

2 Бурмистров Ю.М., Зуев С.В., Конобеевский Е.С., Лифанов М.Н., Мордовской М.В. Стенд для исследования радиационно-защитных свойств материалов (подана заявка на патент на полезную модель).

3 Андреев А.В., Бурмистров Ю.М., Зуев С.В., Конобеевский Е.С., Латышева Л.Н., Мордовской М.В., Пономарев В.Н., Соболевский Н.М., Солодухов Г.В. Фотонейтронный источник (подана заявка на патент на изобретение).

4 Поташев С.И., Поташев А.С. Программа для автоматического построения систем сбора данных из модулей КАМАК (PAFDASC). Патентная регистрация программы Российской Федерации Заявка: 201,6612936, дата поступления 01 апреля 2016 г. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 31 мая 2016 г.

Доклады на конференциях:

1 A.V.Andreev, Yu.M.Burmistrov, N.A.Fedorov, E.S.Konobeevsky, M.V.Mordovskoy, V.G.Nedorezov, S.V.Zuyev A possibility of determination micro-impurities in materials using a measuring-activation complex on the base of photoneutron source 66-я Международная конференция по проблемам ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра «ЯДРО-2016», Саров, 11-14 октября 2016 г. Тезисы докладов, с. 142

2 Yu.M.Burmistrov, E.S.Konobeevsky, M.N.Lifanov, M.V.Mordovskoy, V.G.Nedorezov, S.V.Zuyev Study of radiation-protective properties of materials using γ -ray attenuation method in a wide range of γ -energies 66-я Международная конференция по проблемам ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра «ЯДРО-2016», Саров, 11-14 октября 2016 г. Тезисы докладов, с. 174

3 S.I.Potashev, Yu.M.Burmistrov, A.I.Drachev, S.Kh.Karaevsky, E.S.Konobeevski, S.V.Zuyev Two-dimentional hybrid solid state gas detector based on ^{10}B layer for thermal and cold neutrons The 2nd international conference on particle physics and astrophysics. ICPPA – 2016. October 10 – 14. 2016. Moscow

4 С.И.Поташев, Ю.М.Бурмистров, А.И.Драчев, С.Х.Караевский, Г.В.Солодухов Двухкоординатный гибридный детектор медленных нейтронов на основе твердого бора-10 и газовой камеры размерами $128 \times 128 \text{ мм}^2$ IV совещание по малоугловому рассеянию нейтронов "МУРомец 2016" 28-30 сентября 2016 Гатчина

5 С.Х.Караевский, С.И.Поташев, Ю.М.Бурмистров, А.И.Драчев Двухкоординатные газовые детекторы тепловых и холодных нейтронов размерами $120 \times 120 \text{ мм}^2$ и $380 \times 380 \text{ мм}^2$ с активным слоем из твердого бора-10 Сборник материалов Научно-практической конференции «Научное приборостроение—современное состояние и перспективы развития». Москва, «Богородский печатник», 2016 г. С. 151

6 Скоркин В.М. Сетевая система радиационного мониторинга окружающей среды Сборник материалов Научно-практической конференции «Научное приборостроение—современное состояние и перспективы развития». Москва, «Богородский печатник», 2016 г. С. 233

7 В.М.Скоркин Исследования жидкокристаллической структуры ДНК-Gd на нейтронном генераторе Международная сессия-конференция Секции ЯФ ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий». 12-15 апреля 2016 г., г. Дубна

8 В.В.Мицук, М.В.Мордовской Детектор малоинтенсивных пучков быстрых нейтронов. 59-я Всероссийская научная конференция МФТИ с международным участием 21–26 ноября 2016 года, Школа-семинар «Фундаментальные взаимодействия и космология», МФТИ (ГУ)

9 В.В.Мицук, М.В.Мордовской Детектор быстрых нейтронов с малым уровнем помех Молодежная конференция по теоретической и экспериментальной физике 29 ноября - 01 декабря 2016 года. ФГБУ “ГНЦ РФ Институт Теоретической и Экспериментальной Физики” НИЦ “Курчатовский Институт”

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В отчёте представлены результаты фундаментальных и прикладных работ, проведённых по государственному заданию в соответствии с планом научных исследований ИЯИ РАН на 2016 год. Из полученных результатов можно выделить следующие важнейшие результаты работ:

Проведено расчётно-теоретическое обоснование конфигураций нейтронных мишеней spallation-типа, поиску оптимальной конфигурации мишени с высоким выходом нейтронов на основе нептуния ^{237}Np .

Проведен расчётный сравнительный анализ источников нейтронов ИН-06 и РАДЭКС по спектрам и потокам замедленных нейтронов, на поверхности замедлителей и в 10 м от поверхности замедлителей.

Освоены четыре вычислительных программы, позволяющие детально рассчитывать накопление радиоактивных элементов в материалах мишени и в ADS. На их основе проведена оценка времени предельного накопления плутония ^{238}Pu в материале мишени на основе нептуния ^{237}Np и времени вывода мишени из эксплуатации.

Выполнено теоретическое описание и компьютерное моделирование адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействий в широком диапазоне энергий с целью предсказания свойств ядерной материи в экстремальных условиях.

Продолжалась разработка и совершенствование программного обеспечения для моделирования взаимодействия частиц и ядер различного спектрального состава со сложными макроскопическими мишенями; опубликованы результаты применения транспортного кода SHIELD, а также других доступных кодов, для расчётно-теоретических исследований в актуальных для Института областях, в том числе, моделирование нейтронного фона космогенного происхождения в подземных экспериментальных залах, в зависимости от состава материалов экспериментальных установок и окружающего грунта, а также расчеты взаимодействия космического излучения с метеоритами, поверхностью Луны, космическими аппаратами и эффекты космогенного происхождения на поверхности земли.

Исследованы потери протонного пучка на входе в рабочее тело (свинец) спектрометра СВЗ-100.

Выполнен цикл работ по физике гиперядер. Статистическая модель мультифрагментации ядер, модели Ферми-распада, испарения и деления распространены на гиперядра.

В эксперименте на дифрактометре ID18 на синхротроне ESRF, Гренобль, Франция проведено измерение плотности фононных состояний натурального монокристалла алмаза и двух монокристаллов, облучённых быстрыми нейтронами, показано существенная перестройка фононного спектра алмаза после облучения эпитепловыми нейтронами.

В эксперименте на спектрометре эпитепловых нейтронов VESUVIO, на импульсном источнике нейтронов ISIS, Великобритания показано существенное уширение резонансных пиков спектров неупругого нейтронного рассеяния с повышением температуры. Получены численные характеристики: кинетическая энергия для каждого химического элемента системы, среднеквадратичное смещение атомов, факторы Дебая-Валлера.

С помощью дифракции нейтронов в сотрудничестве с Курчатовским институтом проведены исследования кристаллической и магнитной структуры шпинелей.

Совместно с ИФВД проведён поиск предполагаемых структур кристаллических углеводородов. Были рассмотрены возможные варианты кристаллической структуры и предложены возможные подходы их синтеза.

Исследована кристаллическая структура α -тетрагонального бора; существование орторомбической фазы бора было предсказано теоретически, но впервые обнаружено экспериментально.

Изучено влияния давления на режим туннелирования и колебательные спектры водорода в α - $\text{MnH}_{0.07}$ методом неупругого рассеяния нейтронов.

Исследованы магнитные характеристики синтезированного однодоменного моноклинного пирротина, что имеет важное значение в области палеомагнетизма метеоритов.

Проведено исследование структуры Каптона – одного из наиболее радиационноустойчивых полимеров; обнаружено возникновение дальнего порядка с характерными расстояниями 50–100 Å.

Проведены измерения NFS-спектров от ядер Sn-119 в диапазоне давлений 0-150 ГПа, температур 4.8 - 300 К и магнитных полей 0 - 1.5 Т в сероводороде. Показано, что в ZFC режиме охлаждения-нагрева магнитное поле на ядрах Sn-119 эффективно экранируется сероводородом вплоть до температуры ~ 145 К при давлении $P \sim 150$ ГПа, что указывает на сверхпроводящее состояние II-го рода в сероводороде.

Исследован монокристалл BiTeCl при давлениях до 50 ГПа. Приложение давления, впервые индуцировало, теоретически предсказанное ранее, изолирующее состояние, а затем сверхпроводящую фазу с нормальным состоянием в форме диэлектрика. При сильном сжатии происходит переход в другую сверхпроводящую фазу, у которой нормальное состояние является металлическим.

Исследован купрат $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$, являющийся идеальной модельной системой для изучения механизма сверхпроводимости, при приложении давления. Наблюдалось усиление двухмагнетонной моды, что, вероятно, связано с ростом T_c . Получено прямое и убедительное доказательство роли магнитных колебаний для спаривания носителей в купратных сверхпроводниках.

Исследованы свойства нового мультиферроика из семейства лангаситов новым методом синхротронной мессбауэровской спектроскопии. При давлениях выше 20 ГПа наблюдается сильное повышение температуры Нееля T_N , связанное со структурным переходом. Обнаружено разделение образца на два магнитных состояния с различными значениями T_N от ~ 50 и 130 К, что можно объяснить сильным двухмерным магнитным упорядочением в плоскости и трёхмерным упорядочением, обусловленным взаимодействием между соседними плоскостями.

Исследованы структурные свойства лангасита при высоких гидростатических давлениях до 60 ГПа, создаваемых в камерах с алмазными наковальнями. Обнаружены три структурных фазовых перехода при $P \sim 3$ и при ~ 20 ГПа и ~ 40 ГПа. При втором переходе объём ячейки падает скачком на 7 %, что объясняет колоссальное увеличение точки Нееля в этом кристалле при давлениях выше 20 ГПа.

Разработан новый способ детектирования сверхпроводимости в образцах микронного размера при высоких давлениях методом мессбауэровской спектроскопии на изотопе Sn-119".

Обнаружено соединение на основе европия, демонстрирующее необычное сочетание дальнего магнитного порядка и сильных спиновых и зарядовых флуктуаций.

Проведено исследование аномалий динамики решетки в высших бориды редкоземельных элементов. Законы дисперсии, измеренные нейтронными методами, удалось описать при помощи разработанной модели суператома.

Методами малоуглового рентгеновского рассеяния и рентгеновской дифракции исследованы образцы полимерных композиционных материалов — диэлектриков с высокой теплопроводностью на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена и наночастиц алюминия с оксидным покрытием.

В рамках классической теории фазовых переходов первого рода продолжена разработка теории зарождения новой фазы при наличии макроскопических градиентов химических потенциалов веществ в исходной фазе.

Методом молекулярной динамики исследована диффузия гелия в вольфраме. Показано, что термическая диффузия следует закону Аррениуса только при достаточно

низких температурах (< 500 K). При температурах выше 700 K происходит существенное отклонение от данного закона. Теоретически возможные физические причины данного поведения были также подтверждены соответствующим компьютерным моделированием.

В рамках исследований нейтрон - ядерных взаимодействий с помощью дифракции нейтронов на монокристаллах была сделана топография всех имеющихся в наличии монокристаллов KBr.

С целью создания и использования новых методов обработки данных при дифракции нейтронов на регулярных структурах, был предложен метод измерения когерентной амплитуды при дифракции нейтронов.

Создана и подготовлена к эксплуатации многопроволочная пропорциональная камера регистрации осколков деления и α - частиц. Подготовлена к экспериментальным измерениям система регистрации и обработки данных.

На втором канале установки ИРЭН создан прототип установки по исследованию Т-неинвариантной и Р - чётной амплитуды (n, γ) – реакции в низко лежащих резонансах ^{232}Th .

Развит метод нейтронной радиографии на белом пучке с использованием нейтронно-чувствительных пластин типа IP Fuji. Пластины типа Image Plate чувствительны только к гамма, но благодаря покрытию из оксида гадолиния становится возможно регистрировать нейтронное излучение. Пластины обладают эффектом памяти, и для очистки изображение с них необходимо использовать яркие люминесцентные лампы. Благодаря высокой разрешающей способности считывателя (50 мкм) они идеально подходят для радиографических исследований. Были получены радиографические изображения камер высокого давления с дефектами и без.

Создан W-Be-фотонейтронный источник и запущен на пучке электронов линейного ускорителя ЛУЭ-8-5 ИЯИ РАН. Оригинальная конструкция источника позволяет проводить как облучение образцов во внутренней камере источника, так и работу с выведенными пучками нейтронов (быстрых – 0.5-5 МэВ, тепловых, или промежуточных). Экспериментально измерены плотности потока тепловых нейтронов в измерительной полости источника и в выводном канале источника, которые составляют, соответственно, $\sim 10^7 - 10^8$ нейтрон/см²с и $\sim 10^4 - 10^5$ нейтрон/см²с при среднем токе электронов 30–40 мкА. Создан двухкоординатный твердоотно-газовый детектор тепловых нейтронов и прототип детектора быстрых нейтронов с энергиями $\sim 1 - 10$ МэВ с возможностью определения направления вылета нейтрона.

С помощью активационно-измерительного комплекса, включающего W-Be-фотонейтронный источник нейтронов и низкофоновый гамма-спектрометр, проведены измерения содержания элементов в различных материалах. Отработана методика и

проведены измерения ультрамалых содержаний элементов в воздушных аэрозольных фильтрах. Показано, что для большого числа элементов пределы определения микропримесей могут составлять $10^{-3} - 10^{-6}$ г/г.

Полученные результаты находятся на уровне лучших мировых или превышают их и представляют собой существенное продвижение в фундаментальных исследованиях природных явлений.