Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук

#### «УТВЕРЖДАЮ»

Академик-секретарь Отделения физических наук РАН академик И.А.Щербаков « » \_\_\_\_\_ 2014 года

УДК 539.1

#### ОТЧЁТ

о научно-исследовательской работе по направлению «Фундаментальная и прикладная ядерная физика» за 2013 год

Номер государственной регистрации темы: 01201050397

Директор ИЯИ РАН академик

В.А.Матвеев

Москва 2014

Научные руководители:

заместитель директора ИЯИ РАН по научной работе д.т.н. Кравчук Л.В.

заместитель директора ИЯИ РАН по научной работе д.ф.-м.н. Коптелов Э.А.

#### Список исполнителей

Отдел ускорительного комплекса (заведующий отделом д.ф.-м.н. А.В.Фещенко)

Лаборатория медицинской физики (заведующий лабораторией д.ф.-м.н. С.В.Акулиничев)

Радиоизотопный комплекс (заведующий лабораторией д.х.н. Б.Л.Жуйков)

Лаборатория исследования редких процессов Отдела экспериментальной физики (заведующий лабораторией к.ф.-м.н. Н.А.Титов)

Лаборатория атомного ядра (заведующий лабораторией к.ф.-м.н. Е.С.Конобеевский) Лаборатория нейтронных исследований (и.о. заведующего лабораторией д.ф.-м.н. Э.А.Коптелов)

#### Реферат

Отчет содержит: 120 с., 36 рис., 1 таблицу, 4 источника, 171 ссылку на публикации.

ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ, ФОРМИРОВАНИЕ ПУЧКА, РАДИОИЗОТОПНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, МАССА НЕЙТРИНО, БЕТА РАСПАД, КОНВЕРСИОННАЯ ЛИНИЯ КРИПТОНА, ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК, НАРУШЕНИЕ ЛЕПТОННЫХ ЧИСЕЛ, ЯДРО-ЯДЕРНЫЕ СТОЛКНОВЕНИЯ, РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА, КВАРК ГЛЮОННАЯ ПЛАЗМА, ТОНКИЕ УГЛЕРОДНЫЕ ПЛЁНКИ, ОГРАНИЧИТЕЛИ ТОКА, ФОНОННЫЕ РЕЗОНАТОРЫ, NN И PP КОРРЕЛЯЦИИ, ДЛИНА РАССЕЯНИЯ, КВАЗИСВОБОДНОЕ РАССЕЯНИЕ, СПЕКТРОМЕТРИЯ НУКЛОНОВ, ЛЁГКИЕ ГАЛО ЯДРА, КЛАСТЕРНАЯ СТРУКТУРА, КВАЗИСВОБОДНОЕ РАССЕЯНИЕ, ЯДЕРНЫЕ ФОТОЭМУЛЬСИИ, ГАММА СПЕКТРОМЕТР, НИЗКОФОНОВАЯ KAMEPA, ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ, АКТИВНАЯ И ПАССИВНАЯ ЗАЩИТА, РАДИАЦИЯ, АВАРИЯ, ОБЛУЧЕНИЕ, ТЯЖЕСТЬ ПОСЛЕДСТВИЙ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ, ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ФАКТОР, ДОЗИМЕТРИЯ, ДОЗИМЕТР, РАДИОМЕТР, ИМИТАТОР-ТРЕНАЖЁР

Представлены результаты работы Отдела ускорительного комплекса за 2013 год по теме Линейный ускоритель Московской мезонной фабрики. Основная деятельность Отдела была направлена на обеспечение работы и модернизацию линейного ускорителя Московской мезонной фабрики, а также на разработку и создание новых узлов и элементов ускорителей. В течение года проведено 4 сеанса, направленных на выполнение физической программы, разработку технологии получения радиоизотопов и наработку изотопов, на исследования формирования пучка на экспериментальном комплексе, а также на исследования и модернизацию ускорителя. Наработка ускорителя по программе получения радиоизотопов составила свыше 66000 мкА часов при среднем токе пучка до 120 мкА и энергии 143 МэВ. На участке промежуточного вывода реализован режим распределения пучка между изотопным и экспериментальным комплексами с помощью системы импульсного разделения пучка. Решена задача удвоения частоты работы инжектора протонов и системы ВЧ питания начальной части ускорителя, достигнута стабильная работа инжектора на частоте 100 Гц с длительностью импульсов до 200 мкс. С целью увеличения интенсивности пучка на изотопном комплексе создана система быстрой развертки пучка на мишени, включающая быстрый дефлектор, систему питания и систему управления. Выполнены работы для ряда российских и зарубежных ускорительных центров, в том числе, созданы два измерителя формы сгустков для линейного ускорителя Лос-Аламосского центра LANSCE, измеритель формы сгустков для

японского ускорительного исследовательского комплекса J-PARC, измеритель продольного распределения заряда в сгустках для ускорителя Linac-4 ЦЕРН и др.

Была обеспечена проводка пучков в зале экспериментального комплекса с заданными параметрами для проведения экспериментов в зале и на комплексе лучевой терапии.

По теме «Радиотерапия» разработан новый программный код Монте-Карло 'TRACK' для расчёта протонных дозовых распределений в тканях и прохождения протонов через магнитную оптику канала транспортировки пучка. Продолжено развитие технологии и методов лучевой терапии на конвенциальных установках ИЯИ РАН (ускоритель электронов СЛ-75).

Исследованы режимы облучения рубидиевых мишеней для отправки Лос-Аламосскую национальную лабораторию. На основе проведенных исследований в рамках научноисследовательской программы внедрена новая технология получения стронция-82 на ускорителе ИЯИ РАН при пониженной энергии протонов 100 МэВ и со сканированием пучка. Технология включает также выделение стронция-82 из облученных металлических мишеней в ГНЦ РФ-ФЭИ (Обнинск), а также в научно-медицинском центре ARRONAX (Франция), на основе изобретений ИЯИ РАН.

Исследованы различные характеристики генератора рубидия-82, изготовляемого на основе стронция-82 в РНЦ РХТ (С-Петербург) и ARRONAX GIP (Франция) с целью ПЭТдиагностики кардиологических и онкологических заболеваний в России и Европе.

Проведены работы ИЯИ РАН совместно с МГУ им. М.В. Ломоносова и НИФХИ им. Л.Я Карпова по получению актиния-225 и радия-223. Выполнен цикл исследований по радиохимическому выделению этих радионуклидов из ториевых мишеней, облученных на ускорителе ИЯИ РАН протонами средних энергий, что открывает путь разработки высокопроизводительной технологии получению этих радионуклидов и их массовому использованию для терапии онкологических заболеваний.

В проблеме поиска массы покоя электронного антинейтрино в бета-распаде трития исследования направлены на решение фундаментальной проблемы измерения массы нейтрино. Цель работы - поиск массы нейтрино в бета распаде. Метод исследования – измерение бета спектра в широком диапазоне вдали от конца спектра. В 2013 году работы велись в двух направлениях. Первое направление связано с программой полной модернизации системы электроснабжения всей установки. В течение более чем полугода проведёт демонтаж старого оборудования, прокладка новых силовых кабелей и замена электрощитов. Вторая задача была связана с оценкой возможности работы спектрометра и регистрирующей аппаратуры при измерениях в условиях больших загрузок вдали от максимальной энергии бета-спектра. Это является исследовательской работой для изучения принципиальных

возможностей поиска сигналов тяжёлых стерильных нейтрино в бета распаде ядер. Проводилась глубокая модернизация высоковольтной системы спектрометра. Был проведён методический сеанс. Полученные результаты обрабатываются. Проведена обширная теоретическая работа по оценке влияния различных систематических эффектов на измеряемый спектр электронов. Показана адекватность модернизированной установки для задачи измерения спектра электронов в интервале энергий 12-19 кэВ.

В задаче Исследование переходов нейтрон-антинейтрон целью работы является разработка принципиально новой модели переходов нейтрон-антинейтрон в поглощающей среде и её обобщение на случай ab-переходов. В рамках указанной модели получить ограничение на период осцилляций нейтрон-антинейтрон в вакууме.

Исследования релятивистских ядро-ядерных столкновений на установке PHENIX направлены на решение проблемы создания и изучение свойств плотной и горячей ядерной материи в релятивистских ядро-ядерных столкновениях. Поставленная задача связана с исследованием КХД вещества при экстремальной температуре и плотности, которая затрагивает многие фундаментальные проблемы физики, такие как: природа конфайнмента и восстановление киральной симметрии, космология ранней вселенной, астрофизика компактных объектов. Работа выполняется в рамках соглашения о сотрудничестве ИЯИ РАН с Брукхэвенской национальной лабораторией, США. Эксперимент PHENIX продолжается уже 13 лет. Основная цель группы из ИЯИ РАН заключается в поддержании работоспособности дрейфовых камер центрального плеча установки, а так же в работе над статьями, готовящимися к печати.

В рамках нового подхода, использующего ядерную спектральную функцию, современные экспериментальные данные о сечениях соответствующих элементарных процессов, исследована в инклюзивных протон- и фотон-ядерных реакциях модификация свойств (масс, ширин распадов) eta/prime-мезонов и антикаонов в ядерной среде уже при обычной ядерной плотности. Получены предсказания для А- и импульсной зависимостей абсолютных и относительных сечений рождения этих частиц в данных реакциях, часть из которых сравнена с имеющимися экспериментальными данными. В частности, из этого сравнения извлечена величина сдвигов масс этих мезонов в ядерной материи и сечение eta/prime-мезон-нуклонного взаимодействия.

Продолжались исследования аномального электромагнетизма в углеродных конденсатах и разработка технологии, получение опытных образцов и исследование особенностей электродинамики нанокристаллических композитов фононных резонаторов (НФР).

Сильные расхождения между теорией и экспериментом, обнаруженные в nd и pd взаимодействии, указывают на необходимость продолжения исследования механизмов различных процессов в малонуклонных системах. Для исследования nn и pp корреляций в трехнуклонных ядрах 3He и 3H разработана программа экспериментов по исследованию реакций d + 3H  $\rightarrow$  3He + (nn) и 3He + 2H  $\rightarrow$  3H + (pp). Проведено кинематическое моделирование реакций подхвата нуклона из ядер 3He и 3H, позволившее определить параметры детектирующей установки. Создана установка и система сбора информации установка для детектирования в совпадении нескольких заряженных и нейтральных частиц и определения их энергетических и временных параметров. Центральным элементом аппаратуры сбора информации выбран блок САЕN DT5742 (5720) на основе цифрового сигнального процессора. На пучке дейтронов НИИЯФ МГУ проведены тестовые измерения в реакции d + 2H  $\rightarrow$  2He + (nn), подтвердившие методическую возможность проведения планируемых экспериментов.

Работа направлена на решение фундаментальной проблемы – исследование структуры лёгких гало-ядер. Исследование экзотических ядер с одним, двумя и более нуклонами в приповерхностной области (так называемом гало) может дать информацию о возможности существования нуклонных кластеров в слабосвязанных системах кор-гало. Подготовлен проект эксперимента по исследованию структуры гало-ядер 6Не и 8Не в реакции квазисвободного рассеяния протона в обратной кинематике фотоэмульсионным методом. Проведено моделирование эксперимента с использованием созданной программы расчёта кинематических переменных.

В отчётном году проводились работы по разработке методов и аппаратуры низкофоновых измерений гамма-излучений с использованием германиевых гаммаспектрометров. Создана низкофоновая камера с «пассивной» и «активной» защитой. Для проведения работ по нейтронно-активационному анализу разработан и изготовлен макет фотонейтронного W-Be источника тепловых нейтронов для использования с ускорителем электронов ЛУЭ-8-5 и камерой для низкофоновых измерений. Проведена оценка возможности использования камеры с текущими параметрами для определения содержания U и Th в некоторых материалах.

В результате ранее проведенных работ по созданию, испытаниям и внедрению в практику средств индивидуальной радиационной защиты был накоплен опыт, дающий основание предполагать, что имеет место разрыв между формальными определениями дозовых характеристик и норм радиационной безопасности, с одной стороны, и реальными возможностями дозиметрического контроля с другой. Это определяется спецификой трудовой деятельности в экстремальных условиях, разнообразием радиационных поражающих

факторов при авариях и несоответствием существующей инструментальной базы требованиям дозиметрического и радиационного контроля в аварийных ситуациях. Отчёт содержит результаты анализа некоторых проблем радиационной безопасности и дозиметрии при ядерных и радиационных авариях и рекомендации по их решению.

Лаборатория нейтронных исследований в 2013 году продолжала работы по тематическому направлению «Нейтронная физика, технология интенсивных источников нейтронов, исследование конденсированных сред, радиационное материаловедение».

## Содержание

	Стр.
Реферат	3
Введение	11
Основные результаты	25
1 Линейный ускоритель Московской мезонной фабрики	25
1.1 Проведение пучковых сеансов, направленных на разработку технологии	
получения и на получение радиоизотопов, на установки СВЗ, РАДЭКС, ИН-06,	25
комплекс протонной терапии.	
1.2 Модернизация систем ускорителя. Разработка и создание элементов	25
ускорителей.	25
2 Экспериментальный комплекс Московской мезонной фабрики	30
3 Радиотерапия	31
4 Радиоизотопные исследования	33
4.1 Изучение процесса по прямому извлечению стронция-82 методом сорбции из	22
жидкого рубидия из реальных мишеней, облучённых в ИЯИ РАН	33
4.1.1 Повышение скорости наработки стронция-82	33
4.1.2 Развитие метода наработки стронция-82 на ускорителе ИЯИ РАН	35
4.1.3 Внедрение технологии получения стронция-82 на новом комплексе	25
ARRONAX (Франция)	55
4.1.4 Усовершенствование конструкции и методики изготовления медицинского	20
генератора стронций/рубидий-82 для позитронно-эмиссионной томографии	39
4.1.4.1 Проведение клинических испытаний с использованием высокоактивного	20
Sr/Rb-82 генератора	39
4.1.4.2 Изучение различных режимов эксплуатации Sr/Rb-82 генератора	40
4.1.4.3 Изготовление Sr/Rb-82 генератора компанией LEMER PAX (Франция) на	42
основе генератора ИЯИ РАН	42
4.2 Разработка новой технологии получения актиния-225 и радия-223 для терапии	11
онкологических заболеваний	44
4.2.1 Совершенствование стадий выделения актиния-225	44
4.2.1.1 Отделение тория методом жидкостной экстракции	44
4.2.1.2 Предварительное концентрирование и очистка с использованием сорбента	15
DGA	43
4.2.1.3 Предварительное концентрирование и очистка с использованием сорбента	16
Ln Resin	40
4.2.1.4 Хроматографическое разделение актиния и легких РЗЭ на TRU Resin	48
4.2.2 Применение предложенной методики к переработке реальной ториевой	40
мишени	49

4.2.3 Разработка генераторов 225Ac→221Fr→213Bi и 223Ra→219Rn→211Pb	50
5 Светосильная спектрометрия электронов, ядерные реакции при низких и	52
средних энергия и перспективные разработки	55
5.1 Проблема поиска массы покоя электронного антинейтрино в бета-распаде	52
трития	55
5.1.1 Проведение методических измерений	53
5.1.2 Оценка верхнего предела на возможную примесь стерильных нейтрино в	52
спектре бета-электронов	55
5.1.3. Исследование систематики формирования электрического потенциала в	51
объёме газового источника.	34
5.1.4. Модернизация установки «Троицк ню-масс»	56
5.2 Поиск редких мюонных процессов в эксперименте «mu2e»	56
5.2.2 Разработка новой концепции (3in1) эксперимента Mu2e	57
5.2.3 Исследование основного элемента калориметра на основе кристалла LYSO	57
5.3 Исследование переходов нейтрон-антинейтрон	61
5.4 Изучение релятивистских потоков в астрофизике	62
5.5 Исследование релятивистских ядро-ядерных столкновений на установке	<b>C A</b>
PHENIX	64
5.6 Свойства барионов и ядер в топологических и иных солитонных моделях	64
5.7 Исследование подпорогового рождения лёгких векторных мезонов и	65
заряженных каонов в протон и фотоядерных реакциях	65
5.7.1 Свойства п'-мезона в ядерной среде	65
5.7.2 Изучение антикаон-ядерного оптического потенциала	67
5.7.2 Изучение антикаон-ядерного оптического потенциала 5.8 Поиск тёмной материи Вселенной	67 68
<ul> <li>5.7.2 Изучение антикаон-ядерного оптического потенциала</li> <li>5.8 Поиск тёмной материи Вселенной</li> <li>5.9 Внедрение в медицинскую практику технологии лечения смесями</li> </ul>	67 68
<ul> <li>5.7.2 Изучение антикаон-ядерного оптического потенциала</li> <li>5.8 Поиск тёмной материи Вселенной</li> <li>5.9 Внедрение в медицинскую практику технологии лечения смесями</li> <li>благородных газов с кислородом</li> </ul>	67 68 68
<ul> <li>5.7.2 Изучение антикаон-ядерного оптического потенциала</li> <li>5.8 Поиск тёмной материи Вселенной</li> <li>5.9 Внедрение в медицинскую практику технологии лечения смесями</li> <li>благородных газов с кислородом</li> <li>5.10 Исследование аномального электромагнетизма в углеродных конденсатах</li> </ul>	67 68 68 69
<ul> <li>5.7.2 Изучение антикаон-ядерного оптического потенциала</li> <li>5.8 Поиск тёмной материи Вселенной</li> <li>5.9 Внедрение в медицинскую практику технологии лечения смесями</li> <li>благородных газов с кислородом</li> <li>5.10 Исследование аномального электромагнетизма в углеродных конденсатах</li> <li>5.11 Разработка технологии, получение опытных образцов и исследование</li> </ul>	67 68 68 69
<ul> <li>5.7.2 Изучение антикаон-ядерного оптического потенциала</li> <li>5.8 Поиск тёмной материи Вселенной</li> <li>5.9 Внедрение в медицинскую практику технологии лечения смесями</li> <li>благородных газов с кислородом</li> <li>5.10 Исследование аномального электромагнетизма в углеродных конденсатах</li> <li>5.11 Разработка технологии, получение опытных образцов и исследование</li> <li>особенностей электродинамики нанокристаллических композитов фононных</li> </ul>	67 68 68 69 70
<ul> <li>5.7.2 Изучение антикаон-ядерного оптического потенциала</li> <li>5.8 Поиск тёмной материи Вселенной</li> <li>5.9 Внедрение в медицинскую практику технологии лечения смесями</li> <li>благородных газов с кислородом</li> <li>5.10 Исследование аномального электромагнетизма в углеродных конденсатах</li> <li>5.11 Разработка технологии, получение опытных образцов и исследование</li> <li>особенностей электродинамики нанокристаллических композитов фононных</li> <li>резонаторов (НФР)</li> </ul>	67 68 68 69 70
<ul> <li>5.7.2 Изучение антикаон-ядерного оптического потенциала</li> <li>5.8 Поиск тёмной материи Вселенной</li> <li>5.9 Внедрение в медицинскую практику технологии лечения смесями</li> <li>благородных газов с кислородом</li> <li>5.10 Исследование аномального электромагнетизма в углеродных конденсатах</li> <li>5.11 Разработка технологии, получение опытных образцов и исследование</li> <li>особенностей электродинамики нанокристаллических композитов фононных</li> <li>резонаторов (НФР)</li> <li>5.12 Исследование ядерных реакций при низких и средних энергиях.</li> </ul>	67 68 68 69 70
<ul> <li>5.7.2 Изучение антикаон-ядерного оптического потенциала</li> <li>5.8 Поиск тёмной материи Вселенной</li> <li>5.9 Внедрение в медицинскую практику технологии лечения смесями</li> <li>благородных газов с кислородом</li> <li>5.10 Исследование аномального электромагнетизма в углеродных конденсатах</li> <li>5.11 Разработка технологии, получение опытных образцов и исследование</li> <li>особенностей электродинамики нанокристаллических композитов фононных</li> <li>резонаторов (НФР)</li> <li>5.12 Исследование ядерных реакций при низких и средних энергиях.</li> </ul>	67 68 69 70 71
<ul> <li>5.7.2 Изучение антикаон-ядерного оптического потенциала</li> <li>5.8 Поиск тёмной материи Вселенной</li> <li>5.9 Внедрение в медицинскую практику технологии лечения смесями</li> <li>благородных газов с кислородом</li> <li>5.10 Исследование аномального электромагнетизма в углеродных конденсатах</li> <li>5.11 Разработка технологии, получение опытных образцов и исследование</li> <li>особенностей электродинамики нанокристаллических композитов фононных</li> <li>резонаторов (НФР)</li> <li>5.12 Исследование ядерных реакций при низких и средних энергиях.</li> <li>Исследования нейтрон-ядерных взаимодействий методом времени пролёта на</li> <li>установках НСВП-РАДЭКС ИЯИ РАН и ИРЕН, ИБР ЛНФ ОИЯИ</li> </ul>	67 68 69 70 71
<ul> <li>5.7.2 Изучение антикаон-ядерного оптического потенциала</li> <li>5.8 Поиск тёмной материи Вселенной</li> <li>5.9 Внедрение в медицинскую практику технологии лечения смесями</li> <li>благородных газов с кислородом</li> <li>5.10 Исследование аномального электромагнетизма в углеродных конденсатах</li> <li>5.11 Разработка технологии, получение опытных образцов и исследование</li> <li>особенностей электродинамики нанокристаллических композитов фононных</li> <li>резонаторов (НФР)</li> <li>5.12 Исследование ядерных реакций при низких и средних энергиях.</li> <li>Исследования нейтрон-ядерных взаимодействий методом времени пролёта на</li> <li>установках НСВП-РАДЭКС ИЯИ РАН и ИРЕН, ИБР ЛНФ ОИЯИ</li> <li>6 Исследования по ядерной физике</li> </ul>	67 68 69 70 71 73
<ul> <li>5.7.2 Изучение антикаон-ядерного оптического потенциала</li> <li>5.8 Поиск тёмной материи Вселенной</li> <li>5.9 Внедрение в медицинскую практику технологии лечения смесями</li> <li>благородных газов с кислородом</li> <li>5.10 Исследование аномального электромагнетизма в углеродных конденсатах</li> <li>5.11 Разработка технологии, получение опытных образцов и исследование</li> <li>особенностей электродинамики нанокристаллических композитов фононных</li> <li>резонаторов (НФР)</li> <li>5.12 Исследование ядерных реакций при низких и средних энергиях.</li> <li>Исследования нейтрон-ядерных взаимодействий методом времени пролёта на</li> <li>установках НСВП-РАДЭКС ИЯИ РАН и ИРЕН, ИБР ЛНФ ОИЯИ</li> <li>6 Исследование взаимодействия нуклонов с малонуклонными системами и</li> </ul>	67 68 69 70 71 73
<ul> <li>5.7.2 Изучение антикаон-ядерного оптического потенциала</li> <li>5.8 Поиск тёмной материи Вселенной</li> <li>5.9 Внедрение в медицинскую практику технологии лечения смесями благородных газов с кислородом</li> <li>5.10 Исследование аномального электромагнетизма в углеродных конденсатах</li> <li>5.11 Разработка технологии, получение опытных образцов и исследование особенностей электродинамики нанокристаллических композитов фононных резонаторов (НФР)</li> <li>5.12 Исследование ядерных реакций при низких и средних энергиях.</li> <li>Исследования нейтрон-ядерных взаимодействий методом времени пролёта на установках НСВП-РАДЭКС ИЯИ РАН и ИРЕН, ИБР ЛНФ ОИЯИ</li> <li>6 Исследования по ядерной физике</li> <li>6.1 Исследование взаимодействия нуклонов с малонуклонными системами и лёгкими ядрами на пучках Московской мезонной фабрики</li> </ul>	67 68 69 70 71 73 73
<ul> <li>5.7.2 Изучение антикаон-ядерного оптического потенциала</li> <li>5.8 Поиск тёмной материи Вселенной</li> <li>5.9 Внедрение в медицинскую практику технологии лечения смесями</li> <li>благородных газов с кислородом</li> <li>5.10 Исследование аномального электромагнетизма в углеродных конденсатах</li> <li>5.11 Разработка технологии, получение опытных образцов и исследование</li> <li>особенностей электродинамики нанокристаллических композитов фононных</li> <li>резонаторов (НФР)</li> <li>5.12 Исследование ядерных реакций при низких и средних энергиях.</li> <li>Исследования нейтрон-ядерных взаимодействий методом времени пролёта на</li> <li>установках НСВП-РАДЭКС ИЯИ РАН и ИРЕН, ИБР ЛНФ ОИЯИ</li> <li>6 Исследование взаимодействия нуклонов с малонуклонными системами и лёгкими ядрами на пучках Московской мезонной фабрики</li> <li>6.2 Исследование структуры и механизмов взаимодействия слабосвязанных ядер</li> </ul>	67 68 69 70 71 73 73
<ul> <li>5.7.2 Изучение антикаон-ядерного оптического потенциала</li> <li>5.8 Поиск тёмной материи Вселенной</li> <li>5.9 Внедрение в медицинскую практику технологии лечения смесями благородных газов с кислородом</li> <li>5.10 Исследование аномального электромагнетизма в углеродных конденсатах</li> <li>5.11 Разработка технологии, получение опытных образцов и исследование особенностей электродинамики нанокристаллических композитов фононных резонаторов (НФР)</li> <li>5.12 Исследование ядерных реакций при низких и средних энергиях.</li> <li>Исследования нейтрон-ядерных взаимодействий методом времени пролёта на установках НСВП-РАДЭКС ИЯИ РАН и ИРЕН, ИБР ЛНФ ОИЯИ</li> <li>6 Исследование взаимодействия нуклонов с малонуклонными системами и лёгкими ядрами на пучках Московской мезонной фабрики</li> <li>6.2 Исследование структуры и механизмов взаимодействия слабосвязанных ядер с ядрами при средних энергиях</li> </ul>	67 68 69 70 71 73 73 73
<ul> <li>5.7.2 Изучение антикаон-ядерного оптического потенциала</li> <li>5.8 Поиск тёмной материи Вселенной</li> <li>5.9 Внедрение в медицинскую практику технологии лечения смесями</li> <li>благородных газов с кислородом</li> <li>5.10 Исследование аномального электромагнетизма в углеродных конденсатах</li> <li>5.11 Разработка технологии, получение опытных образцов и исследование</li> <li>особенностей электродинамики нанокристаллических композитов фононных</li> <li>резонаторов (НФР)</li> <li>5.12 Исследование ядерных реакций при низких и средних энергиях.</li> <li>Исследования нейтрон-ядерных взаимодействий методом времени пролёта на</li> <li>установках НСВП-РАДЭКС ИЯИ РАН и ИРЕН, ИБР ЛНФ ОИЯИ</li> <li>6 Исследование взаимодействия нуклонов с малонуклонными системами и</li> <li>лёткими ядрами на пучках Московской мезонной фабрики</li> <li>6.2 Исследование структуры и механизмов взаимодействия слабосвязанных ядер</li> <li>с ядрами при средних энергиях</li> </ul>	67 68 69 70 71 73 73 73 77

6.4 Исследование взаимодействия нейтронов малых энергий с ядрами с	70
возбуждением коллективных степеней свободы	19
6.5 Разработка основ создания средств аварийной радиационной защиты	
третьего поколения (АРЗ_3) и методов испытаний и контроля для повышения	79
безопасности экологической чистоты ядерной энергетики	
7 Нейтронные исследования. Многоцелевой Нейтронный комплекс ИЯИ РАН	84
7.1 Импульсный нейтронный источник ИН-06 ИЯИ РАН. Оснащение ИН-06	84
приборной базой	01
7.2 Спектрометрия по времени замедления нейтронов в свинце	84
7.2.1 Исследования по физике деления и нейтрон-ядерных взаимодействий	84
7.2.2 Расчётно-теоретическое обоснование конфигураций нейтронных мишеней	85
spallation-типа	05
7.2.3 Моделирование процессов, инициированных пучком протонов линейного	
ускорителя в установках Нейтронного комплекса ИЯИ, с целью уточнения и	86
оптимизации параметров установок, планирования новых экспериментов и	00
приложений.	
7.2.4 Развитие приборного парка на нейтронных источниках ИЯИ РАН	87
7.3 Физика конденсированного состояния, разработка новых функциональных	88
материалов, радиационное материаловедение	00
7.3.1 Физика конденсированного состояния	88
7.3.2 Развитие экспериментальной техники для исследования материалов	94
7.3.3. Развитие новых методов исследований на нейтронных источниках	95
7.3.3.1 Исследование возможности измерения нарушения Р – и СР –	95
инвариантности в дифракции нейтронов	20
Заключение	97
Список источников	101
8 Публикации	102
8.1 Публикации к разделу 1	102
8.2 Публикации к разделу 2	105
8.3 Публикации к разделу 3	105
8.4 Публикации к разделу 4	106
8.5 Публикации к разделу 5	107
8.6 Публикации к разделу 6	111
8.7 Публикации к разделу 7	116

#### Введение

Линейный ускоритель является базовой установкой уникального многофункционального научно-исследовательского объекта - комплекса сильноточного линейного ускорителя ИЯИ РАН, основными направлениями исследований на котором в настоящее время являются исследования по физике средних энергий, нейтронные исследования, исследования в области производства радиоизотопов, лучевой терапии и другие, как фундаментальные, так и прикладные исследования. В настоящее время комплекс сильноточного линейного ускорителя ИЯИ РАН в своем классе является крупнейшим в Европе и одним из крупнейших в мире. Ускоритель включает 2 инжектора (ионы H+ и H-) на энергию 400 кэВ, инжекционный тракт с бустерной секцией RFQ (ускорение до 750 кэВ), начальную часть ускорителя до энергии 100 МэВ и основную часть до энергии 600 МэВ. Предусмотрен промежуточный вывод пучка на участке с энергией 160 МэВ. В последние годы в силу, главным образом, экономических причин энергия пучка ограничена величиной 209 МэВ. Регулярная работа ускорителя ведется с 1993 года и за прошедшее время проведено 108 сеансов общей продолжительностью 39850 часов. Для обеспечения успешной работы ускорителя постоянно проводятся не только профилактические работы по поддержанию работоспособности оборудования, но и ведется модернизация систем ускорителя. Разрабатываются и создаются новые элементы ускорителей, которые находят применение и в других российских и зарубежных ускорительных центрах.

Система каналов транспортировки пучка Экспериментального комплекса позволяет проводить пучки ионов водорода к экспериментальным установкам, в том числе, установкам нейтронного комплекса и Комплексу лучевой терапии ИЯИ РАН.

Комплекс протонной терапии Института ядерных исследований РАН представляет собой компактный инновационный медицинский центр, который предназначен для лечения злокачественных опухолей с использованием пучков протонов, фотонов и рентгеновского излучения, а также для диагностики и проведения исследований в смежных с медициной областях науки. Базой для этого центра является уникальный ускоритель протонов ИЯИ РАН, позволяющий получать пучки ускоренных протонов в широком диапазоне энергий, и интенсивностей. В состав КПТ сходят следующие основные установки медицинского назначения: протонная лучевая установка (Рис.1), медицинский ускоритель электронов СЛ-75-5-МТ, рентгено-терапевтический аппарат, томографсимулятор Toshiba Aquilion LB-16, электронный микроскоп Morgagni 268. Центр позволяет проводить протонную и сочетанную радиотерапию новообразований любой локализации, уточнять диагностику онкологических заболеваний и проводить мониторинг эффективности лечения.

Получение медицинских изотопов на ускорителях для диагностики и терапии различных заболеваний имеет большое научное, технологическое и социальное значение. Линейный ускоритель ИЯИ РАН является единственной установкой в Европе и Азии такого класса. На нем можно получать в больших количествах ряд важнейших медицинских радионуклидов, в частности, стронций-82 (используемый при изготовлении генераторов рубидия-82 для диагностики с помощью позитронно-эмиссионной томографии) и актиний-225 (используемый при изготовлении генераторов висмута-213 для терапии онкологических заболеваний). Данные исследования направлены на развитие и улучшение существующих технологий получения стронция-82 и разработке новых технологий получения актиния-225, а также важного побочного продукта – радия-223. Также в данных исследованиях разрабатываются, изучаются и совершенствуются генераторы 82Sг/82Rb, 225Ac/213Bi и 223Ra/211Pb.

Стандартная модель физики частиц не полна. Об этом свидетельствуют ненулевая масса нейтрино и существование темной материи во Вселенной. Природа частиц темной материи неизвестна. К числу наиболее естественных кандидатов на роль темной материи относятся стерильные нейтрино. Эти частицы появляются в большинстве расширений Стандартной модели на случай массивных нейтрино. Стерильные (правые) нейтрино это нейтральные лептоны. Являясь SU(2) синглетами они не участвуют в слабых взаимодействиях. Однако, за исключением специальных вырожденных случаев, они смешиваются с активными (левыми) нейтрино и приводят к появлению дополнительных массовых состояний в спектре.

С экспериментальной точки зрения, в пользу существования стерильных нейтрино говорят результаты некоторых осцилляционных экспериментов с короткой базой (LSND и MiniBooNE), реакторная аномалия и результаты калибровки радио-химических экспериментов по измерению потоков солнечных нейтрино. Эти аномалии можно описать в предположении одного или двух легких стерильных нейтрино с массой порядка электронвольт. Современные космологические данные (измерение анизотропии реликтового излучения и первичный нуклеосинтез) также указывают на наиболее вероятное значение эффективного числа легких нейтрино равного четырем, что можно интерпретировать как вероятное существование одного легкого состояния стерильных нейтрино в дополнение к трем активным. С точки же зрения объяснения темной материи, наиболее интересным является диапазон масс стерильных нейтрино области килоэлектронвольт. в По аналогии с тремя поколениями фермионов Стандартной модели, можно ожидать, что стерильные правые нейтрино также образуют поколения. Обнаружение одного поколения стерильных нейтрино придаст уверенности в существовании остальных поколений. Если одно из них образует темную материю, соотношение между массой и углом смешивания такого

нейтрино существенно ограничено астрофизическими наблюдениями. Эти ограничения не распространяются на остальные поколения. В связи с этим прямые лабораторные поиски стерильных нейтрино представляют особенный интерес, как в области значений параметров соответствующих сектору темной материи, так и вне ее. Обнаружение стерильных нейтрино даст ответ сразу на ряд фундаментальных вопросов физики частиц (структура массовой матрицы нейтрино, характер расширения стандартной модели, несохранение лептонного числа), астрофизики и космологии (темная материя).

Проект направлен на прямые лабораторные поиски стерильных нейтрино в широкой области значений масс. Конкретная задача - значительное улучшение существующих ограничений на угол смешивания стерильных и активных нейтрино в области масс от десятков электронвольт и вплоть до 10 кэВ. Эта область значений масс недоступна в осцилляционных экспериментах, планирующихся в ряде мировых научных центров.

В поиске массы нейтрино по кинематическим ограничениям в конце спектра бетараспада лучшая чувствительность достигнута в экспериментах с тритием в Майнце и Троицке. Опубликованы близкие ограничения на верхний предел массы на уровне примерно 2 эВ. В ближайшем будущем в Texhoлогическом институте в Карлсруэ (KIT, Karlsruhe, Germany) будет запущена новая установка по проекту КАТРИН, которая позволит поставить верхний предел на массу электронного антинейтрино на уровне 0,2 эВ. Таким образом, в обозримом будущем эксперимент КАТРИН должен дать лучший в мире результат по ограничению на массу электронного антинейтрино, но и данные, полученные на установке «Троицк ню-масс», будут входить, как минимум, в первую тройку в мировом списке. Поэтому, помимо работ по систематике эксперимента КАТРИН, представляется важным продолжить исследовать систематику установки «Троицк ню-масс». Необходимо повысить надежность И достоверность обработки данных.

На установке «Троицк ню-масс» также проводится работа, связанная с исследованием накопления зарядов в газовых тритиевых источниках по типу «Троицк ню-масс», что, в частности, также важно для установки KATRIN, Карлсруэ, Германия.

В эксперименте «mu2e» исследования направлены на решение фундаментальной проблемы сохранения лептонных квантовых чисел. Обнаружение связи между семействами лептонов будет свидетельством существования новых физических явлений вне рамок Стандартной модели. Цель работы - поиск процесса конверсии мюона на ядре, идущего с нарушением закона сохранения лептонных чисел с уровнем чувствительности превышающем на пять порядков современное экспериментальное ограничение, в международном эксперименте Mu2e проводимом в FNAL (Chicago)

США. Основная идея эксперимента предложена (1989 г.) и разработана сотрудниками исследований. Повышение института ядерных уровня чувствительности в эксперименте Mu2e на несколько порядков может привести к обнаружению новых взаимодействий, порождаемых новыми тяжелыми частицами с массами 1000 ТэВ, которые невозможно получить в ближайшем будущем на ускорителях. Основная цель группы из ИЯИ РАН заключается в разработке новой концепции эксперимента (3in1), позволяющей поиск трех редких распадов µ->е конверсии, µ->еу и µ->еее на одной установке и экспериментальном исследовании основного элемента калориметра на основе кристалла LYSO с новым фото детектором APD (Avalanche Photodiode) большой площади.

Поиск явлений и процессов, выходящих за пределы Стандартной модели представляет собой одну из главных задач современной физики. Поиск возможен как в экспериментах на коллайдерах с максимально доступной энергией (LHC, Tevatron), так и в прецизионных экспериментах, осуществляемых при относительно низких энергиях. При этом два указанных класса экспериментов дают взаимно дополняющую информацию. Важнейшей проблемой, стоящей перед прецизионными экспериментами, является обнаружение процессов, идущих с нарушением закона сохранения лептонных квантовых чисел. В то время, как Стандартная модель не содержит в себе механизмов нарушения электронного, мюонного и тау лептонного чисел, они естественным образом возникают практически во всех теориях, расширяющих Стандартную модель. Наибольший прогресс достигнут в экспериментальном исследовании редких мюонных процессов, идущих нарушением электронного и мюонного квантовых чисел. На рисунке 1 представлены результаты экспериментов по измерению верхнего предела на относительную вероятность процессов идущих с нарушением лептонного квантового числа.



Рисунок 1. Результаты экспериментов по измерению верхних ограничений трёх мюонных и двух каонных процессов идущих с нарушением лептонных чисел.

Современная теория элементарных частиц не может предсказать процесс наиболее чувствительный к поиску нарушения лептонных чисел. Поиск трёх редких мюонных процессов ( $\mu$ ->е конверсии,  $\mu$ ->е $\gamma$  и  $\mu$ ->еее) чувствительных к трём возможным новым взаимодействиям лептон-кварк, лептон-фотон и лептон-лептон на базе одной установки повышает вероятность открытия новых физических явлений связанных с нарушением лептонных чисел. Эксперимент Mu2e по поиску процесса конверсии мюона на ядре был принят DOE (Department of Energy, US) 11 ноября 2009.

В задаче исследования переходов нейтрон-антинейтрон предложен новый, теоретикополевой подход, поскольку ранее было показано, что только с его помощью можно корректно описать основной эффект индуцируемый средой – поглощение.

Исследование релятивистских ядро-ядерных столкновений на установке PHENIX. Построение квантовой хромодинамики (КХД) явилось поворотным пунктом в понимании природы сильного взаимодействия между элементарными частицами. КХД стала фундаментальной теорией сильного взаимодействия. Вскоре на стыке нескольких областей физики - ядерной физики, физики элементарных частиц, квантовой хромодинамики и в некоторой степени астрофизики- стало развиваться новое направление: исследование КХД вещества при экстремальной температуре и плотности. Это направление привлекает все большее внимание экспериментаторов и теоретиков последние 30 лет. Важным этапом в этом направлении был запуск в 2000 году ускорителя на встречных пучках, Relativistic Heavy Ion Collider, RHIC, в Брукхевенской Национальной Лаборатории США. Он был разработан и

построен преимущественно под программу изучения столкновений ядер с массой вплоть до золота и энергией 200 ГэВ в системе центра масс двух нуклонов. В течение 13-ти лет на ускорительном комплексе ведёт измерения эксперимент PHENIX. В ближайшее время начнётся набор статистики в 2014 году. Основной проблемой для столь длительного эксперимента является поддержание и функционирование всех элементов установки, в частности, дрейфовых камер центрального плеча. В.С. Пантуев является ответственным экспертом, следящим за работоспособностью этих детекторов. Набор статистики, безусловно связан с обеспечением круглосуточной работы в течение полугодового периода измерений.

Помимо экспериментальных работ, проводящихся на установке «PHENIX», ведётся подготовка к публикации научных статей. В.С. Пантуев в 2013 г. являлся руководителем внутренней группы по редактированию одной из статей от имени всей коллаборации.

Изучение рождения псевдоскалярных мезонов (заряженных каонов, η и η' мезонов) при взаимодействии ядер и элементарных проб (протонов, пионов, фотонов) с ядрами стало предметом весьма интенсивных экспериментальных и теоретических исследований в последние годы. Основной интерес к данным реакциям был обусловлен возможностью изучения в них ренормализации свойств этих частиц, предсказываемой различными теоретическими моделями (киральной теорией возмущений, релятивистскими среднеполевыми подходами, подходами, основанными на использовании эффективных длин рассеяния, и т.д.), в горячей/плотной ядерной материи.

Знание этих свойств является крайне важным, в частности, для понимания таких фундаментальных вопросов теории сильных взаимодействий-квантовой хромодинамики, (КХД), астрофизики и адронной физики как наличие киральной симметрии (приближенной) у лагранжиана КХД и ее частичное восстановление не только в плотной ядерной среде, но уже и при обычных ядерных плотностях, строение необычных звездных объектов-нейтронных звезд и их динамические и статические характеристики, короткодействующая часть нуклоннуклонного потенциала.

Поиск тёмной материи Вселенной. Выяснение природы тёмной материи Вселенной (TM), является в настоящее время наиболее актуальной задачей астрофизики. Прямые методы изучения TM заключаются в поиске актов рассеяния ВИМП на ядрах детектора-мишени в условиях максимально низкого фона в подземных лабораториях. Среди используемых и создаваемых для этой цели детекторов наиболее перспективными являются детекторы, содержащие сжиженные благородные газы - аргон, ксенон и неон. Из них аргон - наиболее дешёвый и доступный. Однако в аргоне, добываемом из воздуха, имеется примесь радиоактивного изотопа Ar<sup>39</sup> в количестве 10<sup>3</sup> распадов /секунду/тонна, что на много порядков больше ожидаемого эффекта. Поэтому основное требование к создаваемым аргоновым

детекторам заключается в подавлении фона Ar<sup>39</sup> до уровня порядка нескольких распадов на 1 тонну в год. Этому требованию удовлетворяет предлагаемый в настоящей работе детектор, позволяющий максимально подавить фон.

Внедрение в медицинскую практику технологии лечения смесями благородных газов с кислородом. Благодаря работам Российских учёных благородные газы широко внедряются в медицину. Они обладают универсальным воздействием на организм пациентов. Ксенон обладает анальгетическим, спазмолитическим, кардиотоническим, нейропротекторным, антистрессорным, антигипоксическим, иммуностимулирующим, противовоспалительным, анаболическим, нейрогуморальным, вазоплегическим, миоплегическим, противосудорожным, регенеративным, успокаивающем действием.

Однако самый распространенный в земной атмосфере благородный газ аргон (почти 1%), как ни странно, в медицине почти не исследован и не применяется. Аргон широко востребован в современной промышленности. Неплохо исследован в эксперименте на лабораторных животных, а в клинике нет. Аргон улучшает иммунный статус, повышает репродуктивную функцию, задерживает возрастное физиологическое угнетение половой сферы, обладает антистрессорным действием. Все эти замечательные свойства этого газа, которым мы дышим, исследованы в основном на крысах.

Исследование аномального электромагнетизма в углеродных конденсатах. При исследовании проводящих свойств некоторых углеродных конденсатов обнаружено явление скачкообразного увеличения сопротивления на ~4-5 порядков величины, при увеличении электрического тока до некоторого критического значения. Критический ток убывает при повышении температуры и при комнатной температуре имеет величину 5 - 500 mA (в зависимости от условий осаждения углеродной плёнки и её дальнейшей обработки) при приложении постоянного электрического напряжения в интервале 5-50 В. Экспериментальные образцы представляли собой углеродную пленку, толщиной ~ 1000-2000 A, с размерами в плане 1x0.5 см<sup>2</sup>, хотя эти размеры могут быть значительно уменьшены без заметного влияния на результаты эксперимента.

Вторая интересная особенность углеродных плёнок – появление на контактах постоянного напряжения при облучении пленок радиоволнами, т.е. детектирование СВЧ. Причём величина постоянного напряжения на детекторе экспоненциально уменьшалась с увеличением температуры образца и обращалась в ноль при ~370 градусах Цельсия.

Основной целью физики малонуклонных систем на протяжении последних 40 лет ее развития была попытка строго количественно описать разнообразные процессы в малонуклонных системах на основе современных высокоточных 2N и 3N взаимодействий с использованием строгих уравнений Фаддеева (УФ). Однако при сравнении весьма точно

измеренных как сечений упругого Nd (N = p, n) рассеяния, так и сечений трехчастичного развала N + d  $\rightarrow$  N + n + p в различных геометриях с расчетами оказалось, что во многих случаях наблюдаются сильные расхождения с результатами наиболее полных и точных на сегодня Фаддеевских расчетов, причем истинные причины этих расхождений до сих пор остаются неясными, несмотря на огромные затраченные усилия.

В частности, сильные расхождения между теорией и экспериментальными данными обнаружены в реакции трехчастичного развала  $n+d \rightarrow n+n+p$  в кинематике нейтроннейтронного квазисвободного рассеяния (КСР): экспериментальные сечения превышают теоретические оценки на ~ 18%. При этом теория хорошо описывает сечения np-КСР, измеренные в той же кинематике КСР. Данная кризисная ситуация проявляется также при анализе данных для Nd-развала в системах n + d и p + d в так называемой "Space Star" кинематике: экспериментальные данные для pd и nd развала сильно отличаются друг от друга, тогда как теоретические сечения оказываются почти равными и не совпадают с экспериментальными данными (см. рис.2).



Рисунок 2. Экспериментальные данные и результаты расчета для nd- и pd-paзвала в "Space Star" кинематике. Эксперимент: nd-paзвал: ● – [1], ○ – [2]; pd-paзвал: ■ – [3], □– [4]; теоретические расчеты [5]: пунктир – pd-paзвал, сплошная линия – nd-paзвал.

Возможное объяснение описанных выше расхождений – это предположение, что в ядре 3H (nd-система) дополнительная корреляция двух нейтронов, индуцированная протоном, приводит к появлению эффективного почти связанного состояния двух нейтронов в поле протона, а соответственно в ядре 3He (pd-система) из-за дополнительного кулоновского взаимодействия в паре p-p появляется менее связанное состояние двух протонов в поле нейтрона. При этом может кардинально измениться весь механизм такой парной корреляции. В частности, вместо "связанной" nn-пары получается резонансная pp-пара и динамика её распада будет совсем иная, чем динамика распада "эффективного nn-связанного состояния".

Основной целью проекта является исследование nn и pp корреляций, которое будет проведено как в реакции nd-развала, так и в реакциях с трехнуклонными системами 3H и 3He, в которых уже могут существовать квазисвязанные nn и pp состояния. При этом можно ожидать, что измеренные нами nn- и pp-корреляции, в частности, извлеченные в эксперименте эффективные длины рассеяния (ann app) и энергии квазисвязанной пары (E\*nn и E\*pp), окажутся совсем не те, которые присущи свободным nn- и pp-системам.

В течение нескольких последних десятилетий сложилось и бурно развивается новое направление в ядерной физике – физика экзотических радиоактивных ядер, далёких от линии стабильности, имеющих нестандартную структуру и аномальное поведение сечений взаимодействия со стабильными ядрами. Большой интерес представляют ядра с двухнейтронным гало 6He, 11Li, 14Be, в которых подсистемы кор+нейтрон и нейтрон+нейтрон не имеют связанных состояний.

Исследование квазисвободного рассеяния протона на валентном нейтроне и нейтронных кластерах радиоактивных гало ядер 6He, 8He, 11Li и др. является естественным продолжением и развитием работ по изучению кластерной структуры стабильных ядер 6Li, 7Li, 9Be и др. Экспериментальные данные о реакции квазисвободного рассеяния протона при средней энергии позволят получить прямую информацию о вероятности образования нейтронных кластеров в гало ядрах с двумя и более валентными нейтронами, устранить неоднозначность выводов о структуре ядер 6He, 8He и др.

Для планирования мероприятий по оказанию помощи и охране жизни людей при ликвидации последствий ядерных и радиационных аварий может оказаться недостаточным подход, основанный на использовании средних показателей поражений. В связи с этим количественный анализ рисков и в особенности управления рисками становятся важным аспектом принятия решений, что требует знания распределений количественных мер (доз) поражающих факторов. Согласно существующим представлениям и данным наблюдений при аварийных облучениях и при профессиональном облучении в отсутствии «управления дозозатратами» распределение индивидуальных доз D хорошо описываются логнормальным распределением. Такие распределения доз (в обобщенном смысле – тяжести поражений) наблюдались при аварии на атомной подводной лодке с ЯЭУ и ЧАЭС как у ликвидаторов, так и у свидетелей аварий в тех случаях, когда удавалось получить сколько-нибудь достоверные данные о дозах. По оценке Агентства по ядерной энергии (NEA) в ликвидации аварии в Чернобыле на площадке ЧАЭС (с последующей расчисткой) было занято около 600 тысяч человек. С самого начала работ – примерно 240 тысяч военнослужащих, остальные –

сотрудники гражданских организаций, охранных служб, МВД СССР и других организаций. Около 400 человек (персонал АЭС, пожарные, медицинские работники) находились на площадке с момента начала аварии и получили очень высокие дозы облучения. Имеются лишь фрагментарные данные о дозах, полученных в этот период. Попытки организовать дозиметрическую службу по отчету NEA были «неадекватными» до середины июня 1986 года. По данным авторов, исследовавших распределения доз у пострадавших в Чернобыле, было установлено следующее. В тех случаях, когда имелись доводы в пользу достоверности этих данных, распределения были логнормальными. Несмотря на то, что средние индивидуальные дозы в различных выборках (по коллективам ликвидаторов из различных организаций) отличаются более, чем в 100 раз, дисперсия логарифма индивидуальной дозы фактически не зависела от среднего значения дозы и объема выборки. Т. е. дисперсии логарифмов индивидуальных доз были примерно одинаковы для разных групп (коллективов) людей, независимо от размеров группы и средней индивидуальной дозы в группе. Такое свойство наблюдаемых распределений логарифма аварийной дозы относит эту величину к классу гомоскедастичных или равноизменчивых случайных величин. Таким образом, распределение меры воздействия поражающего фактора при радиационных авариях обладает четкими особенностями: типом самого распределения (не Гаусса, не Пуассона, а именно логнормального) и свойством гомоскедастичности её логарифма.

При сочетанном аварийном облучении имеют место пять основных поражающих факторов: 1) облучение внутренних органов проникающими компонентами ионизирующих (в основном – гамма и нейтронного) излучений; 2) формирование местной лучевой травмы сильнопоглощаемыми компонентами (в основном – бета) ионизирующих излучений. При больших, более 8 Гр, дозах она проявляется в форме радиационного ожога. Хотя при меньших дозах эта травма носит подклинический характер (т.е. без внешних проявлений), она существенна вследствие её взаимоотягощающего влияния в сочетаниями с другими поражающими факторами; 3) внутреннее облучение вследствие ингаляционного поражения; 4) инкорпорация (накопление) радиоактивных нуклидов в организме; 5) радиационное загрязнение поверхности тела и слизистых оболочек. В настоящее время в процессе ликвидационных работ инструментальными средствами могут контролироваться только некоторые компоненты такого многофакторного радиационного воздействия, и это противоречит требованиям радиационной безопасности.

Допустимое время пребывания в опасной зоне должно контролироваться измерениями накапливаемых доз с помощью дозиметров. При неконтролируемых экстремальных ситуациях информация о полученной дозе существенна для сортировки пострадавших. Кроме того, необходимо в ряде случаев проведение радиационной разведки с помощью радиометров. Для

оценки сложности задачи можно привести такие примеры. Мощности экспозиционных доз в районе аварийного энергоблока ЧАЭС после взрыва на разных участках составляли от 1000 Рентген (около 9 Грей) в час до 15000 Рентген (132 Грей) в час. Подавляющая доля имеющихся сейчас дозиметрических приборов ориентирована на регистрацию внешнего монофакторного, в основном, гамма облучения. Лишь некоторые из них способны измерять другие виды излучений, существенных для оценки сочетанных аварийных радиационных поражений. Кроме того, проблема радиационной безопасности при аварийных работах не сводится к решению исключительно технических задач. Изложенное выше является обоснованием необходимости проводимых исследований.

научно-организационная Лаборатории Научная И деятельность нейтронных исследований ИЯИ РАН направлена на 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 с времяпролетным нейтронным спектрометром, 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.

Группа нейтронных исследований.

Группа нейтрон-ядерных взаимодействий.

Сектор электроники и технического обеспечения.

Основными задачами лаборатории и входящих в нее секторов являются:

- Развитие комплекса импульсных источников нейтронов на протонных пучках сильноточного ускорителя ИЯИ РАН; разработка установок Нейтронного комплекса, концепций ADS –систем, исследование физических проблем, связанных с эксплуатацией нейтронографических установок и экспериментов на них.
- Расчетно-теоретические исследования процессов взаимодействий частиц и ядер средних и высоких энергий со сложными мишенями и средами, включая процессы генерации и переноса нейтронов и других частиц, энерговыделения в мишенях, образования и трансмутации нуклидов, воздействия облучения на материалы. Развитие теории, алгоритмов и методов математического моделирования указанных процессов.

- Участие в подготовке и проведении экспериментов по физике деления и нейтронной физике, развитие методов регистрации нейтронов, осколков деления, альфа-излучения.
- Разработка, создание и работа на нейтронографических установках в экспериментальных зонах импульсных источников нейтронов ИЯИ РАН. Проведение исследований конденсированных сред на источниках нейтронов и ренгеновского излучений.
- Разработка и создание системы сбора, обработки информации и управления комплексом нейтронографических установок в экспериментальных зонах импульсных источников нейтронов ИЯИ РАН.

В отчётном году основные усилия Лаборатории были направлены на проработку возможностей развития ИН-06, включая второй свободный бокс источника, а также на развитие и оснащение детектирующей аппаратурой.

Экспериментальные установки для исследования конденсированных сред Нейтронного комплекса расположены в зале Экспериментального комплекса ИЯИ РАН (см. прилагаемую ниже схему).

Импульсный источник нейтронов ИН-06 предназначен, главным образом, для исследований в области конденсированных сред. Он состоит из двух независимых источников нейтронов, расположенных каждый в своем боксе в общей биологической защите. В первом боксе находится вольфрамовая мишень с водяным замедлителем, на которую в настоящее время подается пучок протонов от ускорителя (первая очередь ИН-06). Второй бокс (вторая очередь ИН-06) пока свободен и может быть адаптирован к решению других перспективных задач.

Принципиально новые возможности для решения прикладных задач нейтронной физики и получения ядерных данных для проектов безопасной ядерной энергетики 21-го века имеются в результате создания на пучке протонов линейного ускорителя ИЯИ РАН уникального нейтронного спектрометра по времени замедления нейтронов в свинце (CB3-100). Открываются также возможности экспериментальных исследований процессов нуклеосинтеза в звездах (измерения нейтронных сечений при звездных температурах.). Кроме того, как показывает опыт проведения совместных исследований ИЯИ РАН и ГНЦ РФ «Физико-энергетический институт» на CB3-100, измерение сечений деления минорных актинидов на микрограммовых образцах глубоко под барьером деления позволяет получать информацию о структуре барьеров деления одновременно с получением уникальной информации о средних сечениях деления младших актинидов – ключевой информации для развития технологии переработки отработанного ядерного топлива на основе сильноточных

ускорительных комплексов для проектов безопасной ядерной энергетики будущего. В отчетном году были продолжены работы по анализу экспериментальных данных



Схема размещения нейтронографических установок ИН-06 в здании экспериментального комплекса.

В Лаборатории нейтронных исследований ИЯИ РАН разработан и успешно применяется универсальный транспортный код SHIELD: http://www.inr.ru/shield/. Код SHIELD включает в себя известные отечественные модели ядерных реакций, созданные в ОИЯИ и ИЯИ РАН и описывающие все стадии ядерной реакции в эксклюзивном подходе. Код SHIELD является оригинальной отечественной разработкой. Имеющиеся вычислительные средства позволяют проводить расчетно-теоретическое обоснование конфигураций нейтронных мишеней spallation-типа первой и второй очередей Нейтронного комплекса ИЯИ РАН с целью оптимизации выхода и спектра нейтронов в планируемых экспериментах, а также для расширения возможностей использования нейтронных пучков для решения научных проблем физики конденсированных сред, наноматериалов, биотехнологий, проектов безопасной ядерной энергетики будущего. Возможности кода SHIELD значительно превосходят потребности Нейтронного комплекса ИЯИ, которые ограничены проектной энергией пучка протонов до 600 МэВ. Современный код SHIELD позволяет моделировать взаимодействие с мишенью не только адронов с энергией до 1 ТэВ, но и любых ядер (Z,A). Активно развивается и используется «медицинская» версия кода SHIELD-HIT (Heavy Ion Therapy), предназначенная для задач адронной и ионной терапии в онкологии.

В последние годы значительные усилия коллектива Лаборатории (Сектор конденсированных сред) направлены на оснащение импульсного источника нейтронов ИН-06 многоцелевыми нейтронографическими установками, а также на использование возможностей рентгеновских и мессбауэровского спектрометров.

Проработка программы исследований на базе Нейтронного комплекса ИЯИ РАН ведётся совместно с научными коллективами российских и зарубежных центров.

#### Основные результаты

#### 1 Линейный ускоритель Московской мезонной фабрики

# 1.1 Проведение пучковых сеансов, направленных на разработку технологии получения и на получение радиоизотопов, а также на модернизацию

#### ускорителя.

В 2013 году исполнилось 25 лет с момента получения ускоренного пучка с энергией 20 МэВ на выходе первого ускоряющего резонатора, а также 20 лет с начала регулярной работы ускорителя на фундаментальные и прикладные задачи. С 1993 по 2013 год состоялось 108 сеансов общей продолжительностью 39850 часов. В том числе в 2013 году проведено четыре сеанса, направленных на разработку технологии получения радиоизотопов и наработку радиоизотопов, а также на исследования и модернизацию ускорителя. Общая продолжительность сеансов в 2013 году составила 1212 часов. Наработка ускорителя по программе получения радиоизотопов составила свыше 66000 мкА-часов при среднем токе пучка до 120 мкА и энергии 143 МэВ.

### 1.2 Модернизация систем ускорителя. Разработка и создание элементов ускорителей.

Выполнен комплекс работ по модернизации ускорителя, в результате чего увеличена частота следования импульсов тока пучка протонов с 50 Гц до 100 Гц для энергии до 100 МэВ. В частности, модернизирован инжектор протонов и система ВЧ питания начальной части ускорителя. С целью увеличения интенсивности пучка на изотопном комплексе создана система быстрой круговой развертки пучка на мишени. На участке промежуточного вывода реализован режим распределения пучка между изотопным и экспериментальным комплексами с помощью системы импульсного разделения пучка: При работе с частотой 100 Гц половина импульсов тока пучка с энергией 100 МэВ может подаваться на изотопный комплекс, а вторая половина - с большей энергией на экспериментальный комплекс, причем обеспечена возможность независимой регулировки импульсного тока и длительности импульсов в каждой из двух серий.

Одной из главных задач при работе ускорителя, помимо обеспечения требуемых параметров пучка, является повышение эффективности работы. Под эффективностью понимается отношение реально обеспеченного интеграла интенсивности пучка за определенный промежуток времени к максимально возможному по условиям проведения эксперимента интегралу за тот же промежуток времени. В сеансе в январе 2013 года в одной из 12-ти часовых смен работы ускорителя на комплекс по производству радиоизотопов с

энергией 143 МэВ интегральная наработка составила 1319 мкА·часов при предписанном рабочем токе 110 мкА, то есть была обеспечена стопроцентная эффективность работы.

Хотя проектом ускорителя и была предусмотрена частота следования импульсов тока пучка 100 Гц, однако, ввиду сложности реализации такого режима, все прошедшие годы работы велись с частотой повторения 50 Гц, чего в принципе было достаточно. Однако задача удвоения частоты следования не отменялась и в последние годы была активизирована. Увеличение частоты открывает возможности повышения интенсивности пучка до двух раз, а также повышения эффективности использования пучка путем его распределения между экспериментальным и изотопным комплексами с помощью системы импульсного магнита, разработанной, изготовленной и установленной ранее на участке промежуточного вывода 160 МэВ.

Для увеличения частоты необходимо было решить задачу удвоения частоты работы инжектора протонов и системы ВЧ питания начальной части ускорителя.

Для инжектора протонов основной проблемой была невозможность обеспечения на частоте 100 Гц стабильности плоской вершины высоковольтного 400 кВ импульса в течение длительности 200 мкс в требуемых пределах  $\pm 0,1\%$ . Проведенные исследования показали, что для преодоления указанной проблемы необходима модернизация генератора высоковольтных импульсов, в частности высоковольтной стойки диодной стабилизации, а именно замена 32-х высоковольтных дросселей с индуктивностью 7 Гн на дроссели с увеличенной индуктивностью до 20 Гн. Такие дроссели были разработаны, изготовлены и установлены. Также на инжекторе протонов была проведена модернизация системы питания ионного источника и системы управления. В результате выполненной модернизации в 2013 году была достигнута стабильная работа инжектора на частоте 100 Гц с длительностью импульсов до 200 мкс. Благодаря модернизации системы питания ионного источника и системы управления обеспечено формирование 100-герцовой последовательности не идентичных импульсов, а двух 50-герцовых последовательностей импульсов тока пучка на выходе инжектора независимо для каждой последовательности.

Для системы ВЧ питания начальной части ускорителя помимо очевидных проблем, связанных с удвоением средних мощностей при переходе с 50 Гц на 100 Гц, которые были успешно преодолены, наиболее сложной оказалась проблема модуляции импульсов поля в ускоряющих резонаторах, следующих с частотой 100 Гц, частотой 50 Гц, то есть бипериодичность импульсов и, как следствие, бипериодичность параметров продольного движения пучка. В результате проведенных исследований было обнаружено, что причиной указанного эффекта является питание накальных цепей двух мощных генераторных и одной

модуляторной ламп с катодами прямого накала от сети переменного тока в шести каналах усиления. Проблема была практически преодолена путем подбора фаз сети для питания накалов, а также путем подбора моментов начала формирования ВЧ импульсов относительно фазы сети.

С целью увеличения интенсивности пучка на изотопном комплексе создана система быстрой развертки пучка на мишени, включающая быстрый дефлектор, систему питания и систему управления. Круговая (эллиптическая) развертка пучка осуществляется с частотой около 5 кГц, что при длительности импульса пучка 200 мкс соответствует одному обороту. Благодаря развертке уменьшается не только средний, но и импульсный нагрев материала мишени, что позволяет поднять допустимую интенсивность используемого пучка. Отклонение пучка осуществляется магнитными полями катушек специальной формы, являющимися элементами высоковольтных резонансных контуров. Использование резонанса позволило снизить потребляемую от сети мощность до уровня 500 Вт. В 2013 году система была смонтирована, налажена и испытана на ускорителе с пучком.

В 2013 году осуществлено реальное разделение пучка протонов на участке промежуточного вывода (160 МэВ) между изотопным и экспериментальным комплексом с помощью системы импульсного магнита. Инжектор протонов и система ВЧ питания начальной части ускорителя работали на частоте 100 Гц, импульсный магнит на частоте 50 Гц. Для уменьшения средней интенсивности из-за ограничений тока в поглотителе пучка, установленного на входе экспериментального комплекса, из последовательности импульсов 100 Гц на инжекционном тракте ускорителя с помощью существующего чоппера выделялась последовательность импульсов 20 Гц, которые ускорялись до энергии 100 МэВ. Далее половина импульсов, через импульс, транспортировалась без ускорения до участка промежуточного вывода, где с помощью импульсного магнита отклонялась И транспортировалась на изотопный комплекс. Вторая половина импульсов ускорялась до энергии 143 МэВ и транспортировалась на вход экспериментального комплекса. Была выполнена оптимальная настройка фокусирующего канала, позволившая осуществить одновременную транспортировку с допустимым уровнем потерь на уровне десятых долей процента двух пучков разной энергии на изотопный и экспериментальный комплексы.

Завершено выполнение договора на 2011-2013 годы Института с ФГУП «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» на основании Государственного контракта № 16.522.12.2012 по теме: «Разработка технологии производства стронция-82 – сырья для получения радиофармакологических препаратов», заключённого между Министерством образования и науки и ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ» в рамках федеральной целевой программы «Исследования и

разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы» по теме: «Разработка и изготовление быстрого дефлектора и системы ВЧ питания начальной части ускорителя, устройства для облучения мишенного материала и инжектора для реализации технологического процесса получения стронция-82 облучением опытных образцов рубидиевых мишеней протонами».

В 2013 году выполнены четвёртый этап договора «Опытная эксплуатация» и завершающий пятый этап «Изготовление опытного образца и проведение испытаний». Конкретно выполнены следующие работы:

- Изготовлено два комплекта каскадов усиления на лампах ГИ-57А и ГИ-71А.
- Выполнены монтаж, наладка, испытания и опытная эксплуатация двух комплектов каскадов усиления на лампах ГИ-57А и ГИ-71А в штатной аппаратуре линейного ускорителя.
- Выполнены испытания аппаратуры системы ВЧ питания ускорителя на частоте повторения импульсов 100 Гц.
- Изготовлен, смонтирован, налажен и испытан быстрый дефлектор.
- Выполнена опытная эксплуатация быстрого дефлектора.
- Изготовлены и смонтированы высоковольтные дроссели для стойки диодной стабилизации.
- Проведены испытания инжектора и его систем (генератор высоковольтных импульсов, система питания ионного источника, вакуумная система).
- Выполнены испытания инжектора на частоте повторения импульсов 100 Гц.
- Выполнена опытная эксплуатация инжектора.
- Разработаны программы и методики предварительных и приемо-сдаточных испытаний.
- По результатам предварительных испытаний доработана конструкторская документация и выпущена документация с литерой О.
- Изготовлена опытная партия отреставрированных ламп ГМИ-44А в кол-ве 5 шт.
- Успешно проведены приемо-сдаточные испытания инжектора, системы ВЧ питания, быстрого дефлектора.
- Облучены и поставлены в ФЭИ четыре образца мишени по разработанной процедуре.
- По результатам приёмо-сдаточных испытаний доработана конструкторская документация и выпущена документация с литерой О<sub>1</sub>.

В 2013 году в Отделе ускорительного комплекса выполнялись работы и для других Российских и зарубежных ускорительных центров:

- По договору с Los Alamos National Security, LLC, США продолжалось выполнение НИР по теме «Разработка, изготовление, поставка и наладка двух измерителей формы сгустков (BSM) для линейного ускорителя Лос-Аламосского центра LANSCE».
- По договору с Корпорацией SHOSHIN, Япония завершено выполнение НИР по теме «Разработка, изготовление и поставка опытных образцов измерителей формы сгустков для японского ускорительного исследовательского комплекса J-PARC».
- По договору с ЦЕРН, Швейцария завершено выполнение НИР по теме «Разработка, изготовление, лабораторные испытания, поставка и наладка измерителя продольного распределения заряда в сгустках для ускорителя Linac-4 ЦЕРН».
- По договору с ЦЕРН, Швейцария начато выполнение НИР по теме «Разработка, изготовление, лабораторные испытания, поставка и наладка измерителя продольного распределения заряда в сгустках для канала транспортировки из ускорителя Linac-4 в бустер».
- По договору с ОИЯИ начато выполнение НИР по теме «Разработка оборудования диагностики пучка для ЛУ-20 и HILAC комплекса NICA ОИЯИ».
- По договору с ФБГУ ГНЦ ИФВЭ начато выполнение НИР по теме «Оптимизация, разработка и исследование ускоряющих структур и схем фокусировки участков нормально проводящего сильноточного линейного Ускорителя (ЛУ) отрицательных ионов водорода в диапазоне энергий от 18 МэВ до 400 МэВ для проекта ОМЕГА».
- По договору с ФБГУ ГНЦ ИФВЭ выполнена НИР по теме «Разработка эскизного проекта модернизации источника ионов водорода в каскаде ускорителей ЛУ-30 и У-1,5 для увеличения мощности дозы радиационных полей на стенде для испытаний радиационной стойкости детекторов ионизирующего излучения нового поколения в здании 3Б».

В 2013 году в Отделе ускорительного комплекса выполнялся проект РФФИ № 12-02-31006 «Исследование пределов применимости двумерной ионизационной диагностики пучков заряженных частиц на ускорителях» Проект завершен.

#### 2 Экспериментальный комплекс Московской мезонной фабрики

## 2.1 Проводка пучков на установки СВЗ, РАДЭКС, ИН-06, комплекс протонной терапии

Была обеспечена проводка пучка с малыми потерями на экспериментальные установки при параметрах пучка, удовлетворяющих условиям эксперимента.

Была произведена модернизация оборудования канала транспортировки пучка, которая позволяет проводить пучок протонов как к Комплексу протонной терапии ИЯИ РАН, так и к нейтронным физическим установкам на мишени РАДЭКС. Также возможна одновременная работа ИНИ и РАДЭКС.

Продолжалась создание оптической схемы канала протонной терапии для независимого изменения энергии пучка, без изменения энергии ускорителя, которая обеспечивает уникальные параметры пучка для облучения опухолей любой локализации и значительного размера (до 10 см) в широком диапазоне энергии протонов (от 74 до 209 МэВ).

#### 3 Радиотерапия

По направлению исследований «Технология производства нового источника для брахитерапии на основе иттербия» были получены следующие основные результаты:

• На установках нейтронного комплекса ИЯИ РАН была проведена активация новых источников тепловыми нейтронами и исследован спектр излучения новых источников собственного производства. Было показано, что спектр излучения источников соответствует медицинским требованиям.

• Была усовершенствована технология изготовления основной части источников - иттербиевых сердечников. В результате этих работ совместно с ИФВД РАН были достигнуты рекордные значения плотности керамического сердечника (более 9 г/см<sup>3</sup>). Это позволяет повысить активность источников при сохранении их стандартных размеров. Кроме того, полученные сверхплотные керамические сердечники имеют стекловидную поверхность (см. рисунок 1, где изображены сердечники на миллиметровой шкале), что позволяет использовать их без внутреннего контейнера источника. Это позволяет упростить технологию производства источников и повысить их качество. Данная работа заняла второе призовое место в совместном конкурсе проектов Сколково - Вариан 2013 года.

По направлению исследований «Разработка методов дистанционной радиотерапии» были получены следующие основные результаты:

• Завершена разработка нового оригинального программного кода Монте-Карло 'TRACK' для расчета протонных дозовых распределений в тканях головы с учетом магнитной оптики канала транспортировки пучков. Эта программа не уступает лучшим зарубежным аналогам.

• Были получены и исследованы распределения интенсивности терапевтического пучка протонов в фантомах головы и тела человека. Проведенные измерения показали наилучшее в России качество медицинского пучка протонов, определяемое однородностью выделенной в очаге дозы.

• Продолжены работы по развитию технологии лучевой терапии на конвенциальных установках ИЯИ РАН (ускоритель электронов СЛ-75 и рентгенотерапевтический аппарат). С участием больницы РАН в г. Троицка получили высокотехнологичное лучевое лечение 60 человек, из них 20 на ускорителе

электронов с использованием инновационных разработок сотрудников ИЯИ РАН: 3D–планирование с использованием томографа, фиксация пациента и т.д. При этом было обеспечено высокое качество лучевой терапии.

• Смонтировано и освоено новое сложное оборудование медицинского назначения: микроскоп 268 электронный Morgagni для исследований радиобиологической эффективности облучения и рентгеновские радиографические системы для контроля положения головы пациента при протонной лучевой терапии. Ha электронном микроскопе начаты работы по изучению относительной биологической эффективности (ОБЭ) облучения клеток.

По итогам работы Центр лучевой терапии ИЯИ РАН был награждён в 2013 г. Золотой медалью 14-го Московского Международного форума «Высокие технологии XXI века».

Успешно защищена в МИФИ с оценкой «отлично» дипломная работа И.А.Яковлева по теме «Расчёт системы формирования пучка протонов Комплекса протонной терапии ИЯИ РАН».



Рисунок 3. Образцы полученных сверхплотных иттербиевых сердечников на миллиметровой

шкале

#### 4 Радиоизотопные исследования

4.1 Изучение процесса по прямому извлечению стронция-82 методом сорбции

из жидкого рубидия из реальных мишеней, облучённых в ИЯИ РАН

В рамках соглашений О НАУЧНОМ СОТРУДНИЧЕСТВЕ МЕЖДУ ФЕДЕРАЛЬНЫМ ГОСУДАРСТВЕННЫМ БЮДЖЕТНЫМ УЧРЕЖДЕНИЕМ НАУКИ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАН (ИЯИ РАН),КОМПАНИЕЙ NUCLEAR MEDICINE SOLUTIONS, Inc. (NMS) (тема соглашений: Исследования с радиоизотопами для научных и медицинских целей, номер соглашения: NMS 130114, дата соглашения: 14 января 2013 г. и NMS 131010, дата соглашения: 1 октября 2013 г.) проведены работы, включающие в себя исследования в процессе облучения мишеней на ускорителе ИЯИ РАН, отправку облученных мишеней с образовавшейся активностью стронция-82 в Лос-Аламосскую национальную лабораторию для проведения дальнейших исследований:

а) Проведение облучения двух рубидиевых мишеней на установке изотопного комплекса на ускорителе 21 янв.-04 фев. 2013 г.

б) Проведение облучения рубидиевой мишени на установке изотопного комплекса на ускорителе 25 фев.- 04 мар. 2013 г.

в) Проведение облучения рубидиевой мишени на установке изотопного комплекса на ускорителе 25 мар.- 01 апр. 2013 г.

г) Проведение облучения рубидиевой мишени на установке изотопного комплекса на ускорителе 1 апр. - 8 апр. 2013 г.

д) Проведение облучения рубидиевой мишени на установке изотопного комплекса на ускорителе 4 окт. - 11 окт. 2013 г.

В результате этих исследований изучен процесс наработки стронция-82 в различных стандартных режимах облучения на ускорителе с исходной энергией протонов 143 МэВ и получено значительное количество стронция-82, который использовался для зарядки генераторов рубидия-82 для проведения кардиологической диагностики с помощью ПЭТ в России и США.

#### 4.1.1 Повышение скорости наработки стронция-82.

Для повышения производительности наработки стронция-82 исследовали вращение пучка протонов при облучении рубидиевых мишеней старой (толщина слоя Rb h=3,03 см и начальная энергия протонов Ep = 143 MэB) и новой (h=2,34 см и Ep = 100 MэB) конструкции. Это позволяет рассеивать пучок и облучать мишени с большим током. Предварительные расчеты, выполненные с помощью программного комплекса ANSYS, показали, что вращение

пучка приводит к более равномерным тепловым нагрузкам, в результате чего можно повысить интенсивность облучения мишени и скорость наработки стронция-82.

Работу магнитов, вращающих пучок протонов, изучали, облучая Al пластины (фольги) размером 90×(33-36)×0.1 мм. Изменяли начальную энергию Ep протонов и ширину пучка (в первом приближении считали пучок Гауссовым с начальной σ). Для каждой пары исходных параметров Ep и σ облучали две Al пластины – одну без вращения пучка, другую с вращением. Вращение пучка создавали, подавая ток на катушки, отклоняющие пучок по оси X и Y (I(x) и I(y), соответственно).

Затем облученные Al пластины сканировали, т.е. измеряли активность отдельных частей каждой пластины с помощью дозиметра с гамма-счетчиком и коллиматора, изготовленного из свинцовых кирпичей, и таким образом восстанавливали форму пучка протонов. Рисунки 4 и 5 иллюстрируют влияние вращения пучка на его форму при облучении Al пластин с разной начальной энергией протонов, соответствующей старой и новой конструкции рубидиевой мишени.



Рисунок 4. 3D - изображение формы пучка протонов с вращением и без, построенное по результатам сканирования, соответствующее старой конструкции рубидиевой мишени.



Рисунок 5. 3D - изображение формы пучка протонов с вращением и без, построенное по результатам сканирования, соответствующее новой конструкции рубидиевой мишени.

Проведены подготовительные работы по облучению рубидиевых мишеней определению вращающимся пучком протонов И воспроизводимых эмпирических соотношений между исходными параметрами (Ер, σ, I(x) и I(y)) и реально получаемой формой пучка.

#### 4.1.2 Развитие метода наработки стронция-82 на ускорителе ИЯИ РАН

В рамках договора ИЯИ РАН с ГНЦ РФ Физико-энергетический институт (Обнинск) проведено облучение рубидиевой мишени на установке изотопного комплекса на ускорителе 01-04.10.2013, и облученная мишень отправлена на переработку в ГНЦ РФ-ФЭИ для выделения стронция-82 и зарядки генератора рубидия-82 в РНЦ РХТ (С-Петербург) (см. ниже).

4.1.3 Внедрение технологии получения стронция-82 на новом комплексе

#### ARRONAX (Франция)

В рамках Соглашения о научном сотрудничестве между ИЯИ РАН и ARRONAX GIP были проведены подготовительные работы, тестовые облучения Rb мишени током протонов высокой интенсивности на циклотроне ARRONAX и выделение 82Sr в горячих камерах ARRONAX по технологии ИЯИ РАН.

Тепловые нагрузки, возникающие в Rb мишени при облучении током протонов интенсивностью 50, 100 и 150 μA, рассчитывали с помощью программного комплекса ANSYS. Типичные распределения температур и скоростей движения жидкого Rb внутри мишени

представлены на Рисунке 6 для интенсивности 150 μA и ширины пучка σ = 0.34 см, считая в первом приближении форму пучка Гауссовой.







Рисунок 6. Типичные распределения температур и скоростей движения жидкого Rb внутри облучаемой мишени. Интенсивность тока протонов 150 μA, σ = 0.34 см. Показано сечение, перпендикулярное направлению пучка и соответствующее максимальной температуре Rb.

Зависимость максимальной температуры жидкого облучаемого Rb от интенсивности тока протонов представлена на Рисунке 7 для двух значений ширины пучка:  $\sigma = 0.34$  см и  $\sigma = 0.5$  см.



Рисунок 7. Зависимость максимальной температуры жидкого облучаемого Rb от интенсивности тока протонов.
Расчеты показывают, что Rb мишень может быть безопасно облучена током протонов интенсивностью 150  $\mu$ A. При облучении даже сравнительно узким пучком ( $\sigma = 0.34$  см) максимальная температура Rb ниже температуры его кипения примерно на 100°C.

Проведены облучения Rb мишени током протонов различной интенсивности (см. Рис. 8):

- 50  $\mu$ A (суммарный заряд протонов 55.5  $\mu$ A·ч);
- 100 µА (суммарный заряд протонов 136.9 µА·ч);

- 150 µА (суммарный заряд протонов 254.8 µА·ч).



Рисунок 8. Тестовые облучения Rb мишени на циклотроне ARRONAX.

После каждого этапа облучения проводили визуальную оценку состояния мишени. Не было обнаружено следов воздействия пучка протонов на поверхности Rb мишени, т.е. током протонов ≥150 µA можно облучать производственные мишени.

Для переработки облученных Rb мишеней в горячей камере была изготовлена, собрана и испытана экспериментальная установка, состоящая из 4-х основных частей:

 Печь для нагревания Rb мишени и проведения сорбции стронция при 300°С (Рис. 9a).

2) Бокс с инертной атмосферой (Рис. 9б), оборудованный

- электроплиткой, являющейся дном бокса;

- нейтрализатором металлического Rb;
- механизмом перемещения Rb мишени внутри бокса;
- линиями подачи и отведения жидкостей и газов, а также термопарами.
- 3) Панель управления потоками газов (Рис. 9в).

4) Блок контроля и управления температурой, концентрацией кислорода и влажностью

в боксе с инертной атмосферой (расположен в операторской зоне, см. Рис. 9г).



Рисунок 9а. Печь для нагревания Rb мишени.



Рисунок 96. Бокс с инертной атмосферой. 1 – электроплитка;

2 – нейтрализатор металлического Rb;

- 3 механизм перемещения Rb мишени;
- 4 линии подачи и отведения жидкостей и газов.





Рисунок 9в. Панель управления потоками газов.

Рисунок 9г. Блок контроля и управления температурой, концентрацией кислорода и влажностью в боксе.

На экспериментальной установке была успешно переработана Rb мишень, облученная, как показано на Рисунке 8. Химический выход 82Sr составил 98%.

#### 4.1.4 Усовершенствование конструкции и методики изготовления

медицинского генератора стронций/рубидий-82 для позитронно-эмиссионной томографии

4.1.4.1 Проведение клинических испытаний с использованием высокоактивного Sr/Rb-82 генератора

С целью расширения медицинского диапазона применения генератора 82Sr/82Rb были продолжены клинические испытания элюата из генератора (РНЦ РХТ, г. Санкт-Петербург, Россия, декабрь 2013 г.). Проведены работы по повышению точности введения диагностической дозы при высоких скоростях элюирования «горячего» генератора (активность по стронцию-82 не менее 100 мКи).

#### 4.1.4.2 Изучение различных режимов эксплуатации Sr/Rb-82 генератора

В рамках выполнения государственного контракта № 14.512.11.0108 от 08.07.2013 г. по теме «Разработка основ технологии создания радионуклидного генератора рубидия-82 для диагностики методом позитронной эмиссионной томографии при кардиологических и онкологических заболеваниях» (заказчик – Минобрнауки РФ) проведен анализ основных факторов, определяющих конструкционные параметры генератора рубидия-82 (защитный контейнер с размещенной внутри него генераторной колонкой). Показано, что эффективность элюирования рубидия-82 из генераторной колонки уменьшается с ростом скорости подачи элюента.

Диагностическая доза радиофармпрепарата на основе рубидия-82, необходимая для проведения исследования методом позитронной эмиссионной томографии, может быть получена даже при небольших скоростях подачи элюента, что значительно упрощает условия проведения исследования пациентов, а также позволяет повысить надежность самого генератора при его эксплуатации и дает возможность применять стандартные, недорогие насосы в качестве инфузоров. Результаты работы приняты к опубликованию в виде статьи в журнале «Радиохимия». Подана заявка на патент.

Совместно с РНЦ РХТ проведены испытания генератора рубидия-82 в условиях реальной эксплуатации (высокая скорость элюирования и большой объем элюента). Показано, что проскок изотопов стронция-82 и стронция-85 в элюате из генератора, изготовленного в РНЦРХТ, достигает предельного допустимого значения (0,02 и 0,2 кБк/МБк рубидия-82 соответственно) при элюировании не менее 19 л изотонического 0,9% раствора хлорида натрия.

Таблица 1. Проскок изотопов стронция-82 и стронция-85 при больших объемах элюента (предельное допустимое значение 2,0·10<sup>-2</sup> и 2,0·10<sup>-1</sup> кБк/МБк рубидия-82 соответственно).

Объем элюента, л	Проскок изотопов стронция, кБк/МБк рубидия-82	
	Sr-82	Sr-85
12	7,0·10 <sup>-3</sup>	5,0·10 <sup>-3</sup>
13	7,2·10 <sup>-3</sup>	5,5·10 <sup>-3</sup>
14	7,9·10 <sup>-3</sup>	6,0·10 <sup>-3</sup>
15	8,5·10 <sup>-3</sup>	8,5·10 <sup>-3</sup>

16	8,5·10 <sup>-3</sup>	8,5·10 <sup>-3</sup>
17	9,8·10 <sup>-3</sup>	9,8·10 <sup>-3</sup>
18	1,0·10 <sup>-2</sup>	1,1·10 <sup>-2</sup>
19	1,0·10 <sup>-2</sup>	1,1·10 <sup>-2</sup>
19,5	<b>2,2</b> ·10 <sup>-2</sup>	2,5·10 <sup>-2</sup>

Совместно с РНЦ РХТ проведено тестирование гидродинамического сопротивления генераторной колонки при различных скоростях подачи элюента. Полученные результаты представлены на рис. 10. Показано, что для максимальной скорости элюирования, используемой медиками – 90 мл/мин используемая аппаратура должна обеспечивать давление не менее 5,5 атм (5,5·105 Па). Сопротивление генераторной колонки мало изменяется в процессе эксплуатации.



Рисунок 10. Давление на входе в генераторную колонку при различной скорости подачи элюента: толщина слоя сорбента 27 мм, размер частиц сорбента 80-160 мкм

Оценена дозовая нагрузка в колонке «горячего» генератора рубидия-82 и растворе материнского радионуклида стронция-82, используемого при зарядке генератора, а также потенциальная возможность радиационной самостерилизации этих объектов. На основании проведенных расчетов мощности поглощенной дозы ионизирующего излучения из-за распада

радионуклидов стронция-82 и стронция-85 сделан вывод, что все содержимое генераторной колонки генератора с активностью 100 мКи по стронцию-82 и 50 мКи по стронцию-85 становится стерильным через ~70 часов с момента изготовления генератора. Этот же объект с активностью 160 мКи по стронцию-82 радиационно «самостерилизуется» через 47 часов (82Sr/85Sr = 2:1), 35 часов (82Sr/85Sr = 1:1), 30 часов (82Sr/85Sr = 1:1.5), 26 часов (82Sr/85Sr = 1:2) и 21 час (82Sr/85Sr = 1:3). Радиационной самостерилизации подвергается также раствор материнского радионуклида. Например, для раствора объемом 10 см3 время, необходимое для его стерилизации составляет ~100 часов. Тот же объем раствора с активностью 82Sr и 85Sr ~1000 и ~500 мКи соответственно становится стерильным через ~10 часов после расфасовки в герметичную тару.

Примечание. Считается, что изделие становится стерильным при сохранении своих рабочих характеристик, если оно облучено дозой 35 кГр независимо от радиорезистентности загрязняющих микроорганизмов.

4.1.4.3 Изготовление Sr/Rb-82 генератора компанией LEMER PAX (Франция)

#### на основе генератора ИЯИ РАН

В рамках заключенного договора с ARRONAX (Нант, Франция) и фирмой Lemer PAX (Франция) продолжены совместные работы по отработке методики изготовления генератора рубидия-82. С участием сотрудников ИЯИ РАН с 10 по 23 ноября 2013 года были изготовлены два генератора с активностью по стронцию-82 0,1 мКи и 13 мКи для изучения основных рабочих характеристик (выход рубидия-82 и проскок изотопов стронция-82 и стронция-85) в режиме реальной эксплуатации при клиническом применении генератора. Исследования продолжаются. Установка для зарядки генератора представлена на Рисунке 11.

В ходе доработки защитного контейнера для генератора рубидия-82 проведено обсуждение конструкции представленного на Рисунках 12 оптимизированного защитного контейнера (разработчик Lemer PAX, Франция). Отмечено, что конструкция защитной пробки не обеспечивает жесткую (надежную) фиксацию входной и выходной спинальных игл, что затруднит работу оператора при смене пластиковых одноразовых удлинителей при клиническом применении. Отсутствует уплотнительная герметизирующая прокладка между защитной пробкой и внутренней пластиковой защитной емкостью. Участок входной и выходной спинальных игл с резьбой типа луер расположен в углублении ниже уровня кромки защитной пластиковой внутренней емкости, что усложняет работу оператора при смене одноразовых удлинителей и/или стерилизующих фильтров.



Рисунок 11. Установка для зарядки генератора ГР-02 в ARRONAX Нант, Франция (ноябрь 2013 г.)



Рисунок 12. Защитный контейнер генератора рубидия-82 (разработчик Lemer PAX, Франция): а) защитный контейнер и приспособление для извлечения защитной

пробки; б) корпус защитного контейнера, составная защитная пробка, генераторная колонка, крышки

4.2 Разработка новой технологии получения актиния-225 и радия-223 для

терапии онкологических заболеваний

#### 4.2.1 Совершенствование стадий выделения актиния-225

#### 4.2.1.1 Отделение тория методом жидкостной экстракции

Облученный торий растворяли в 7-12М HNO3 с добавлением каталитического количества HF. Для удаления макроколичеств тория использовали экстракционные методы. В качестве экстрагента было выбрано 2 соединения: раствор ТБФ в толуоле (1:1) и раствор Д-2-ЭГФК в толуоле (1:1). Для наилучшего извлечения тория проводили 3 последовательные экстракции раствором ТБФ в толуоле и две Д-2-ЭГФК в толуоле. Полученные данные на Рисунках 13, 14.



Рисунок 13. Суммарная степень извлечения радионуклидов после 3<sup>х</sup> стадий экстракции ТБФ из 7 М HNO<sub>3</sub>.

97,8% тория переходит в органическую фазу после трех экстракций ТБФ и одновременно с ним частично переходят Zr-95, Nb-95, I-131, Nd-147, Pa-233 и др.



Рисунок 14. Суммарная степень извлечения радионуклидов после 2<sup>х</sup> стадий экстракции Д-2-ЭГФК из 7 М НNO<sub>3</sub>.

При экстракции Д-2-ЭГФК уже после первой стадии в органическую фазу переходит до 98,7% 227Th и 233Pa. После двух стадий 227Th, 233Pa, 95Zr полностью переходят в органическую фазу.

Таким образом, для удаления макроколичеств тория наиболее эффективной является экстракция Д-2-ЭГФК.

После удаления макроколичеств тория остается смесь радионуклидов, присутствующих в растворе в микроколичествах. Для выделения чистой актиниевой фракции из полученной смеси использовали экстракционно-хроматографические сорбенты DGA Resin, Ln Resin и TRU Resin.

# 4.2.1.2 Предварительное концентрирование и очистка с использованием сорбента DGA

Оптимальные условия проведения эксперимента были выбраны согласно литературным данным. Сорбцию проводили 6 М НNO3, последующую десорбцию – 0,01 М НNO3. Полученные результаты представлены на Рисунке 15.



Рисунок 15. Кривая элюирования с колонки DGA Resin. Сорбция проводилась из 6 М HNO<sub>3</sub>, десорбция 0,01 М HNO<sub>3</sub>.

При пропускании раствора 6 М HNO3 сорбируются актиний, лантан, церий, неодим, то есть достигается предварительное концентрирование актиниевой фракции, и выходят радий, цезий, барий, рутений. Последний имеет очень сложную химию и присутствует в растворе в нескольких формах. Актиниевая фракция после десорбции загрязнена лантаном, церием и неодимом.

## 4.2.1.3 Предварительное концентрирование и очистка с использованием сорбента Ln Resin

Согласно литературным данным оптимальной для сорбции на Ln Resin является 0,05 М HNO3. Для оптимизации разделения актиния и РЗЭ десорбцию проводили HNO3 разной концентрации (0,1 M, 0,15 M, 0,3 M, 1 M и 3 M).



Рисунок

16. Кривая элюирования с колонки Ln Resin. Сорбция проводилась из 0,05 М HNO<sub>3</sub>, десорбция 3 М HNO<sub>3</sub>.

Из рисунка 16 видно, что при десорбции 3 М HNO3 вместе с актинием элюируются лантан, церий, неодим и рутений. Удается очистить актиниевую фракцию от радия, цезия, бария. Значительная часть рутения выходит при элюировании 0,05 М HNO3, но актиниевая фракция также загрязнена его следовыми количествами. При десорбции 1 М HNO3 наблюдается аналогичная картина. При десорбции 0,3 М HNO3 начинается частичное разделение трехвалентных ионов между собой. При десорбции 0,1 М HNO3 (Рисунок 17) удалось получить наиболее чистую актиниевую фракцию.



Рисунок 17. Кривая элюирования с колонки Ln Resin. Сорбция проводилась из 0,05 М HNO<sub>3</sub>, десорбция 0,1 М HNO<sub>3</sub>.

Из рисунка 17 видно, что актиний загрязнен лантаном (12% от общей активности лантана) и примесью рутения (4,5% от общей активности рутения). Удалось не только предварительно концентрировать актиниевую фракцию и очистить от одно- и двухвалентных ионов, но и полностью очиститься от церия и неодима, что значительно упрощает дальнейшее выделение актиния.

#### 4.2.1.4 Хроматографическое разделение актиния и легких РЗЭ на TRU Resin

Сорбцию и десорбцию на TRU Resin проводили в одинаковых условиях в диапазоне концентраций от 2 до 4 М HNO3.



Рисунок 18. Кривая элюирования с колонки TRU Resin в 3 М HNO3.

Для 3М HNO3 наблюдается лучшее разделение (Рисунок 18). Удается полностью очистить актиниевую фракцию от церия и лантана.

Оптимальным разделением компонентов, находящихся в растворе в микроколичествах, является хроматографическая очистка актиниевой фракции в несколько этапов. Либо комбинаия двух смол : DGA Resin и Ln Resin (сорбция 0,05 M HNO3, десорбция – 0,1 M HNO3) или DGA и TRU Resin (сорбция и последующая десорбция 3 M HNO3). То есть для предварительного концентрирования и очистки актиниевой фракции от рутения наилучшим представляется использовать сорбент DGA Resin, а для отделения актиния от лантанидов либо сорбент Ln Resin, либо TRU Resin.

#### 4.2.2 Применение предложенной методики к переработке реальной ториевой

#### мишени

Для апробации предложенной методики была изготовлена и облучена ториевая мишень. Она представляла собой пластину металлического тория толщиной ~ 3 мм и массой ~ 17,5 грамм, помещенную в герметичную графитовую оболочку, электролитически покрытую никелем. Облучение проводили на линейном ускорителе протонов ИЯИ РАН (Троицк), при этом ток пучка протонов составил ~ 30 мкА, а диапазон энергий протонов – 115-95 МэВ. Затем облученную мишень перевезли в филиал НИФХИ им. Л. Я. Карпова (Обнинск), где в горячей камере провели выделение Ас-225 по следующей схеме.

После механического вскрытия мишени облученный торий растворяли в азотной кислоте с каталитическим количеством (0,004 М) плавиковой кислоты. Концентрация тория в полученном 6 М растворе азотной кислоты составила 0,38 моль/л. Торий удаляли двукратной экстракцией Д-2-ЭГФК в толуоле (1:1), контролируя его поведение γ-спектрометрическим методом. Т.к. после второй стадии экстракции концентрация тория оказалась <<1г/л, перешли к предварительному концентрированию фракции актиния и лантанидов, минуя доочистку от следов тория на смоле TEVA Resin.

Как было показано выше, для проведения этой стадии подходят две смолы: Ln Resin и DGA Resin. Выбор остановили на DGA Resin, т.к. сорбция фракции актиния и лантанидов на этой смоле проходит из сильнокислых растворов азотной кислоты, поэтому возможно водную фазу после экстракции сразу пропускать через колонку с DGA Resin. Десорбцию фракции актиния и лантанидов проводили 0,01 М раствором HNO3.

Окончательное выделение актиния-225 проводили на колонке с TRU Resin в среде 3 М HNO3. В результате спустя две недели после окончания облучения ториевой мишени было получено около 5 мКи актиния-225. Химический выход составил не менее 86%, а радионуклидная чистота препарата – лучше 99,8% (без учета долгоживущего 227Ac), при этом примесь 140La <0,1%, примесь остальных радионуклидов <0,1%.

Таким образом, была продемонстрирована эффективность предложенной методики при переработке высокоактивной ториевой мишени в условиях горячих камер.

4.2.3 Разработка генераторов 225Ac→221Fr→213Bi и 223Ra→219Rn→211Pb

Принцип работы генераторов альфа-излучающих радионуклидов 225Ac (10 дн.)  $\rightarrow$  221Fr (4,9 мин.)  $\rightarrow$  213Bi (45,6 мин.) и 223Ra (11,4 дн.)  $\rightarrow$  219Rn (4,0 c)  $\rightarrow$  211Pb (36,1 мин.) заключается в отделении от материнских радионуклидов промежуточных короткоживущих 221Fr и 219Rn, которые затем распадаются в целевые более долгоживущие 213Bi и 211Pb.

В случае 225Aс→221Fr→213Ві генератора образующийся 213Ві движется вместе с 221Fr в объеме разделяющей среды (элюента). Уравнение объемной активности 213Ві имеет вид:

$$\frac{dA_3}{dV} = \frac{\lambda_3 \lambda_2 A_1^0}{(\lambda_3 - \lambda_2)Q} e^{-\lambda_1 \frac{V_e}{Q}} \left( e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)\frac{V}{Q}} - e^{-(\lambda_3 - \lambda_1)\frac{V}{Q}} \right), \tag{1}$$

где  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$  – постоянные распада 225Ac, 221Fr, 213Bi, соответственно, 1/c;

А10 – исходная активность материнского радионуклида 225Ас, Бк;

Q – скорость пропускания элюента, мл/мин.

225Ac адсорбировали на колонке 1 (Рисунок 19), заполненной экстракционнохроматографической смолой Ac Resin (Eichrom). 221Fr количественно смывали с колонки 1 раствором 0.25 М HNO3.



Рисунок 19. Схема и прототип  $^{225}Ac \rightarrow ^{221}Fr \rightarrow ^{213}Bi$  генератора.

Под действием перистальтического насоса элюат поступал в трубку, причем скорость движения жидкости и длина трубки были рассчитаны так, чтобы обеспечить требуемую

степень распада 221Fr в 213Bi, который адсорбировали на колонке 2, также заполненной смолой Ac Resin. Раствор, выходящий из колонки 2, снова направляли на колонку 2, образуя замкнутый цикл. В результате 213Bi накапливался на колонке 2, достигая векового равновесия с 225Ac.

Постоянная циркуляция жидкости в замкнутом цикле позволяет выводить продукты радиолиза из колонки 1, что снижает радиационные нагрузки на сорбент. Проскока Ас не наблюдали в течение недели эксплуатации генератора при постоянной циркуляции благодаря тому, что смола Ас Resin обладает высоким коэффициентом удерживания Ас (k'~105).

213Ві смывали с колонки 2 раствором 1 М HCl. Общий выход 213Ві составлял ~90%, радионуклидная чистота > 99.5%.

В случае 223Ra→219Rn→211Pb генератора образующийся 211Pb отделяется от 219Rn и становится неподвижным относительно движущейся среды. Уравнение объемной активности 211Pb имеет вид:

$$\frac{d^2 A_3}{dt dV} = \frac{\lambda_3 \lambda_2 A_1^0}{Q} e^{-\lambda_1 t} e^{-(\lambda_2 - \lambda_1) \frac{V}{Q}} - \lambda_3 \frac{dA_3}{dV}$$
(2)

где  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$  – постоянные распада 223Ra, 219Rn, 211Pb, соответственно, 1/c;

A10 – исходная активность материнского радионуклида 223Ra, Бк.

Выделение 219Rn проводили газо-химическим методом. Подложку с радиевой фракцией нагревали и сдували радон током аргона в силиконовую трубку, достаточно длинную для распада 219Rn в 211Pb, который оседал на стенках трубки. Используя кварцевую подложку, достигали количественной сдувки радона при температуре ~800°C (Рисунок 20).



Рисунок 20. Зависимость степени возгонки радона от температуры.

При дальнейшем повышении температуры выход радона снижался, что связано с образованием компактной матрицы силикатов радия, из которой диффузия атомов радона затруднена. Наличие летучих примесей таких, как Ru и Sb, не мешает, т.к. эти элементы, будучи возогнанными, осаждаются на холодном конце кварцевой трубки, на выходе из печки. Поэтому полученный газо-химически 211Pb обладает высокой (>99,9%) радионуклидной чистотой.

Отсутствие сорбента для материнского 223Ra и использование аргона в качестве элюента делает такой генератор неподверженным радиационным нагрузкам. Закончив нагревание, накопленный 211Pb смывали со стенок трубки небольшим объемом 0,25 М HNO3.

## 5 Светосильная спектрометрия электронов, ядерные реакции при низких и средних энергия и перспективные разработки.

5.1 Проблема поиска массы покоя электронного антинейтрино в бета-распаде трития.

#### 5.1.1 Проведение методических измерений.

После полной модернизации системы электроснабжения установки, которая потребовала приложения больших усилий и времени, выполнено комплексное опробование технологического оборудования. На установке был проведён сеанс измерений. Проведена проверка всех элементов установки после монтажа нового спектрометра. Отрабатывалась методика высокоточного исследования формы бета спектра из распадов трития с использованием твёрдотельного имплантированного тритием источника. Выполнена методическая работа с патроном газовой очистки, а также проведение измерений функции пропускания спектрометра для электронов существенно ниже граничной точки при распаде трития. Данная область для нового спектрометра до этого не исследовалась. Эта задача связана с оценкой возможности работы спектрометра и регистрирующей аппаратуры при измерениях в условиях больших загрузок вдали от максимальной энергии бета-спектра. Это является исследовательской работой для изучения принципиальных возможностей поиска сигналов тяжёлых стерильных нейтрино в бета распаде ядер. Проведённая теоретическая и экспериментальная работа показала адекватность модернизированной установки для измерения спектра электронов в интервале энергий 12-19 кэВ.

## 5.1.2 Оценка верхнего предела на возможную примесь стерильных нейтрино в спектре бета-электронов.

Выполнена большая работа по расчётам необходимых параметров установки, возможных вкладов систематических эффектов при исследовании спектра бета-электронов вдали от граничной энергии.

Подготовлена и принята в печать в 2014 г. объёмная статья по описанию математической методики обработки бета спектра с целью оценки верхнего предела на возможную примесь стерильных нейтрино. Полученные результаты, Рис. 21, являются лучшими по оценке возможной примеси тяжёлых стерильных нейтрино в диапазоне масс 2-100 эВ.



Рисунок 21. Ограничение на угол смешивания стерильных и активных нейтрино в области масс от 2 эВ до 100 эВ.

### 5.1.3. Исследование систематики формирования электрического потенциала в объёме газового источника.

За счёт адсорбции трития на внутренней поверхности газового источника меняется работа выхода электронов из материала стенки и, соответственно, сдвигается электрический потенциал вакуума вблизи поверхности. Масштаб эффекта – несколько десятых вольта.

Ранее для исследования параметров распределения потенциала внутри газового источника был поставлен эксперимент, когда в газовом источнике осуществлялась циркуляция криптона-83м, являющегося источником конверсионных электронов. Проводилось сравнение положения и ширины L<sub>3</sub> линии (30 477 эВ) для чистого криптона-83м и его смеси с тритием. При появлении электрического потенциала в источнике его среднее значение и дисперсия будут, в первом приближении, равны сдвигу положения и уширению конверсионной линии криптона-83м. Для исследования влияния адсорбции на потенциал источника предлагается повторить описанный выше эксперимент с заменой в циркуляции через источник трития на водород. Таким образом будет исключено влияние плазмы, создаваемой бета-электронами от распада трития на потенциал источника. Для проведения эксперимента необходимо иметь стабильность напряжения на спектрометре на уровне лучше 0,1 В в течение нескольких суток. Такая возможность была продемонстрирована, Рис.22. СМ. Ведётся работа по термостатированию высоковольтных делителей, что должно позволить реализовать необходимую стабильность.



Рисунок 22. Разность показаний двух каналов измерения высокого напряжения, после введения поправки на изменение внешней температуры.

Возникновение плазмы в газовом источнике обусловлено образованием бетачастицами вторичных электронов с последующей частичной термолизацией их энергетического спектра благодаря взаимодействию с нейтральным газом в источнике.

Осложнение картины процессов в источнике связано с влиянием сильного магнитного поля направленного вдоль стенок источника. Высокая электрическая проводимость плазмы сохраняется вдоль силовых линий магнитного поля и на много порядков подавляется по направлению на стенку. Получается, что потенциал плазмы перестает быть связанным с потенциалом стенок источника и «закорачивается» на «заднюю стенку», расположенную вне источника. Необходима экспериментальная проверка изложенной картины, поскольку она может быть нарушена, если: (а) происходит существенная рекомбинация зарядов в источнике, (б) поток плазмы не достигает задней стенки. Проверить концепцию задней стенки, как элемента определяющего потенциал источника, можно в следующем эксперименте. Как было предложено выше, потенциал в источнике измеряется по параметрам линии криптона при совместной циркуляции в источнике криптона и водорода. Ионизация в источнике создается

с помощью широкоаппертурной электронной пушки (на термо- либо фотоэмиссии). В 2013 году был создан и принят в эксплуатацию экспериментальный стенд для тестирования электронных пушек и детекторов их сигнала.

#### 5.1.4. Модернизация установки «Троицк ню-масс»

Установка создавалась в 1980-е годы, многие её компоненты, в частности, водоохлаждение и электроснабжение потребовали модернизации. В 2013 г. проведена полная модернизация системы электроснабжения установки. Выполнено комплексное опробование всего технологического оборудования после модернизации установки. Замкнутый цикл водяного охлаждения вакуумных насосов установки испытан при полной нагрузке. Ведется модернизация системы высоковольтного питания спектрометра с заменой морально и физически устаревшего оборудования.

#### 5.2 Поиск редких мюонных процессов в эксперименте «mu2e»



Рисунок 23. Эксперимент Mu2e по поиску процесса конверсии мюона на ядре.

#### 5.2.1 Состояние эксперимента «Ми2е» на конец 2013 года

В марте 2012 г. завершена первая стадия CD-0 эксперимента : разработка концепции, оценка стоимости эксперимента. Подготовлен CDR (Conseptual Design Report), который завершает эту работу. Одобрен и утвержден бюджет следующей стадии CD-1 эксперимента комитетом DOE США от 27 июня 2012 г. Планируется завершить стадию CD-1 в начале 2014 г. и переход к стадии CD-2 завершающей создание установки.

#### 5.2.2 Разработка новой концепции (3in1) эксперимента Mu2e

Разработка новой концепции эксперимента (3in1) позволит вести поиск трех редких процессов ( $\mu$ ->е конверсии,  $\mu$ ->е $\gamma$  и  $\mu$ ->еее) на одной установке с одним общим набором модулей детекторов. Переход от одного из трех экспериментов к другому осуществляется простой перестановкой модулей. Велись работы по разработке нового метод поиска редких мюонных процессов, основанного на использовании пульсирующего протонного пучка и объединении источника мюонов, системы формирования пучка и детектирующей части установки в одну магнитную систему с неоднородным полем. Результаты детального моделирования искомых процессов и основных фонов процессов показывает, что разработанный метод повышает чувствительность эксперимента по поиску процессов ( $\mu$ ->е конверсии,  $\mu$ ->е $\gamma$  и  $\mu$ ->еее) по сравнению с существующим уровнем в 10<sup>5</sup>, 300 и 100 раз соответственно.

#### 5.2.3 Исследование основного элемента калориметра на основе кристалла

#### LYSO

В рамках темы, создана установка для исследования основных характеристик кристаллов LYSO, необходимых для прототипа калориметра эксперимента Ми2е. Экспериментальная установка с системой съема информации на основе КАМАК, показана на рис. 3. Установка создавалась с помощью отделов КОРЭ (О. Каравичев, В. Постоев), ОЭФ (Ю. Рябов) и лаборатории ЛФЯР (В. Недорезов, А. Русаков). Сцинтилляционные счетчики с кристаллом NaI используются для выделения распадов радиоактивного источника. Использование двух фотоприемников для регистрации света в кристалле LYSO, позволяет провести измерения основного вклада в энергетическое разрешение с помощью радиоактивного источника. Измерение разницы А1 – А2 и суммы А1 + А2 амплитуд сигналов АРД позволяет оценить стохастический вклад в разрешение калориметра, обусловленный флуктуациями фото статистики и шумами электроники, в области низких энергий. Измерение основных характеристик кристаллов LYSO сопряжено с трудностями, связанными с собственным свечением в кристалле от радиоактивных примесей редко земельного элемента Lu. Интенсивность собственных сцинтилляций составляет величину равную 500 Hz/cm<sup>3</sup>. Для исследуемого кристалла LYSO:Ce (95% Lu/ 5% Y) размером 3x3x5 cm<sup>3</sup>, производства PROTEUS (USA), частота собственных сцинтилляций составляет величину - 18 kHz. Энергетический спектр этих сцинтилляций лежит в области до 1 МэВ.

Основную характеристику кристалла - энергетическое разрешение можно измерить при помощи радиоактивных гамма-источников с интенсивностью превышающих в несколько раз частоту собственных сцинтилляций или с помощью космических мюонов.



Рисунок 24. Схема установки (слева) и внешний вид установки (справа) для исследования свойств кристаллов LYSO .

Использование APD позволит улучшить энергетическое разрешение калориметра практически в два раза, по сравнению с ФЭУ, за счет увеличения квантовой эффективности фото-детектора. Квантовая эффективность APD больше, чем фото-электронного умножителя (ФЭУ) в 3-3.5 раза и составляет величину равную 70-80%. Для работы с APD необходим быстрый мало-шумящий зарядо-чувствительного предусилитель-формирователь. На рис. 25 показана схема пред-усилителя и внешний вид сборки 2х каналов предусилителя-формирователя с высоковольтным фильтром.



Рисунок 25. Схема предусилителя (слева) и внешний вид сборки 2х каналов предусилителяформирователя с высоковольтным фильтром.

Распределение суммарной амплитуды двух лавинных фото-диодов Hamamatsu APD S8664-1010 в кристалле LYSO от источника Со60 моно хроматических гамма-квантов с энергиями 1.17 и 1.33 МэВ показано на Рис. 26. Относительный световыход кристалла LYSO можно оценить статистикой. В таком приближении относительный световыход кристалла LYSO составляет величину равную 70 %.



Рисунок 26. Распределение амплитуд в кристалле LYSO (а) от источника Со60 (б) с излучением монохроматических гамма-квантов с энергиями 1.17 и 1.33 МэВ.

Относительная величина энергетического разрешения ( $\sigma_E/E$ ) кристалла с двумя фото детекторами может быть оценена из относительной ширины пика с энергией 1.33 МэВ и составляет величину равную ( $\sigma_E/E$ ) = 0.026. При этом полная относительная ширина пика (FWHM) равна 6.1%.

Спектр ионизационных потерь космических мюонов в кристалле, смоделированное с помощью GEANT3, хорошо описывается распределением Ландау с максимумом потерь равным 28 МэВ (рис. 27).



Рисунок 27. Спектр ионизационных потерь космических мюонов в кристалле (а). Схема измерения разрешающей способности кристалла LYSO с помощью космических мюонов (б) и внешний вид кристалла LYSO с приклеенными APD1-2 (в).

Относительная разрешающая способность кристалла LYSO (σ<sub>E</sub>/E) может быть оценена из спектра (A1-A2)/(A1+A2) (рис. 7 б) и составляет величину равную σ<sub>E</sub>/E = 0.18%/√E, где E – наиболее вероятная энергия выделенная в кристалле мюоном равная 0.028 ГэВ.



Рисунок 28. Спектр суммы (а) и относительной разности (б) сигналов от двух фото детекторов (APD) при регистрации космических мюонов в кристалле.

Измерено время высвечивания кристалла, показанное на рис. 8 и которое составляет величину равную 50 нсек. Измерения с кристаллом проводились с быстрым фотоэлектронным умножителем HAMAMATSU E2624-08.



Рисунок 29. Время высвечивания кристалла и результат фита экспоненциальной функцией с показателем – 1/0.05 мкс.

#### 5.3 Исследование переходов нейтрон-антинейтрон

В работе используется теоретико-полевой подход с конечными временами, предложенный ранее нами, поскольку только с его помощью можно корректно описать поглощение частиц в конечном состоянии, которое в данном процессе играет решающую роль. Основной акцент делается на изучении собственной энергии частицы. Суть проблемы состоит в следующем.

В гамильтониане взаимодействия осциллирующая частица – среда можно выделить член, с помощью которого генерируется собственная энергия частицы отличная от нуля. В этом случае пропагатор частицы является одетым, а амплитуда процесса не сингулярная. Оценки приводят к сильному подавлению переходов нейтрон-антинейтрон. Слово оценки следует подчеркнуть, поскольку в этом случае амплитуды подпроцессов взаимодействия частица-среда (частица-частица) являются обрезанными и требуют дополнительного изучения.

С другой стороны этот же член можно включить в амплитуду подпроцесса частицасреда (частица-частица в газовом приближении). Тогда пропагатор является голым, а амплитуда сингулярная (инфракрасная расходимость). Для решения проблемы задачу следует формулировать на конечном временном интервале, что и было предложено ранее нами. В результате подавления процесса нет и он идёт также как в вакууме.

В обоих случаях результаты отличаются на много порядков. Какой из случаев реализуется в действительности – не ясно. Никаких критериев для выбора между ними нет. В настоящее время в ряде моделей реакций пропагатор является голым (например, в диаграммной технике прямых реакций), в других подходах он является одетым (например, в импульсном приближении с искаженными волнами).

Таким образом, результат чрезвычайно критичен к величине собственной энергии антинейтрона. Такая же (но менее ярко выраженная) картина имеет место и в осцилляциях других частиц. Поэтому актуальность вопроса очевидна. Поскольку, как отмечено выше, критериев для выбора величины собственной энергии просто нет то ясно, что проблема является очень сложной. Необходимо проанализировать все существующие модели не только осцилляций частиц, но и близких процессов в которых происходит обрастание пропагатора частицы, т. е. генерация собственно энергетической части.

#### 5.4 Изучение релятивистских потоков в астрофизике

Численное моделирование релятивистских радиационно-доминированных ударных волн.

Вероятно, радиационно-доминированные ударные волны являются источником излучения гамма-всплесков в диапазоне десятки – сотни кэВ. Аргументом в пользу этого является узкий спектр – заведомо не синхротронный, но с другой стороны и не равновеснотепловой: энергия фотонов в спектральном пике гамма-всплесков на пару порядков выше той, что можно ожидать для равновесного излучения. Поэтому наиболее вероятным механизмом излучения гамма-всплесков является тепловая комптонизация при большой оптической толще во внутренней ударной волне. Радиационно-доминированная ударная волна, распространяющаяся в оптически-толстой среде является подходящим явлением для закачки большой энергии в фотоны через тепловую комптонизацию.

Работа по численному моделированию радиационно-доминированныз ударных волн более года ведется Борисом Штерном в соавторстве с Амиром Левинсоном (Университет Тель-Авива). Используется программа моделирования электромагнитных взаимодействий и переноса излучения (Комптон эффект, рождение пар, аннигиляция пар, синхротронное излучение) LPMC, написанная Борисом Штерном и использовавшаяся во множестве астрофизических задач в нелинейной постановке (излучение релятивистских джетов, корона аккреционных дисков в равновесии по рождению пар и т.п.). С точки зрения переноса излучения и рождения пар, которое в радиационно-доминированых ударных волнах играет решающую роль, постановка задачи полна и не содержит упрощающих предположений. С точки зрения гидродинамики ударной волны, задача пока что решается на упрощенном уровне – используется пылевое приближение, либо поток фиксируется.

К настоящему времени проведены прикидочные расчёты ударной волны с Лоренц фактором 4, где излучение задается «руками» - перед ударной волной впрыскиваются тепловые фотоны температуры 150 эВ, которые затем диффундируют туда и обратно через ударную волну, набирая энергию и создавая давление, поддерживающее скачок скорости потока. К настоящему моменту установлены следующие факты:

- Спектр фотонов за ударной волной похож на спектр гамма-всплесков, если сместить его на общий Лоренц-фактор порядка сотни.

- Вблизи ударной волны рождается слой электрон-позитронных пар оптической толщей более десяти (по Томсоновскому сечению), которые затем аннигилируют.

Пока не удалось достичь самосогласованности решения. Импульс, уносимый фотонами на 20 - 30 % меньше импульса потока вещества. Требуется более тщательное моделирование гидродинамики фронта волны с учетом нагрева потока. Задача достаточно сложная, требует больших вычислительных ресурсов и до стадии публикации пока не доведена.

Вторая работа завершена и в декабре 2013 отправлена в «Astrophysical Journal» «Загадка спектральных изломов: фотон-фотонное поглощение на Лайман-континууме в спектрах ярких блазаров по данным «Ферми»»

Вновь рассмотрены спектры ярких блазаров с большей статистикой фотонов, чем в предыдущих работах и с новым представлением данных «Pass 7». Общая картина существенно отличается от более ранней: большинство спектров в районе нескольких ГэВ фитируется плавным логнормальным распределение без резких изломов. Исключением является ярчайший блазар 3С 454.3, где излом, связанный с двухфотонным рождением пар на Лайманконтинууме Не II виден на уровне 3 сигма, и возможно также в 4С +21.35.

Исчезновение ряда ГэВ-ных изломов и снижение статистической значимости излома в спектре 3С 454.3 связано главным образом с разницей в калибровках Pass 7 и Pass 6: функция эффективной площади в Pass 6 имеет особенность, которая имитирует излом поглощения около энергии 5 ГэВ и по-видимому не является реальной. С другой стороны мы наблюдаем достоверные изломы в районе 20 ГэВ, связанные с водородным Лайман-континуумом. Они видны как в спектрах отдельных блазаров, так и в суммарном спектре нескольких ярких блазаров, поправленных на красное смещение. Доминирование водородного Лайман-комплекса над Не II, довольно малая наблюдаемая оптическая толща и энергия излома, соответствующая лобовым столкновениям с фотонами Лайман-континуума, подразумевают, что гамма излучение генерируется внутри областей широких линий, содержащих ионизованный водород, но большая часть излучения широких линий идет от плоской дископодобной структуры, создающей малую оптическую толщу. Это решает давно стоящую проблему, как фотоны энергий нескольких сотен ГэВ вылетают, не будучи поглощенными мягкими фотонами.

#### 5.5 Исследование релятивистских ядро-ядерных столкновений на установке

#### PHENIX

Работы, проведённые на установке «PHENIX» в 2013 году. На установке успешно завершён ремонт и замена майларового окна в одной из дрейфовых камер. Это явилось завершением работ, начатых в 2012 г. Установка нового окна позволила избежать крайне сложной ситуации с утечкой горючего газа из объёма камеры. Силами ИЯИ РАН была проведена организационная работа по проектированию, изготовлению и установке нового окна. Работа проводилась на выведенной из экспериментальной зоны камере. В сентябре месяце работа была успешно завершена. Камеры проверены и готовы к началу новых измерений в феврале 2014 года.

В качестве руководителя смены принято участие в 8-ми дневном дежурстве на сменах.

В качестве председателя комиссии по подготовке статьи к публикации, была завершена работа по подготовке статьи в печать "Inclusive cross section and single transverse spin asymmetry for very forward neutron production in polarized p+p collision at  $sqrt{s} = 200$  GeV". Опубликтвана в журнале Physical Review C88 (2013) 032006.

Как член комитета по детекторам В.С.Пантуев участвует в ежемесячных совещаниях комитета.

#### 5.6 Свойства барионов и ядер в топологических и иных солитонных моделях

Произведен анализ проблем, возникающих при сравнении кварковых и киральной солитонной моделей барионов, включая экзотические барионы (содержащие дополнительные кварк-антикварковые пары). Показано, что из результатов кирального солитонного подхода следует неожиданно резкая зависимость эффективной массы странного антикварка от SU(3) – мультиплета, к которому относится барион со странностью +1. Статья [1] помещена в электронном архиве и направлена в журнал.

Продолжен анализ свойств реакций кумулятивного рождения частиц на ядрах (рождение на большие углы, в областях, кинематически запрещенных для взаимодействия с изолированным нуклоном) и сравнение с данными, полученными в последние годы (совместно с Г.К.Матушко и И.Поташниковой). Ряд свойств реакций кумулятивного рождения находит объяснение в рамках механизма последовательных кратных взаимодействий.

Аналитически доказано существование эффекта аксиальной фокусировки частиц, вылетающих из ядер на углы, близкие к 180 град. (В.Копелиович, Г.Матушко, И.Поташникова). Этот эффект подобен оптическому, а также атмосферному явлению глория. Статья на эту тему готовится к печати.

Завершена физическая программа экспериментов для проекта Project-X, FNAL.

В.Копелиович участвовал в разработке той ее части, которая относится к поиску возможных переходов нейтронов в антинейтроны. Планируется поиск осцилляций нейтрон-антинейтрон с помощью источника холодных нейтронов высокой интенсивности на базе сильноточного линейного ускорителя протонов. Ожидаемое ограничение на время осцилляции в вакууме превышает 10<sup>10</sup> сек.. [2,3,4]

Доклады, представленные на конференции Confinement X, Munich, Germany, в 2012 г., опубликованы в трудах конференции PoS ConfinementX в 2013 г. [5,6,7]

### 5.7 Исследование подпорогового рождения лёгких векторных мезонов и заряженных каонов в протон и фотоядерных реакциях

#### 5.7.1 Свойства η'-мезона в ядерной среде

Проведен детальный анализ первых экспериментальных данных по околопороговому фоторождению eta/prime мезонов на ядрах, полученных коллаборацией CBELSA/TAPS (Германия) на ускорителе ELSA в рамках разработанной нами современной теоретической модели. Эта модель учитывает как прямой, так и двухступенчатый механизмы образования eta/prime мезонов, а также модификацию их свойств в ядерной материи. Из сравнения расчетов с экспериментальными данными по А-зависимости относительного выхода этих мезонов извлечена величина сечения неупругого eta/prime-нуклонного взаимодействия 6-10 мбарн (см. рис. ниже)-или величина мнимой части оптического eta/prime-A потенциала, что указывает на слабость этого взаимодействия и согласуется с предсказаниями ряда основанных на QCD адронных моделей. Впервые показано, что полученные экспериментальные данные не позволяют сделать выбор в пользу одного из двух конкректных рассмотренных нами сценариев по ренормализации свойств (массы) данных мезонов в ядерной среде, также предсказанных основанными на QCD адронными моделями. А для прояснения этой ситуации, как также впервые продемонстрировано в нашей работе, необходимо измерить импульсные спектры этих мезонов на ядрах или соответствующие функции возбуждения. Следует особо отметить, что полученные нами результаты послужили обоснованием нового проекта по изучению свойств eta/prime мезонов в ядерной среде коллаборацией CBELSA/TAPS.



Figure 4. The same as in figure 3, but for the interaction of 1.9 GeV photons with the considered target nuclei.

На втором этапе этой работы проведён дальнейший анализ первых экспериментальных данных по околопороговому фоторождению eta/prime мезонов на ядрах, полученных коллаборацией CBELSA/TAPS (Германия) на ускорителе ELSA в рамках разработанной нами модели и опубликованной в работе: E. Ya. Paryev. Photoproduction of eta/prime mesons off nuclei and their properties in the nuclear medium. J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 40 (2013) 025201.

Из сравнения детальных расчетов В рамках этой модели с первыми экспериментальными данными по функции возбуждения eta/prime мезонов на ядре углерода и их импульсному спектру (см. рис. ниже) извлечена величина действительной части eta/prime-С оптического потенциала (или, сдвига массы eta/prime мезонов в ядерной среде) при нормальной ядерной плотности: -(37+-10stat+-10syst) МэВ, что согласуется с предсказаниями ряда основанных на QCD адронных моделей и имеет важное значение для поиска eta/prime мезоядерных связанных состояний в новых экспериментах, одобренных к проведению в Германии и Японии.



Fig. 6. (Colour online.) Left: Momentum distribution for  $\eta'$  photoproduction off C for the incident photon energy range 1500–2200 MeV. The calculations are for  $\sigma_{\eta'N} = 11$  mb and for potential depths V = 0, -25, -50, -75, -100 and -150 MeV, at normal nuclear density, respectively. All calculated cross sections have been reduced by a factor 0.75 (see text). Middle: The experimental data and the predicted curves for V = -25, -50, -75, -100 and -150 MeV divided by the calculation for scenario of V = 0 MeV and presented on a linear scale. The colour code is identical to the one in Fig. 4. Right:  $\chi^2$ -fit of the data with the calculated momentum distributions for the different scenarios.

#### 5.7.2 ИЗУЧЕНИЕ АНТИКАОН-ЯДЕРНОГО ОПТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА

Проведён заключительный этап анализа полученных впервые коллаборацией ANKE в рамках совместного российско-германского эксперимента на ускорителе COSY-Juelich (Германия) данных по нерезонансному рождению каонных пар в рА реакциях при энергии первичных протонов 2.83 ГэВ с целью определения величины притягивательного антикаонядерного оптического потенциала ("мелкого" или "глубокого"), представляя-ющей большой интерес для современной ядерной и адронной физики как с точки зрения возможного существования "странной" ядерной материи - каонного конденсата - в таких компактных звездных объектах как нейтронные звёзды, так и с точки зрения возможного существования таких новых ядерных объектов как глубокосвязанные каонные состояния K(-)pp, K(-)ppn, K(-)pnn, K(-)ppnn, каон и мульти-каон связанные ядерные состояния. В рамках разработанной нами современной физической модели, учитывающей прямые и двухступенчатые процессы нерезонансного образования К(+)К(-) пар, проведены численные расчеты абсолютных и относительных сечений рождения этих пар на ядрах С, Си, Ад, Аи в аксептансе спектрометра ANKE. Сравнение (его пример показан на приведенном ниже рисунке) рассчитанных по этой модели и измеренных сечений говорит в пользу существования сравнительно глубокого К(-)А оптического потенциала. Следует отметить, что аналогичный вывод о величине этого потенциала был также сделан недавно из анализа совершенно другого класса ядерных наблюдаемых, а именно: (К<sup>-</sup>, n) и (К<sup>-</sup>, р) спектров, измеренных в КЕК (Япония) на ядрах углерода и кислорода при импульсе антикаона 1 ГэВ/с (A.Gal, arXiv:1008.3510 [nucl-th]).

#### 5.8 Поиск тёмной материи Вселенной

В отличие от развиваемых в ведущих лабораториях мира проектов создания аргоновых детекторов большой массы, в нашем предложении фон Ar39 будет практически полностью подавлен за счёт сравнения для каждого события ионизационного S2 и сцинтилляционного S1 сигналов. Для фоновых электронов и ядер отдачи при рассеянии ВИМП, при эффективности детектирования сцинтилляционных сигналов равной 50% и при подавлении триплетной компоненты сцинтилляционных сигналов, отношения (S2/S1-) = 645 (электроны), 5,31 (альфа-частицы) и 13,3 (ядра отдачи), соответственно. Эффективность регистрации сцинтилляционных сигналов, равная 50%, достигается за счёт добавления в аргон 0.15 фоточувствительной добавки ppm Ge(CH3)4. Триплетная компонента сцинтилляционного сигнала аргона подавляется добавкой в аргон 100 ppm ксенона.

В процессе разработки проекта ранее были выполнены следующие работы:

- Разработаны методы сверхглубокой очистки газов (10-11 экв. О2).

- Разработаны сверхчувствительные методы определения чистоты газов по содержанию электроотрицательных примесей (до 10-12 экв. О2).

- Разработаны надёжные и стабильные GEM, без которых говорить о создании установок ArDM, Дарвин, ИЯИ РАН бессмысленно.

- Впервые разработан светозащитный экран, устраняющий обратную связь по фотонам.

В 2013 году изготовлен макет детектора, заполняемого аргоном с фоточувствительной добавкой этилена. Результаты опубликованы в журналах ПТЭ, письма в ЖЭТФ, доложены на международной конференции в Новосибирске.

#### 5.9 Внедрение в медицинскую практику технологии лечения смесями

#### благородных газов с кислородом

Работа проводится совместно с Больницей РАН в г. Троицке. Проведены испыта-ния смесей Ar+O2 для устранения депрессии, стрессов, гипертонии, улучшения репродуктивной функции.

Показано, что терапия смесями Ar+O2 устраняет депрессию, стрессы, гипертонию, улучшает репродуктивную функцию.

Результаты опубликованы в препринтах ИЯИ РАН.

#### 5.10 Исследование аномального электромагнетизма в углеродных конденсатах

С.Г.Лебедев аккредитован и включен в Федеральный реестр экспертов научнотехнической сферы Минобрнауки. Регистрационный номер 4694.

Продолжаются работы по проекту «Разработка бесконтактных переключателей - ограничителей тока для электрических сетей» и функционирование компании ООО «Каррент Лимитед» - резидента инновационного центра «Сколково».

Подана заявка на грант РФФИ «Разработка быстродействующих углеродных бесконтактных токоограничителей для электрических сетей» № <u>14-08-00135</u>-а.

Подана заявка «Разработка бесконтактных переключателей- ограничителей тока для электрических сетей» в ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы", №1822.

Проект «Бесконтактный быстрый самоограничитель тока на углеродной пленке для электрических сетей» представлен на встрече с инвесторами - бизнес – ангелами в Сколково 23 июля 2013 г.

Проект «Каррент Лимитед: Разработка бесконтактных токоограничителей для электрических сетей» представлен на сессии Троицкого инновационного кластера 3 декабря 2013 г.

Предложение «Исследование магнитной структуры нанографитовых пленок» включено в «Программу перспективных исследований на ММФ».

Предложение «Измерение методом нейтронного активационного анализа накопления космогенного изотопа 53Mn в образцах земного грунта с целью реконструкции ретроспективной динамики космических лучей, а также периодов оледенений, водных погружений, вулканических извержений и изменений климата», включено в «Программу перспективных исследований на ММФ».

Предложение «Разработка радиохимических методов контроля интенсивных нейтронных потоков, пространственного распределения нейтронных полей и термометрии термоядерной плазмы», включено в «Программу перспективных исследований на ММФ».

Тема: «Разработка бесконтактных переключателей - ограничителей тока для электрических сетей», предложена в тематику исследований и разработок по областям государственной программы "Развитие науки и технологий" на 2013 - 2020 годы Минобрнауки.

Тема: «Реконструкция ретроспективной динамики криосферы и изменений климата с помощью анализа накопления космогенных изотопов» предложена в тематику исследований

и разработок по областям государственной программы "Развитие науки и технологий" на 2013 - 2020 годы Минобрнауки.

Тема: «Разработка радиохимического газового монитора нейтронного потока и детектора пространственного распределения плотности потока быстрых нейтронов в ядерном реакторе» предложена в тематику исследований и разработок по областям государственной программы "Развитие науки и технологий" на 2013 - 2020 годы Минобрнауки.

Тема: «Разработка метода термометрии термоядерной плазмы пропорциональным детектором с использованием эффекта Брега» предложена в тематику исследований и разработок по областям государственной программы "Развитие науки и технологий" на 2013 - 2020 годы Минобрнауки.

Обновлен сайт группы http://www.serleb.narod.ru , где представлена информация о проектах группы и всех сопутствующих мероприятиях.

# 5.11 Разработка технологии, получение опытных образцов и исследование особенностей электродинамики нанокристаллических композитов фононных резонаторов (НФР)

С.Г.Лебедев аккредитован и включён в Федеральный реестр экспертов научнотехнической сферы Минобрнауки. Регистрационный номер 4694.

Тема: «Разработка технологии получения нанокомпозита «фононных резонаторов» предложена в тематику исследований и разработок по областям государственной программы "Развитие науки и технологий" на 2013 - 2020 годы Минобрнауки.

На обновленном сайте группы <u>http://www.serleb.narod.ru</u> представлено описание проекта.

### 5.12 Исследование ядерных реакций при низких и средних энергиях. Исследования нейтрон-ядерных взаимодействий методом времени пролёта на установках НСВП-РАДЭКС ИЯИ РАН и ИРЕН, ИБР ЛНФ ОИЯИ

По техническим причинам в 2012-2013гг. в зд. 25 не проводился протонный пучок линейного ускорителя ИЯИ на нейтронопроизводящие мишени ММФ. По этой причине на импульсных нейтронных источниках РАДЭКС и ИН-06 группа ТРОНС ЛИРП ОЭФ проводила только тестовые и фоновые измерения для проверки работоспособности спектрометрической аппаратуры и детекторов нейтронов и гамма-лучей, а также велись работы по созданию новых быстродействующих жидкостных (n, y)-детекторов на основе нового растворителя ЛАБ A с гадолиниевым поглотителем нейтронов. Были проведены расчеты влияния доплер-эффекта на энергетический ход нейтронного сечения изотопов железа (основного конструкционного материала энергетических реакторов) при разных температурах. Также проведены расчёты пропускания (полного сечения) для образцов железа и никеля в диапазоне энергий от 1 эВ до 1 МэВ. С помощью установки ПАРУС (ИЯИ РАН) на 120-метровой пролётной базе 6-го пучка ОИЯИ с модернизированным импульсного источника ИРЕН ЛНФ накопителем экспериментальной информации впервые были проведены измерения времяпролётных спектров при ширине временного канала 0.5 – 64 мкс. (Измерения проводились по протоколу о сотрудничеству ИЯИ РАН-ОИЯИ).

Изготовлены образцы-фильтры из марганца, железа и никеля для изучения резонансной структуры нейтронных сечений этих материалов. Подготовлена и испытана установка для нагревания и охлаждения образцов-фильтров в диапазоне температур от 77К до 1000К с целью изучения влияния доплер-эффекта на резонансную структуру нейтронных сечений реакторных материалов. Ранее подобные исследования не проводились, несмотря на важность их при решении вопросов ядерной безопасности в ядерной энергетике. По результатам работы подготовлена статья в журнал ПТЭ и препринт ИЯИ, а также подготовлена статья в ЭЧАИ (ОИЯИ). По результатам предыдущих работ исследования резонансной структуры нейтронных сечений U-235, 238, Th-232 и Pu-239 подготовлена статья в журнал «Атомная энергия». Проведена подготовительная работа по созданию экспериментальной установки на вертикальном канале РАДЭКСа для прямого измерения (n-n)-рассеяния и (n,e)взаимодействия. Для поиска бинейтрона, тринейтрона и возможных других мультинейтронов разработан пропорциональный счётчик, наполненный дейтериевым газом до давления 2 атм.

Предполагается на 83 оси восстановить установку для изучения природы высокоспиновых ядер-изомеров и изготовленную установку СПИДЭК для исследований редкой моды деления с испусканием пиона. Рассматривается возможность создания стенда в виде призм из Pb, U-238, Th-232 для моделирования различных вариантов мишеней нейтронных источников и решения вопросов АДС, трансмутации радиоактивных отходов атомной промышленности и наработки ядерного топлива электроядерным методом.
#### 6 Исследования по ядерной физике

# 6.1 Исследование взаимодействия нуклонов с малонуклонными системами и

#### лёгкими ядрами на пучках Московской мезонной фабрики

Так как в 2013 г. для данного проекта не было предоставлено ускорительное время на нейтронном канале РАДЭКС, основная работа была связана с разработкой программы исследований, моделированием различных реакций, модернизацией системы сбора и проведением тестового эксперимента на дейтронном пучке циклотрона НИИЯФ МГУ.

Разработана программа исследований нейтрон-нейтронных и протон-протонных корреляций в трёхнуклонных системах (nnp и ppn) в различных реакциях индуцируемых как нуклонами, так и заряженными частицами

n+d→n+n+p	(1)
$n+3H \rightarrow n+n+d$	(2)
d+3H→n+n+3He	(3)
3He+d→p+p+3H	(4)

Программа предполагает проведение экспериментов на нейтронном канале РАДЭКС (1-2), пучке дейтронов циклотрона ИЯИ НАН Украины (3) и пучке ионов 3He циклотрона У-120 НИИЯФ МГУ. Основной целью программы является исследование nn и pp корреляций, которое будет проведено как в реакции nd-развала, так и в реакциях с трехнуклонными системами 3H и 3He, в которых уже могут существовать квазисвязанные nn и pp состояния. При этом можно ожидать, что измеренные нами nn- и pp-корреляции, в частности, извлеченные в эксперименте эффективные длины рассеяния (ann app) и энергии квазисвязанной пары (E\*nn и E\*pp), окажутся совсем не те, которые присущи свободным nn-и pp-системам.

Кинематическое моделирование реаций с двумя нуклонами в конечном состоянии. Основным условием экспериментов (2-3) является детектирование в совпадении заряженной частицы (d или 3He), и нейтрона. Отличия при исследовании реакции (4), в основном будут связаны с использованием пучка ЗНе и дейтериевой мишени (вместо дейтронного пучка и тритиевой мишени в реакции (3) и детектированием вторичного протона вместо нейтрона. Для схемы с регистрацией двух частиц энергия и угол вылета третьей частицы (второго нуклона) будут восстановлены с использованием кинематики реакции (законы сохранения энергии и импульса). Энергия возбуждения Е\* для каждого зарегистрированного события рассчитывается, используя информацию об углах и энергиях двух нуклонов:

$$E^* = [E1 + E2 - 2(E1 \cdot E2)1/2 \cdot \cos(\Theta 1 - \Theta 2)]/2.$$
(5)

Из зарегистрированных событий будут образованы спектры энергии возбуждения, которые будут затем проанализированы для определения энергии квазисвязанного динуклонного состояния.

Проведенное кинематическое моделирование определить нами позволило необходимые параметры эксперимента (углы регистрации, необходимое угловое и энергетическое разрешение детекторов), и с полученными параметрами оценить как область энергий возбуждения, доступную в эксперименте, так и возможное разрешение по энергии возбуждения. Так, например, для реакции  $d + 3H \rightarrow 3He + (nn)^* \rightarrow 3He + n + n$  моделирование проведено для энергии дейтронов 20 МэВ и угле регистрации 3He 25°. При этом область энергий возбуждения Е\* = 0 – 200 кэВ может быть исследована при углах регистрации нейтрона ~76°. При расчете возможного разрешения по энергии возбуждения учитывалось угловое и энергетическое разрешение детектирующей системы. При реальных параметрах системы (угловой размер детекторов  $\sim 1^{\circ} - 2^{\circ}$ , энергетическое разрешение при регистрации заряженной частицы (3He) ~ 100 кэB, временное разрешение и длина время-пролетной базы при регистрации нейтрона 0.5 нс и 2 м, соответственно) разрешение по энергии возбуждения составит ~30-40 кэВ при Е\* ~ 0.1 - 0.2 МэВ.

Проведение тестового эксперимента. Для проверки методики эксперимента и уточнения необходимых параметров детектирующей системы нами был проведен тестовый эксперимент в реакции  $d + 2H \rightarrow 2He + n + n$  на пучке дейтронов НИИЯФ МГУ с энергией 15 МэВ. Также как и в планируемом эксперименте  $d + 3H \rightarrow 3He + n + n$  в совпадении детектировались две частицы – заряженная частица 2He (два протона летящие под одним углом) и нейтрон. В эксперименте (см рис. 30) были использованы мишень из дейтерированного полиэтилена толщиной 2 мг·см–2, пучок дейтронов с током 10–20 нА, телесные углы детектора заряженных частиц и нейтронов составляли ~ 10–3 ср. Два протона регистрировались  $\Delta E$ -Е-телескопом, расположенным под углом  $\Theta pp = 30^\circ$ . В качестве  $\Delta E$ -детектора был использован полностью обедненный поверхностно-барьерный кремниевый детектор толщиной ~25 мкм, а в качестве Е-детектора кремниевый детектор с толщиной 100 мкм. Нейтроны детектировались жидким водородосодержащим сцинтиллятором EJ-301 (аналог NE-213) под углом ( $\Theta n = 34^\circ$ ,  $\Phi = 180^\circ$ ), соответствующим кинематике двухчастичной реакции  $d + 2H \rightarrow 2He + (nn)$ .

Впервые в наших работах была использована компактная система сбора информации с использованием цифрового сигнального процессора (дигитайзера), позволяющая получение большого объема информации об амплитудных и временных параметрах сигналов с различных детекторов. В качестве основного элемента системы сбора данных мы

использовали дигитайзер DT5742, (аналог цифрого осциллографа), со следующими характеристиками: количество входов - 16, максимальная частота дискретизации 5 Гвыборок/с (0,2 нс между выборками), амплитудное разрешение 12 бит. Осциллограммы от  $\Delta E$ , E и нейтронного детекторов записывались в буферную память, и по ее заполнении передавались на главный компьютер. Обработка данных проводилась в режиме off-line и состояла из определения амплитуд и времен возникновения сигналов в детекторах, цифрового  $\Delta E$ -E разделения событий для различных типов частиц, выбора совпадающих событий и получение окончательных энергетических и временных спектров для всех частиц.



Рисунок 30. Экспериментальная установка для исследования реакции  $d + {}^{2}H \rightarrow {}^{2}He + (nn)$ .

Отбор событий, соответствующих регистрации 2He (pp) в совпадении с нейтроном, проводился по двумерной диаграмме  $\Delta$ E-E (puc. 31). На диаграмме видны локусы соответствующие протонам, дейтронам, 3He и 4He. Обратный ход протонного и дейтронного локусов связан с неполным поглощением энергий протонов и дейтронов в E-детекторе с толщиной 100 мкм. Моделирование реакции в реальных условиях эксперимента (энергия пучка, толщина мишени, углы регистрации, толщины детекторов) показало, что двухпротонные события будут расположены выше дейтронного локуса и ниже локуса 3He. На рис. 31 видны события, соответствующие данной области (между линиями 1, 2).





Следует отметить, что в случае исследования реакции  $d + 3H \rightarrow 3He + n + n$ , условия отбора заряженной частицы 3He будут значительно проще отбора двухпротонных событий в тестовом эксперименте. В этом случае основным фоновым эффектом в детекторах заряженных частиц будет регистрация однозарядных частиц – протонов, дейтронов и тритонов с существенно более низкими потерями в  $\Delta E$ -детекторе.

Основным условием тестового эксперимента являлось детектирование в совпадении заряженной частицы (2He), и нейтрона. Энергия нейтронов определялась по времени пролета нейтронов до детектора, при этом в качестве стартового сигнала времяпролётной системы был использован сигнал от  $\Delta E$ -детектора. Времяпролётный спектр нейтронов, отобранный в совпадении с двухпротонным сигналом в  $\Delta E$ -E телескопе показан на рис. 32. Стрелкой показано моделированное среднее время пролета нейтронов в реакции d + 2H  $\rightarrow$  2He + (nn) для условий тестового эксперимента: Ed = 15 MэB,  $\Theta$ 3He = 30°,  $\Theta$ n = 34°.



Рисунок 32. Времяпролётный спектр нейтронов в реакции  $d + d \rightarrow {}^{2}He + n + n$ .

Время набора спектра, показанного на рис. 4 – около 2 часов, таким образом, скорость набора событий в тестовом эксперименте составила ~30 соб/ч. Так как все параметры тестового эксперимента (ток, толщина мишени, телесные углы) близки к соответствующим параметрам планируемого эксперимента по реакции (3), это позволяет надеяться на успешное проведение эксперимента на циклотроне ИЯИ АН Украины и получение достаточной статистики за приемлемое время работы ускорителя.

## 6.2 Исследование структуры и механизмов взаимодействия слабосвязанных

#### ядер с ядрами при средних энергиях

Совместно с ФЛЯР ОИЯИ подготовлен проект эксперимента по исследованию кластерной структуры лёгких слабосвязанных ядер в реакциях квазисвободного рассеяния протона в обратной кинематике. Структура основного состояния будет исследована в реакции квазисвободного рассеяния протона на кластерах, составляющих исследуемое ядро (в 6Не это 4He, 2n или n; в 8Не это 6Не или 4He, 2n или n) в обратной кинематике при сравнительно низких энергиях налетающих ядер 6Не и 8Не (3-10 МэВ/нуклон. В качестве мишеней будут использованы ядерные фотоэмульсии являющиеся одновременно и мишенью и детектором вторичных частиц (р, 4He).

Проведено моделирование эксперимента с использованием созданной программы расчета кинематических переменных. Моделирование реакций 6He+p 8He+p показало, что события квазисвободного рассеяния протона на одиночном нейтроне, динейтронном кластере или "динейтронном конденсате" (в случае 8He) занимают различные области на двумерных диаграммах Далитца, и обнаружение таких областей позволит сделать выводы о кластерной структуре исследуемых гало ядер.

Изучалась реакция срыва нуклона гало-ядра на лёгком ядре-мишени в рамках дифракционной теории реакций со слабосвязанными ядрами, когда взаимодействие остова и нуклона гало-ядра с мишенью описывается моделью чёрного диска. Сформулирован усовершенствованный вариант приближения малого эффективного радиуса мишени (по сравнению с размером гало-ядра).

Получены аналитические выражения для дифференциального сечения и распределения наблюдаемых частиц по продольным импульсам, которые позволяют вычислять эти величины с хорошей точностью. Рассмотрена возможность вычисления сечения реакции срыва остова гало-ядра в используемом приближении.

Вне темы. Продолжена работа, связанная с широко обсуждающейся в литературе гипотезой о существовании прозрачных сред, у которых проницаемости є и  $\mu$  (фигурирующие в соотношениях  $\vec{B} = \mu \vec{H}, \vec{D} = \varepsilon \vec{E}$ ) отрицательны.

#### 6.3 Разработка методов и аппаратуры низкофоновых измерений гамма-

#### излучений с использованием германиевых гамма-спектрометров

Разработан, изготовлен и испытан сцинтилляционный модуль (один из пяти) (размером 500х500х50 мм<sup>3</sup>) «активной» защиты от космического излучения низкофоновой камеры с германиевым гамма-спектрометром. Проведены измерения фона камеры с одним элементом «активной» защиты посредством модулей цифровой обработки импульсов (Digital Pulse Processing - DPP) CAEN DT5720 и DT5724. При размещении модуля «активной» защиты над верхней крышкой камеры при работе в режиме антисовпадений с германиевым детектором с эффективностью  $\varepsilon = 30\%$  достигнуто снижение общего уровня фона камеры на ~ 12–15% до ~ 0.9 имп/с, что соответствует уровню 2.9 имп/с при  $\varepsilon = 100\%$ . Оценки показывают, что при использовании всех пяти модулей «активной» защиты следует ожидать снижение фона не менее чем на 50 %.

При работе со сцинтилляционным модулем «активной» защиты была запущена и проверена в эксплуатации система сбора информации на базе аппаратуры цифрового анализа формы импульсов фирмы CAEN при использовании низкофоновой камеры с активной защитой. С помощью этой аппаратуры и программного обеспечения проведены измерения уровня фона низкофоновой камеры.

Проведена оценка возможности использования камеры с текущими параметрами для определения содержания U и Th в некоторых материалах. По значениям интенсивностей основных γ-линий фона, полученных в результате многократных 24 ч измерений, были рассчитаны чувствительности определения U, Th и K в пробах разной массы. При этом учтены

геометрические условия измерения активности (плотность 2 – 3 г/см<sup>3</sup>) проб и самопоглощение регистрируемого излучения. Для 50 г образцов чувствительность определения U, Th и K составляет, соответственно, 6.10<sup>-6</sup>, 3.10<sup>-5</sup> и 3·10<sup>-3</sup> масс.%.

Разработан и изготовлен макет фото-нейтронного W-Ве источника тепловых нейтронов для обеспечения возможности проведения работ по нейтронно-активационному анализу с использованием ускорителя электронов ЛУЭ-8-5 и камеры для низкофоновых измерений. Создана компьютерная модель источника. Совместно с ЛФЯР и ЛНИ проводятся исследования и расчеты параметров источника с целью получения максимальной плотности потока тепловых нейтронов (в центре замедлителя).

Результаты проведённых в 2013 году работ доложены на двух международных конференциях.

# 6.4 Исследование взаимодействия нейтронов малых энергий с ядрами с возбуждением коллективных степеней свободы

Исследовалось поведение произведения чисел валентных нуклонов NpNn для цепочек четно-четных изотопов ядер Ni и Zn.

Продолжена работа по усовершенствованию программы расчёта рассеяния нейтронов на деформированных ядрах и по описанию экспериментальных данных в моделях жёсткого аксиального и неаксиального ротаторов по различным сечениям взаимодействия нейтронов с ядром Pt194.

# 6.5 Разработка основ создания средств аварийной радиационной защиты третьего поколения (AP3\_3) и методов испытаний и контроля для повышения

безопасности экологической чистоты ядерной энергетики Ранее проводились исследования роли человеческого фактора в формировании последствий радиационных аварий. Сама идеология, заложенная в основу математической модели аварийного облучения, диктовала требование обобщения и на другие виды чрезвычайных ситуаций. Действительно, единый подход математического моделирования позволил обобщить модель на определённый класс ситуаций. Это ситуации, когда: (1) имеется количественная характеристика тяжести последствий, (2) человеческий фактор оказывает доминирующее влияние на формирование этих последствий и (3) имеется одно, существенно превосходящее остальные внешнее воздействие на человека. В частности, удалось описать наблюдаемые распределения последствий при двух типах чрезвычайных ситуаций (пожар и

аварийное радиационное облучение) и для четырех процессов, для которых имелись данные наблюдений и которые удовлетворяли перечисленным выше условиям.



#### Рисунок 33.

Примеры описания приведены на рисунке 33. Распределение активности радио-йода в щитовидных железах у 122 членов экипажа подводной лодки после аварии ЯЭУ представлено на рис. 33а. По оси абсцисс – активность йода – 131. По оси ординат – количество облученных на интервал активности. На рис. 336 представлено распределение доз гамма излучения после той же аварии По оси абсцисс – величина дозы. По оси ординат – количество облученных на интервал доз. Кривые логнормального распределения без точек, с точками – данные наблюдений. Гистограммы (рис. 33в-з) иллюстрируют сравнение предсказаний модели с фактическими распределениями времен оперативного реагирования на сообщение о пожаре в городах по шести регионам России: Центральному (рис. 33в), Сибирскому (рис. 33г), Уральскому (рис. 33д), Приволжскому (рис. 33е), Южному (рис. 33ж), Северо-Западному (рис. 333). Данные описываются одной кривой логнормального распределения с одним и тем же набором параметров, вне зависимости от региона, что указывает на воздействие человеческого фактора. Нерегулярные выбросы на гистограммах при значениях 5 мин. (наиболее вероятное время прибытия) и 10 мин. (нормативное время прибытия) объясняются так же человеческим фактором, применительно к лицам, проводящим учет времени. В обобщенной модели доминирующего в чрезвычайных ситуациях человеческого фактора количественной мерой его «субъективного» вклада в результат внешнего воздействия служит обобщенный коэффициент влияния человеческого фактора ζ. Он является характеристикой

индивидуума и подобно многим антропометрическим и психофизическим характеристикам описывается Гауссовым распределением. Модель объясняет образование логнормального распределения тяжести последствий при разнообразных чрезвычайных ситуациях, устанавливает связь между коэффициентом влияния человеческого фактора и параметрами логнормальных распределений. Объясняет свойство гомоскедастичности логарифмов доз, полученных ликвидаторами и населением при радиационных авариях. При этом логнормальные распределения, описывающие разнообразные данные наблюдений, имеют численные параметры, отличающиеся в полтора – два раза, в то время как отношения дисперсий коэффициентов влияния человеческого фактора к среднему значению этих факторов  $\sigma\zeta/\zeta$  отличаются не более, чем на 15% и, по существу, совпадают в пределах погрешностей. Это указывает на существование общей характеристики влияния человеческого фактора в любой чрезвычайной ситуации – его относительной дисперсии  $\sigma\zeta/\zeta$  = 0,40 ± 0,05.

Этот результат говорит о том, что свойства людей, существенные для решения задач в экстремальных условиях, имеют достаточно широкий разброс. Даже в коллективах, состоящих из отобранных по личным и профессиональным качествам людей

Проведен анализ соответствия доступной современной инструментальной базы требованиям дозиметрического контроля при использовании аварийных средств индивидуальной радиационной защиты и при их отсутствии, в условиях пожаров и аварий на радиационно-опасных объектах. Сопоставлены по тринадцати характеристикам реально производимые в России и Белоруссии дозиметрические приборы с учетом их основных особенностей и функций. Ниже крупным наклонным шрифтом выделены их характеристики, сочетание которых отвечает требованиям инструментального дозиметрического контроля в условиях аварийного сочетанного облучения. Наклонным шрифтом – дополнительные специальные требования.

Тип детектора – кремниевый полупроводниковый счётчик. Вид и диапазон детектируемого излучения – фотонное (гамма, рентген), бета, нейтронное, от долей мкЗв до десятков Зв. Способ индикации, извещатель – цифровой, речевой, вибрационный. Способ крепления – карманный. Память. Наличие энергонезависимой памяти для записи результатов текущих измерений. Тип корпуса – герметичный дезактивируемый. Тип батареи электропитания – встроенные аккумуляторы с зарядным устройством на несколько приборов. Контроль. Индикатор состояния электропитания, индикатор нормальной работы в условиях присутствия

повышенной радиации, индикатор перегрузки. Коммуникация – связь с компьютером.

Специальные требования. Температурный интервал, в котором допускается использование прибора: от – 400С до + 1000С (последнее до 15 минут). Устойчивость к воздействию теплового потока 5 кВт/м<sup>2</sup> не менее 240 с.

Прибора, отвечающего в полной мере приведенным требованиям, в настоящее время в области поиска не существует. Наиболее близкие параметры имеет индивидуальный дозиметр гамма и нейтронного излучения ДВС-01С (Зеленоград МО). Измеряет (по терминологии производителя) «индивидуальный эквивалент дозы (ИЭД)» смешанного гамма-нейтронного излучения, нейтронного излучения и «мощности индивидуального эквивалента дозы (МИЭД)» смешанного гамма-нейтронного излучения. Динамический диапазон от 0,1мкЗв до 15 Зв. Обладает широким набором функций. Для измерения дозы по нейтронам используется регистрация продуктов двух видов взаимодействия с ядрами: (n,α)-реакции на 6Li и рассеяния нейтронов на водороде. Допускает достаточно корректный, по мнению производителя, расчет нейтронной дозы, независимо от спектра нейтронного излучения. К недостаткам следует отнести его относительную сложность и, соответственно, стоимость, а также желательность расширения динамического диапазона. При ликвидации пожаров, сопровождающих ядерные и радиационные аварии, дозиметрические приборы могут оказаться в чрезвычайно сложных условиях эксплуатации. Это предопределяет необходимость отбора, модернизации и системы предварительных испытаний аппаратуры для дозиметрического и радиационного контроля в подразделениях ГПС. Для обучения и подготовки личного состава к работе с дозиметрической аппаратурой без применения источников ионизирующих излучений разработан проект имитатора-тренажера (смотри отчет по теме за 2012 год о подготовке заявки под рабочим названием «Тренажер – дозиметр для пожарных и спасателей»). Подготовлены предложения в Концепцию развития радиационной, химической и биологической защиты в МЧС России до 2020 года.

Результаты исследований изложены в следующих материалах. Статья Б.А. Бенецкого / О влиянии человеческого фактора на распределение тяжести поражений при ядерных и радиационных авариях и на последствия других чрезвычайных ситуаций // КСФ, в печати, регистрационный № 5009. Предполагаемая публикация результатов, полученных при разработке предложений в Концепцию развития радиационной, химической и биологической защиты в МЧС России до 2020 года в форме препринта ИЯИ РАН. Б.А. Бенецкий, М.Н. Лифанов, М.В. Плотникова. «Проблемы радиационной безопасности и дозиметрии при авариях в условиях применения индивидуальных средств радиационной защиты и при их

отсутствии». Доклад М.Н.Лифанова и Б.А. Бенецкого на конференции ЯДРО-2013 «Проблемы дозиметрии при ликвидации последствий ядерных и радиационных аварий» и одноименная статья в журнал «Ядерная физика и инжиниринг». Описание к патенту, о котором Федеральной службой по интеллектуальной собственности (Роспатент) 19.09.2013 принято решение о выдаче патента на полезную модель «Имитатор-тренажер дозиметр-радиометр». Приоритет от 06.08.2013, автор М.Н.Лифанов, патентодержатель ИЯИ РАН. Описание к заявке на патент под рабочим названием «Способ прогнозирования распределений тяжести индивидуальных поражений при радиационных авариях», переданной в патентный отдел ИЯИ РАН, авторы Б.А. Бенецкий, М.В. Плотникова.

#### 7 Нейтронные исследования. Многоцелевой Нейтронный комплекс ИЯИ РАН

# 7.1 Импульсный нейтронный источник ИН-06 ИЯИ РАН. Оснащение ИН-06 приборной базой

Проводились работы по подготовке к научным исследованиям наноструктур рефлектометра-малоуглового спектрометра с двухкоординатным позиционно чувствительным детектором (ПЧД). Велась проработка различных вариантов ПЧД.

Продолжены работы по дальнейшему развитию приборного парка первой очереди Нейтронного комплекса ИЯИ РАН на источниках нейтронов ИН-06 и РАДЭКС, а также оцениваются возможные параметры установок второй очереди для источника нейтронов ИН-06.

На основе рентгенографических и других комплементарных методов исследований конденсированных сред ведется проработка перспективных объектов для экспериментов на нейтронных установках Нейтронного комплекса Института по изучению структуры и динамики перспективных материалов.

Основной частью ядерно-физических установок, нейтронографических и мессбауэровских спектрометров является детектор, измеряющий энергию и количество рассеянных от образца в различных направлениях нейтронов и гамма лучей. Образцы при этом могут находиться в различных условиях: температура, магнитное поле и давление. С этой целью были направлены усилия на развитие новых детекторов и создание криостатов и камер высокого давления.

7.2 Спектрометрия по времени замедления нейтронов в свинце

#### 7.2.1 Исследования по физике деления и нейтрон-ядерных взаимодействий

Разработан проект висмутовой (Ві) вставки в измерительный канал спектрометра СВЗ-100 для подавления фоновых у-квантов.

Предложен способ подавления высокоэнергетической части нейтронного спектра, в начальный момент после нейтронной вспышки, в свинцовом теле CB3-100 путём внесения лёгких материалов в полости свинцовой сборки.

Осуществлён подбор материалов-образцов для определения спектров нейтронных полей внутри и вне рабочего тела (свинец) спектрометра CB3-100 с использованием методики активационного анализа.

С помощью компьютерной программы «Resolution», проведена свёртка сечений редких нейтрон-ядерных реакций с формой линии спектрометра CB3-100, для определения возможности данной экспериментальной установки по исследованию редких процессов.

Изготовлен мониторный малоэффективный нейтронный счётчик содержащий бор (В), способный работать в сверхинтенсивных нейтронных полях характерных для спектрометра CB3-100.

По результатам обработки полученных ранее в совместной работе с ГНЦ РФ «ФЭИ» экспериментальных данных подготовлена статья [1].

7.2.2 Расчётно-теоретическое обоснование конфигураций нейтронных мишеней

### spallation-типа

В 2013 году продолжались работы по математическому моделированию взаимодействия адронов и ядер со сложными макроскопическими мишенями на основе транспортного кода SHIELD (http://www.inr.ru/shield/) согласно планам НИР Института по тематическому направлению «Фундаментальная и прикладная ядерная физика».

В работах [2, 3] приводятся результаты математического моделирования параметров уникальной установки – спектрометра по времени замедления в свинце СВЗ-100 ИЯИ РАН. Спектрометр позволяет измерять нейтронные сечения актинидов, что весьма актуально для обеспечения безопасного развития ядерной энергетики.

В работе [4] рассмотрен вариант мишенного узла подкритической электроядерной установки с жидкосолевым теплоносителем – перспективного направления ядерной технологии.

С.Ф. Сидоркиным выполнен ряд работ по проблемам ядерной энергетики и возможности решения некоторых вопросов на установках ИЯИ РАН, в том числе:

Работы по нептуниевой мишени.

Продолжены расчетно-теоретические работы по поиску оптимального состава конфигурации мишени с высоким выходом нейтронов на основе нептуния 237. Дополнительно к ране изученным комбинациям топлива D<sub>2</sub>O-Np и Pb-Np, где тяжелая вода рассматривалась в качестве теплоносителя, а свинец в качестве пластической связки между гранулами нептуния, по рекомендации ВНИИНМ рассчитывается комбинация нептуний – силумин (вместо свинца).

Проведена серия расчетов по твэлам на основе нептуниевых гранул с силуминовой связкой.

Ведется подбор конфигурации вращающейся мишени.

Проведена новая серия расчетов, в которых устранены выявленные неточности и нестыковки.

Ведется обработка результатов и подготовка печатного материала.

Работы по MSR и ADS. Проведена серия теплофизических расчетов по реакторам на расплавах солей в рамках совместной работы с МЮКАТЕКС.

Результаты работ представлены на конференциях и отражены в публикациях [5 - 7]

# 7.2.3 Моделирование процессов, инициированных пучком протонов линейного ускорителя в установках Нейтронного комплекса ИЯИ, с целью уточнения и оптимизации параметров установок, планирования новых экспериментов и

#### приложений.

Продолжалось дальнейшее развитие кода SHIELD как аппарата расчетнотеоретических исследований, в том числе – совершенствование включенных в код моделей ядерных реакций. Большой интерес представляет применение этих моделей в фундаментальных исследованиях по физике атомного ядра и элементарных частиц.

Одним из важнейших направлений прикладной ядерной физики является применение терапевтических пучков протонов и легких ядер в онкологии. Работы [8 - 12] посвящены развитию и применению кода SHIELD-HIT (Heavy Ion Therapy). Эта программа является полностью оригинальной отечественной разработкой. В отчетном году получено «Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ» №2013612753 на код SHIELD-HIT10. Стоимость кода SHIELD- HIT, согласно оценке пакета SLOCCount (Source Lines of Code), составляет около \$2,000,000.

Проводилась работа по совершенствованию моделей ядерных реакций при промежуточных энергиях для исследования фундаментальных свойств ядерной материи [13 - 23]. В частности, изучалось уравнение состояния звездной материи [15,16], значительное внимание уделялось актуальной в настоящее время проблеме гиперядер [17-23]. Модели ядерных реакций, разработанные А.С.Ботвиной, нацелены не только на фундаментальные исследования, но и широко применяются при решении прикладных задач, в частности, в составе транспортных кодов SHIELD и Geant4.

Расчётно-теоретический сектор ЛНИ имеет договора о научном сотрудничестве с зарубежными организациями:

The Department of Experimental Clinical Oncology, Aarhus University Hospital and Department of Physics and Astronomy, Aarhus University, г. Орхус, Дания – на период 2013-2016 гг.

Frankfurt Institute of Advanced Studies (FIAS) – на период с 2004 г.

#### 7.2.4 Развитие приборного парка на нейтронных источниках ИЯИ РАН

Разработка спектрометров неупругого рассеяния нейтронов.

Необходимость разработки установок для исследований динамических свойств материалов методом неупругого рассеяния нейтронов обусловлена отсутствием таких спектрометров на нейтронном комплексе ИЯИ, в то время как в мире в нейтронных центрах они составляют приблизительно треть установок. Кроме того, в нейтронном рассеянии в РФ наблюдается значительный перекос в сторону дифракции. Дефицит спектрометров очень велик: всего два существующих в РФ спектрометра (ОИЯИ) сильно перегружены заявками на эксперимент. На источнике нейтронов ИН-06 используются 4 канала, а 3 канала свободны. Для повышения эффективности использования нейтронов предполагается запустить вторую очередь установок во втором экспериментальном зале, проект которого разработан. Установки второй очереди Нейтронного комплекса ИЯИ должны быть эффективны и компактны, поскольку второй экспериментальный зал будет небольшим для удешевления строительства и обслуживания. В работах по созданию и, в дальнейшем, эксплуатации спектрометров готовы принимать участие коллеги из НИЦ «КИ», ПИЯФ, ОИЯИ, МИФИ.

Основной целью работы является создание проектов двух компактных спектрометров на основе современных материалов и технологий с оптимальными нейтронно-оптическими элементами. Кроме того, необходимо подготовить коллектив специалистов в области нейтронной спектроскопии, способных использовать спектрометры для выполнения собственных исследовательских программ в области динамических свойств материалов и для обслуживания пользователей. Для сотрудников сектора конденсированных сред ЛНИ ИЯИ важно участвовать в экспериментальной работе методом нейтронной спектроскопии в других нейтронных центрах в мире и в РФ до запуска спектрометров в ИЯИ.

В отчетном году:

 разработаны модели следующих важных узлов нейтронных спектрометров: фокусирующего нейтронного монохроматора, коллиматоров, Т0-прерывателя, проведено Монте-Карло моделирование узлов при помощи нейтронных транспортных кодов McStas и VITESS, оптимизированы геометрические параметры устройств;

- при помощи транспортных кодов пакета Geant4 и MULASSIS сделаны расчеты систем защиты от излучений, ловушек нейтронов, сопоставлены свойства традиционных (борполиэтилен, кадмий, бетон, железо, свинец, вода) и новых материалов (композит TiH2B, гидрид титана), выбраны оптимальные материалы и размеры для компактных гетерогенных систем защиты блока монохроматора, коллиматоров, детекторов, ловушек нейтронных пучков, обеспечивающих низкофоновые условия для экспериментов и выполнение

требований радиационной безопасности НРБ-99/2009, расчеты сделаны для нейтронов и гамма-излучения, в том числе и с учетом вторичных частиц;

- сопоставлены гибридная схема (с использованием монохроматора) спектрометра прямой геометрии и традиционная (TOF-TOF) схема, расчет показал преимущества гибридной схемы по нейтронному потоку на образце, выигрыш в светосиле зависит от значения переданной энергии и достигает 40%;

# 7.3 Физика конденсированного состояния, разработка новых функциональных материалов, радиационное материаловедение

#### 7.3.1 Физика конденсированного состояния

Исследование структуры метастабильных систем на основе церия с коллапсом 4fэлектронной оболочки.

Сотрудниками ИЯИ РАН экспериментально обнаружен рекордный коллапс элементарной кристаллической ячейки на основе церия. В валентно-нестабильном интерметаллиде CeNi происходит фазовый переход первого рода с уменьшением объёма на 21%. Работа выполнена методами дифракции нейтронов, дифракции и спектроскопии с использованием синхротронного излучения, техники высокого давления. Определена пространственная группа и структурный тип фазы высокого давления CeNi, что ранее не удавалось сделать научным группам из США, Франции, Германии, России.

Выяснение физического механизма фазовых переходов в соединениях на основе церия — объёмного Кондо-коллапса — до сих пор является одной из главных задач в физике сильнокоррелированных электронных систем и одной из важнейших проблем физики конденсированного состояния.



# Кристаллическая структура фазы высокого давления CeNi, подрешетки атомов церия и никеля показаны разными цветами.

элемент или	относительное	кристаллические структуры фаз
соединение	изменение объема, %	
Се	15	из ГЦК в ГЦК
Ce <sub>1-x</sub> (Th,La) <sub>x</sub>	10-12	из ГЦК в ГЦК
Sm(Y)S	13	из кубической в кубическую
YbInCu <sub>4</sub>	0.5	из кубической в кубическую
CeNi	21	из орторомбической в кубическую

Значение скачка объёма при Кондо-коллапсе в соединениях 4f элементов:

- с помощью неупругого рассеяния нейтронов была изучена зависимость магнитного спектрального отклика в валентно-нестабильном интерметаллиде EuCu2Si2 от переданного нейтронами импульса, обнаружен аномальный магнитный формфактор;

- разработана новая методика разделения магнитного и фононного вклада в нейтронные спектры;

 нейтронной спектроскопией исследован магнитный спектральный отклик Кондоизолятора (Yb,Tm)B12, обнаружены аномалии потенциала кристаллического электрического поля;

- при помощи нейтронной спектроскопии исследована низкоэнергетическая часть магнитного спектра в квазибинарных системах на основе интерметаллида CeNi, выяснена природа магнитного упорядочения и повышения значения температуры Кюри в этих системах;

- исследованы динамика решетки промежуточно-валентных систем - додекаборида иттербия и гексаборида самария на основе нейтронных данных, анализ данных проведен на основе разработанной модели псевдо-атома;

- экспериментально исследован вклад от 3d и 4f электронов в спектр возбуждений кобальтитов лантана и празиодим-стронция;

- рассчитаны спектры магнитных возбуждений для альфа и дельта-фаз плутония;

Методом неупругого рассеяния нейтронов была изучена зависимость магнитного спектрального отклика в валентно-нестабильном интерметаллиде EuCu2Si2 от переданного нейтронами импульса. Измерения проведены на TOF спектрометре SEQUOIA (SNS, ORNL) при падающих энергиях нейтронов 125 и 225 meV в интервале углов от 3 до 55 градусов. Было

проведено разделение спектра на магнитную и фононную части. Было обнаружено, что пики в спектре имеют разную Q-зависимость интегральной интенсивности, один из них демонстрирует аномальный магнитный формфактор (см. рис.2).

Для решения проблемы разделения магнитного и фононного вклада в нейтронные спектры была разработана методика, основанная на специфике зависимости решеточного и магнитного вкладов от переданного импульса и температуры. Данная методика позволяет выделять магнитный вклад в соединениях, содержащих одновременно f- и d-ионы.



Рисунок 34. Зависимость интегральной интенсивности магнитных пиков от переданного импульса для системы EuCu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> при T=5K.

Нейтронной спектроскопией исследован магнитный спектральный отклик Кондоизолятора (Yb,Tm)B12, обнаружены аномалии потенциала кристаллического электрического поля.

При помощи нейтронной спектроскопии исследована низкоэнергетическая часть магнитного спектра в квазибинарных системах на основе интерметаллида CeNi, выяснена природа магнитного упорядочения и повышения значения температуры Кюри в этих системах. Ключевую роль играет смягчение одной из магнитных мод.

Была исследованы динамика решетки промежуточно-валентных систем - додекаборида иттербия и гескаборида самария на основе нейтронных данных, анализ данных проведен на основе разработанной модели псевдо-атома.

Был экспериментально исследован вклад от 3d и 4f электронов в спектр возбуждений кобальтитов лантана и празиодим-стронция.

Были рассчитаны спектры магнитных возбуждений для альфа и дельта-фаз плутония на основе модели множественной промежуточной валентности и гомологии с цериевыми

системами. Для экспериментального исследования магнитных спектров в этих системах необходимо использовать нейтроны с начальной энергией выше 300 meV.

По результатам исследований подготовлены к печати и опубликованы работы [24, 25], подготовлены доклады на конференциях и школах [26 - 33].

Нейтронные эксперименты по рассеянию в MnSi под давлением до 15 кбар показали сохранение фазы - решетки новых магнитных наночастиц скирмионов в «кармане» магнитной фазовой диаграммы поле - температура. Это происходит, несмотря на хорошо известные драматические влияния давления на температуру перехода Тс, которая уменьшается с ростом давления и обращается в нуль при ~ 14,5 кбар. Эта серия экспериментов показала новую особенность: применение давления давления давления давления давления завления такого слабого, как 12 кбар, приводит к полному исчезновению флуктуаций и precusisor фазы, которая характеризует фазовый переход в MnSi при нулевом давлении. Эксперименты выполнялись в ILL, Grenoble. Для них нами была разработана новая камера высокого давления с малым фоном рассеяния, который практически не видно на картинах рассеяния. (Р.А. Садыков)

 Картины малоуглового нейтронного рассеяния MnSi в магнитном поле 2 kGauss вблизи Тс для двух различных давлений: 9 kbar и 12 kbar.

9kbar

12kbar



2) Камера высокого давления из немагнитных сплавов Ti-Zr (outer support)+CuBe(insert), оптимизированная для нейтронного малоуглового рассеяния.

Совместно с французскими коллегами готовится публикация.

Исследование фазовых переходов металл-диэлектрик в мегабарном диапазоне давлений.

В магнезиовюстите (Mg,Fe)O исследована P-Т магнитная фазовая диаграмма методом синхротронной мёссбауэровской спектроскопии при высоких давлениях (0-90 ГПа) и низких температурах (8 – 300 K) в камерах высокого давления с алмазными наковальнями. Изучены магнитные свойства и спиновые состояния ионов Fe2+. Построена магнитная P-T фазовая диаграмма, на которой локализована квантовая критическая точка (QC - point), где пропадает параметр магнитного порядка при T=0. Обсуждаются эффекты спиновых HS-LS флуктуаций через спиновую щель (EHS – ELS). Предсказаны необычные магнитные свойства низкоспиновой фазы. Основное электронное состояние ионов Fe2+ при критическом давлении PC HS-LS перехода и при нулевой температуре определяется квантовой критической точкой Pq (T = 0, Pc) когда разность энергий между HS и LS состояниями (спиновая щель) равна нулю. Отклонение он нуля температур (T=0) ведёт к термическим возбуждениям HS или LS состояний, и может сильно влиять на магнетизм и как следствие на физические свойства материала.

В минерале рингвудит  $\gamma$ -(Mg,Fe)2SiO4 со структурой шпинели, допированным железом, были измерены сверхтонкие взаимодействия методом синхротронной мёссбауэровскй спектроскопии при высоких давлениях в алмазных наковальнях при комнатной температуре. В качестве среды передающей давление использовалась каменная соль (NaCl). Было получено, что в кристалле два неэквивалентных положения железа с валентностью Fe2+ находятся в высокоспиновом состоянии (S=2). Квадрупольное расщепление (QS) в обеих позициях растёт с давлением от величин QSI ~ 1.6 мм/сек и QSII ~ 2.75 мм/сек до величин QSI ~ 3 мм/сек и QSII ~ 3.4 мм/сек при давлении порядка 70 ГПа. В диапазоне давлений 40-70 ГПа наблюдается спиновый кроссовер в низкоспиновое состояние (S=2 → S=0) иона Fe2+. Этот электронный переход полностью обратим при сбросе давления.

Методом синхротронной (NFS) мёссбауэровской спектроскопии была исследована магнитная фазовая диаграмма перспективного мультиферроика – лангасита Ba3TaFe3Si2O14 (50% Fe-57) до давления ~ 38 ГПа. Обнаружен фазовый переход с кардинальным увеличением температуры Нееля от 40 К в фазе низкого давления до 120 К в фазе высокого давления. Переход предположительно является фазовым переходом первого рода. Эксперимент проводился в гидростатических условиях с Не в качестве среды, передающей давление. Для уточнения давления перехода были измерены спектры рамановсого рассеяния при комнатной температуре. На основе полученных данных была построена предполагаемя магнитная P-T фазовая диаграмма лангасита Ba3TaFe3Si2O14.

Индуцированные давлением спиновые переходы от высокого к низкому спиновому состоянию являются широко наблюдаемыми, но плохо понимыми, явлениями, которые принципиально связаны с центральными проблемами физики конденсированного состояния и гео-физики, таких как переход металл-диэлектрик и сейсмологических аномалий в нижней мантии Земли. Резонансное неупругое рассеяние рентгеновских лучей высокого разрешения исследовалось впервые в FeBO3 в области Fe-K пре-края (pre-edge) для изучения эволюции электронных возбуждений в области индуцированного давлением спинового перехода.

Результаты опубликованы в работах [34 - 37]

Синтезирован минерал для исследования в рамках тематики изучения строения слоёв мантии Земли. В результате совместных исследований с ИК РАН и НИЦ КИ было обнаружено, что минерал состоит из трёх подфаз, одна из которых аморфна, имеет нано-кристаллическое строение (из электрон-дифракционных данных на уникально установке коллективного пользования TITAN) и является связующей структурой, которая держит весь сложный композитный минерал. В работе более подробно исследовалась подфаза рингвудита  $\gamma$ -(Mg,Fe)2SiO4 со структурой шпинели, в которой был впервые обнаружен электронный переход типа спиновый кроссовер ) иона Fe2+ в низкоспиновое состояние (S=2  $\rightarrow$  S=0). Этот электронный переход полностью обратим при сбросе давления.

В перспективном мультиферроике – лангасите Ba3TaFe3Si2O14 обнаружен переход в раман-амрфное состояние индуцированный высоким давлением. Давление перехода при комнатной температуре Pc ~ 20 ГПа. Эта новая, возможно, нанокристаллическая фаза имеет существенно более высокую температуру магнитного упорядочения, почти в 4-е раза большую, чем в исходной фазе низкого давления. Подробно исследована магнитная фазовая диаграмма в P-T области при высоких давлениях и криогенных температурах.

Опубликованы работы [38, 39].

Радиационное материаловедение. Исследование кинетики эволюции структуры металлов под облучением (А.А. Семенов)

В рамках фазово-полевого подхода исследована временная динамика вакансионных пор при различных значениях температур облучения и эффективных уровней пересыщения вакансиями. Установлено, что, используя разработанную ранее фазово-полевую модель, временная эволюция вакансионных пор может быть воспроизведена с разумной точностью.

Результаты работы были опубликованы в журнальной статье [40].

#### 7.3.2 Развитие экспериментальной техники для исследования материалов

Отработан метод рентгеновской дифракции при высоких давлениях на лабораторном рентгеновском дифрактометре SPOE IPDS II. Впервые были получены рентгеновские дифракторграммы для различных давлений от перспективного мультиферроика со структурой лангасита Ba3TaFe3Si2O14. Это соединение относится к новому семейству

железосодержащих лангаситов, которые кроме высоких пьезоэлектрических свойств могут обладать магнитными и сегнетоэлектрическим свойствами, и тем самым представляют новый класс мультиферроиков. В коллаборации с ИК РАН были проведены комплексные исследования в которых были использованы три метода: рамановская спектроскопия комбинационного рассеяния света, мёссбауэровская спектроскопия и рентгеновская дифракция. Выполнен детальный анализ кристаллической структуры, электронных и колебательных свойств. Получены барические зависимости параметров кристаллической решётки Ba3TaFe3Si2O14 и построена зависимость объема элементарной ячейки от давления. Также получены барические зависимость объема элементарной ячейки от давления. Также получены работе – это обнаружение структурного фазового перехода первого рода со скачком объёма ~3.5% при давлении 6.5±1 ГПа, и связанных с ним переходов в электронной системе и в колебательных спектрах лангасита Ba3TaFe3Si2O14. Таким образом впервые была продемонстрирована возможность измерения рентгеновской дифракции при высоком давлении на лабораторной установке СКС ЛНИ. Готовится публикация.

7.3.3. Развитие новых методов исследований на нейтронных источниках

#### 7.3.3.1 Исследование возможности измерения нарушения Р – и СР –

## инвариантности в дифракции нейтронов

В рамках подготовки исследования Р-нечетных эффектов в дифракции нейтронов на 1ом канале реактора ИБР-2 ЛНФ ОИЯИ выполнены исследования дифракции нейтронов на монокристалле бромида калия в окрестности р-волнового резонанса брома-81. На рисунке 35 представлены спектры нейтронов дифракции для трёх углов падения нейтронов на монокристалл.

Видно, что поворот кристалла на 100" приводит к расщеплению рефлекса 1-го порядка, а рефлекс 2-го порядка просто смещается. Наблюдаемый эффект, скорее всего, связан с трех волновой дифракцией нейтронов (эффект многократного рассеяния в дифракции нейтронов).



Рисунок 35. Спектры нейтронов дифракции. Синяя линия – точное выполнение условий Брэгга, черная линия – кристалл повернут на 60", красная линия – кристалл повернут на 100".



Рисунок 36. Спектр нейтронов дифракции от монокристалла KBr, рефлекс первого порядка соответствует длине волны ~ 0,55 Å.

Для того чтобы проверить эффект многократного рассеяния в дифракции нейтронов, было решено уйти в область более низких энергий нейтронов. Результаты измерений представлены на рисунке 36. Видно, что рефлекс 2-го порядка больше рефлекса 1-го порядка и это можно объяснить только трех волновой дифракцией нейтронов (многократным брэгговским рассеянием). Результаты были представлены на международном семинаре ISINN-21.

Были выполнены исследования дифракции нейтронов на монокристалле бромида калия на 50-ти метровой базе РАДЭКС ИЯИ РАН в февральском сеансе 2012 года. Были определены параметры пучка нейтронов. Обнаружен очень интересный эффект расщепления рефлекса в области р - волнового резонанса <sup>81</sup>Br. На основании полученных результатов сделана также оценка мозаичности исследуемого образца, которая свидетельствует о хорошем качестве монокристалла бромида калия. Результаты представлены в [42, 43].

#### Заключение

Основной объём работ, намеченный на 2013 год, успешно выполнен.

Обеспечена надёжная работа ускорителя в 4 сеансах общей длительностью 1212 часов, направленных на разработку технологии получения радиоизотопов и наработку радиоизотопов, а также на исследования и модернизацию ускорителя. Наработка ускорителя по программе получения радиоизотопов составила свыше 66000 мкА часов при среднем токе пучка до 120 мкА и энергии 143 МэВ. На участке промежуточного вывода реализован режим распределения пучка между изотопным и экспериментальным комплексами с помощью системы импульсного разделения пучка. Решена задача удвоения частоты работы инжектора протонов и системы ВЧ питания начальной части ускорителя, достигнута стабильная работа инжектора на частоте 100 Гц с длительностью импульсов до 200 мкс. С целью увеличения интенсивности пучка на изотопном комплексе создана система быстрой развертки пучка на мишени, включающая быстрый дефлектор, систему питания и систему управления. Выполнены работы для ряда российских и зарубежных ускорительных центров, в том числе, созданы два измерителя формы сгустков для линейного ускорителя Лос-Аламосского центра LANSCE, измеритель формы сгустков для японского ускорительного исследовательского комплекса J-PARC, измеритель продольного распределения заряда в сгустках для ускорителя Linac-4 ЦЕРН и др.

Была обеспечена проводка пучков в зале экспериментального комплекса с заданными параметрами для проведения экспериментов в зале и на комплексе лучевой терапии.

Проведены совместные разработки новых технологических процессов получения стронция-82, актиния-225 и радия-223 на пучке протонов средних энергий для создания на их основе новых медицинских изотопных генераторов в целях их широкого применения для диагностики и терапии кардиологических и онкологических заболеваний в рамках ряда научно-исследовательских программ и договоров как с российскими, так и зарубежными фирмами и научными организациями. Новые технологические разработки базируются на научных исследованиях, выполненных в ИЯИ РАН совместно Лос-Аламосской национальной лабораторией (США), исследовательским центром АРРОНАКС (Франция) и МГУ им. М.В. Ломоносова, а также фирмами Nuclear Medicine Solutions, Inc. (США) и LEMER РАХ (Франция).

В задаче «Проблема поиска массы покоя электронного антинейтрино в бета-распаде трития» наиболее важные достижения в 2013 году:

- 2) Проведена полная модернизация системы электроснабжения установки
- Проведен тестовый сеанс, в котором выполнено комплексное опробование всего технологического оборудования после модернизации установки.

- Экологически чистая система нового замкнутого контура водоохлаждения испытана при полной нагрузке.
- 5) Выполнена методическая работа с патроном газовой очистки в газовом источнике
- 6) При помощи калибровочной электронной пушки проведено измерение функции пропускания спектрометра для электронов с энергией существенно ниже граничной точки распада трития.
- Проведен сеанс тестовых измерений с целью оценки возможности работы спектрометра и регистрирующей аппаратуры при измерениях в условиях больших загрузок вдали, от максимальной энергии.
- Исследован фон установки в широком интервале напряжений спектрометра от 8 до 20 кВ;
- Проведена прецизионная калибровка элементов высоковольтной системы, позволившая получить точность привязки двух источников не хуже 0.1 В на интервале до 20 кВ.
- 10) На созданном тестовом высововакуумном стенде проведены методические работы по совершенствованию детектирующей системы спектрометра.
- 11) Проведена обширная теоретическая работа по оценке влияния различных систематических эффектов на измеряемый спектр электронов. Показана адекватность модернизированной установки для задачи измерения спектра электронов в интервале энергий 12-19 кэВ.
- 12) Подготовлена и принята в печать в 2014 г. объемная статья по описанию математической методики обработки бета спектра с целью оценки верхнего предела на возможную примесь стерильных нейтрино.

В задаче «Поиск редких мюонных процессов в эксперименте «mu2e» проведено измерение с помощью космических мюонов разрешающая способность кристалла LYSO с двумя фото детекторами Hamamatsu APD S8664-1010, которая составляет величину равную  $\sigma E/E = 0.18\%/\sqrt{E}$ . Измерено время высвечивания кристалла LYSO, которое составляет величину равную 50 нсек.

В исследовании релятивистских ядро-ядерных столкновений на установке PHENIX успешно выполнен ремонт дрейфовых камер. Принято участие в сменах по набору статистики, а так же в одной из групп по подготовке к публикации статьи в реферируемом журнале.

В исследовании подпорогового рождения лёгких векторных мезонов и заряженных каонов в протон и фотоядерных реакциях применение результатов проведенных теоретических исследований к анализу данных по нерезонансному рождению каонных пар в рА реакциях при энергии первичных протонов 2.83 ГэВ, впервые полученных коллаборацией

ANKE в рамках совместного российско-германского эксперимента на ускорителе COSY, позволило извлечь величину антикаон-ядерного скалярного оптического потенциала (или сдвига массы антикаона в ядерной материи), имеющую большое значение для современной ядерной и адронной физики.

Наконец, впервые из анализа новых данных по фоторождению eta/prime-мезонов, полученных недавно коллаборацией CBELSA/TAPS на ускорителе ELSA (Бонн, Германия), извлечены величина свига массы этих мезонов в ядерной материи, предсказываемого современными адронными моделями, и их сечение взаимодействия с нуклонами. Полученные результаты представляют большой интерес для понимания в рамках КХД происхождения существенно большей массы eta/prime мезонов по сравнению с массами других членов псевдоскалярного мезонного нонета.

В задаче поиска темной материи Вселенной разработано предложение создания двухфазной жидкоаргоновой камеры с массой аргона до 1000 тонн, с наиболее высоким подавлением фона по сравнению с существующими проектами подобных установок и достижимым пределом на величину сечения рассеяния ВИМП меньшим 10<sup>-48</sup> см<sup>2</sup>.

В медицинскую практику внедрена технологи лечения смесями благородных газов с кислородом.

Исследование аномального электромагнетизма в углеродных конденсатах направлено на создание новых электронных приборов и устройств, покрывающих традиционную область джозефсоновской электроники. Мероприятия по проекту, проведенные в рамках инновационного центра Сколково, выявили хорошие рыночные перспективы бесконтактных переключателей – ограничителей тока для электрических сетей.

Разработана обобщенная модель доминирующего влияния человеческого фактора в экстремальных ситуациях, адекватно описывающая имеющиеся данные наблюдений. Эта модель применима когда: (1) имеется количественная характеристика тяжести последствий, (2) человеческий фактор оказывает доминирующее влияние на формирование этих последствий и (3) имеется одно, существенно превосходящее остальные, внешнее воздействие на человека. В этой модели количественной мерой вклада человеческого фактора в результат внешнего воздействия на каждого индивидуума служит обобщенный коэффициент влияния человеческого фактора  $\zeta$ . Имеющиеся данные наблюдений указывают также на существование общей для генеральной совокупности характеристики влияния человеческого фактора в чрезвычайной ситуации – его относительной дисперсии  $\sigma\zeta/\zeta = 0,40 \pm 0,05$ . Т.е. свойства людей, существенные для решения задач в экстремальных условиях, имеют достаточно широкий разброс. Даже в коллективах, состоящих из отобранных по личным и

профессиональным качествам людей, что определяет необходимость не только профессиональной подготовки но также и системы психофизической регуляции их функционального состояния и восстановления работоспособности.

Проведен анализ соответствия доступной современной инструментальной базы требованиям дозиметрического контроля в условиях пожаров и аварий на радиационноопасных объектах, как при использовании аварийных средств индивидуальной радиационной защиты, так и при их отсутствии, Прибора, отвечающего в полной мере этим требованиям, в настоящее время в области поиска не существует. Это должен быть прибор на основе высокоэффективного (скорее всего кремниевого полупроводникового) счётчика, измеряющий дозы и мощности доз фотонного (гамма, рентген), бета, и нейтронного излучения, в диапазоне от долей мкЗв до десятков Зв. Прибор должен иметь: способ индикации – цифровой, речевой извещатель, вибрационный; способ крепления – карманный; энергонезависимую памяти для записи результатов текущих измерений, тип корпуса – герметичный дезактивируемый тип батареи электропитания – встроенные аккумуляторы с зарядным устройством на несколько приборов; индикатор состояния электропитания, индикатор нормальной работы в условиях присутствия повышенной радиации, индикатор перегрузки; связь с компьютером. Специальные требования для пожарных: Температурный интервал, в котором допускается использование прибора: от – 400С до + 1000С (последнее до 15 минут). Устойчивость к воздействию теплового потока 5 кВт/м2 не менее 240 с. Все характеристики, кроме специальных требований, встречаются у реально существующих приборов, но не в полном сочетании, имеется приближенный отечественный аналог.

Реализация плана научных исследований 2013 года сотрудниками ЛНИ позволила получить ряд интересных результатов, нашедших свое отражение в опубликованных и цитируемых в данном отчёте работах. Внесён определенный вклад в решение главной задачи лаборатории по обеспечению развития и проведения исследований на нейтронных источниках и установках ИЯИ РАН на высоком научном уровне.

# Список источников

К разделу 6:

- 1 Ishida T. et al. // Mod. Phys. Lett. A. 2003. V. 18. P. 436.
- 2 Rauprich G.et al. // Nucl.Phys. A. 1989. V. 501. P. 51.
- 3 Setze H.R. et al. // Phys. Lett. B. 1996. V. 388. P. 229.
- 4 Strate J. et al. // Nucl. Phys. A. 1989. V. 501. P. 51.
- 5 Deltuva A.et al. // Phys. Rev. C. 2005. V. 72. 054004.0, p. 6112 6119.

#### 8 Публикации

### 8.1 Публикации к разделу 1

1 A. S. Belov, "Polarized Ion Sources: Status and Perspective", Physics of Particles and Nuclei, 2013, Vol. 44, No. 6, pp. 873–877. © Pleiades Publishing, Ltd., 2013, doi: 10.1134/S1063779613060038.

2 (CAST collaboration (A. S. Belov, from AD of INR RAS), "CAST constraints on the axion-electron coupling", JCAP05(2013)010, doi:10.1088/1475-7516/2013/05/010, arXiv:1302.6283

3 S. Aghion, A. S. Belov et al. (AEgIS Collaboration) "Prospects for measuring the gravitational free-fall of antihydrogen with emulsion detectors" J. Instrumentation 8 (2013) P08013,arXiv:1306.5602

4 D. Krasnicky, A. S. Belov et al. (AEgIS Collaboration) "AEgIS experiment commissioning at CERN" AIP Conf. Proc. 1521, 144 (2013); doi: 10.1063/1.4796070

5 A.V.Butenko, E.E.Donets, E.D.Donets, V.V.Fimushkin, A.I.Govorov, V.V.Kobets, A.D.Kovalenko, K.A.Levterov, V.A.Monchinsky, I.N.Meshkov, A.Y.Ramsdorf, A.O.Sidorin, G.V.Trubnikov JINR, Dubna, Russia, A.S.Belov, INR, Moscow et. al., «DEVELOPMENT OF THE NICA INJECTION FACILITY», Proceedings of IPAC2013, Shanghai, China, THPW0069, 2013.

6 A. S. Belov, "Polarized ion source options for FNAL polarized beam project", report on International Workshop Opportunities for Polarized Physics at FNAL, May 20-22, 2013, Fermilab, USA.

J. Storey, A. S. Belov et al. (AEgIS Collaboration) "Particle tracking at 4 K: The Fast Annihilation Cryogenic Tracking (FACT) detector for the AEgIS antimatter gravity experiment", Nuclear Instrum. and Methods in Phys. Research A, 732(2013) 437–441.

8 A. S. Belov, O. T. Frolov, L. P. Nechaeva, E. S. Nikulin, V. N.Zubets, "ANALYSIS OF 400 kV PULSE GENERATOR OPERATION", доклад на 23ем Международном Семинаре по ускорителям заряженных частиц, Украина, Алушта, 8-14 сентября 2013 г.

9 S. Gavrilov, A. Feschenko, P. Reinhardt-Nickoulin, I. Vasilyev. Analysis of measurement errors of inr linac ionization beam cross section monitor. International Beam Instruments Conference, September 16-19, 2013, Oxford, UK. Proceedings of IBIC2013, p. 535-538.

10 Akihiko Miura, Hidetomo Oguri, Nobuo Ouchi, Jun Tamura, A.V. Feschenko, A. N. Mirzojan. Bunch Length Measurement of 181 Mev Beam in J-PARC Linac. Proceedings of

IPAC2013,Shanghai,China,2013.http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2013/papers/mopme027.pdf, pp. 532-534.

11 J.A. Clarke, D. Angal-Kalinin, V.V. Paramonov et. al., The Conceptual Design of CLARA, a Novel FEL Test Facility for Ultra-short Pulse Generation. Proc. IPAC 2013, p. 1265, 2013

12 A.Feschenko, O.Grekhov, V.Mikhailov, V.Serov, I.Zhelezov. DEVELOPMENT OF FAST MAGNETIC BEAM RASTER SYSTEM FOR INR ISOTOPE PRODUCTION FACILITY. Lokлaд на 23ем Международном Семинаре по ускорителям заряженных частиц, Украина, Алушта, 8-14 сентября 2013 г.

13 A.V.Feschenko, A.I.Kvasha, V.L.Serov. Some peculiarities of the INR DTL RF System operation at doubling of average RF power level. Доклад на 23ем Международном Семинаре по ускорителям заряженных частиц, Украина, Алушта, 8-14 сентября 2013 г

14 B.L. Militsyn, L.S. Cowie, V.V. Paramonov et. al.,. High Repetition Rate Highly Stable S-band Photocathode Gun for the CLARA Project. Proc. IPAC 2013, p. 437, 2013 Ha 35ой Международной Конференции лазерам на свободных электронах, FEL 2013, New York, USA, 26-30 August 2013,

15 D. Angal-Kalinin, R. Appleby, V.V. Paramonov, et. al.,. The Proposal of CLARA, a Novel FEL Test Facility for Ultra-short Pulse Generation. Proc. FEL 2013, p. 496, 2013

16 M. Krasilnikov, G. Asova, V.V. Paramonov et. al., PITZ experience on the experimental optimization of the RF photo injector for the Europian XFEL. Proc. FEL 2013, p. 160, 2013

17 V. Paramonov, P. Orlov, K. Floettmann. Aberrations reduction in deflecting RF structures. XXIII International Workshop on Charged Particle Accelerators, Alushta, Crimea, Ukraine, 08-14 September 2013.

18 V. Paramonov, DLW for particles acceleration in the medium energy range. XXIII International Workshop on Charged Particle Accelerators, Alushta, Crimea, Ukraine, 08-14 September 2013.

19 V. Paramonov, L. Kravchuk, P. Orlov, K. Floettmann. Deflecting RF structures for particle distribution transformation in the bunch. Lokлaд на XIII Международном семинаре по проблемам ускорителей заряженных частиц, Алушта, Украина, 2-7 сентября 2013.

20 V. Paramonov. The Summary for Optimization of the Annular Coupled Structure Accelerating Module Physical Design for High Intensity Hadron Linac. KEK Report A, 2013-4, arXiv:1302.6287, June 2013.

21 V. Paramonov. Parameters of the Disk Loaded Waveguide structure for intermediate particles acceleration in the intermediate energy range. arXiv:1307.65-06, 24 p., 9 fig, 2013

22 O.M. Volodkevich, V.N. Zubets, Yu.V. Kiselev, V.S. Klenov "REMOTE CONTROL SYSTEM FOR H-MINUS IONS SOURCE OF INR LINAC" XXIII International Workshop on Charged Particle Accelerators, September 08-14, 2013, Ukraine, Alushta.

23 A.Zelenski, G.Atoian, J.Ritter, D.Steski, F.Podolyako, I.Sorokin, I.Vizgalov, V.Klenov, V.Zubets, V.Davydenko, A.Ivanov, A.Kolmogorov." The Rhic Polarized Source Upgrade", International Workshop on polarized ion sources, targets and polarimeters", PSTP 2013, Virginia, USA, September 2013

24 С.Е.Брагин, О.М.Володкевич, О.В.Грехов, Ю.В.Киселев, А.Н.Мирзоян, В.Н.Михайлов, В.А.Моисеев, Ф.В.Фещенко, "Развитие метода формирования и контроля пучка на мишени изотопного комплекса линейного ускорителя ИЯИ РАН", устный доклад на XXIII Международном семинаре по ускорителям заряженных частиц, Алушта, Украина, 08-14 сентября 2013 г.

25 Гаврилов С.А., Васильев И.А., Рейнгардт-Никулин П.И., Фещенко А.В. Ионизационный монитор поперечного сечения для двумерной неразрушающей диагностики пучков ионизирующих излучений с. 39–47. Журнал «Контроль и Диагностика» № 12, 2013. ISSN 0201-7032

26 Гаврилов С.А., Васильев И.А., Рейнгардт-Никулин П.И., Фещенко А.В. Первые результаты измерений профиля пучка по флуоресценции остаточного газа на ЛУ ИЯИ РАН. Стендовый доклад на 23 международном совещании по ускорителям заряженных частиц «Алушта 2013» 10-14 сентября 2013 г.

27 В.А.Моисеев, "Диагностика пучком поперечных геометрических погрешностей макроструктуры высокоэнергетичной части линейных ускорителей ионов", устный доклад на XXIII Международном семинаре по ускорителям заряженных частиц, Алушта, Украина, 08-14 сентября 2013 г.

28 В.А.Моисеев, "Метод минимизации потерь и улучшения качества пучка в высокоэнергетичной части линейного ускорителя ионов с геометрическими ошибками в поперечной плоскости макроструктуры", устный доклад на XXIII Международном семинаре по ускорителям заряженных частиц, Алушта, Украина, 08-14 сентября 2013 г.

### 8.2 Публикация к разделу 2

S.V.Akulinichev, V.N.Aseev, V.N.Vasiliev, Yu.K.Gavrilov, M.I.Grachev, V.I.Derziev, A.A.Kokoncev, D.A. Kokoncev, D.B.Lazebnik, E.V.Ponomareva, V.M.Skorkin, L.A.Yakovlev "Application the INR proton linac for development of methods of radiotherapy and nuclear medicine"

, XXIII Международный семинар по ускорителям заряженных частиц, 08-14 сентября, 2013г. Алушта, Крым

#### 8.3 Публикации к разделу 3

1 В.М. Скоркин, С.В. Акулиничев /Система мониторирования транспортировки пучка протонов на облучательные установки Тезис доклада на XIII Межд. Семинаре по ускорителям заряж. частиц. 08-14 сентября 2013. Алушта, Крым. С. 112. – Принято в журн. VANT.

2 С.В. Акулиничев, В.М. Скоркин /Дозиметрические исследования фотон захватных реакций на медицинском ускорителе СЛ75/Пленарный доклад на 9-ой Международной конференции «Ядерная и радиационная физика», 24-27 сентября 2013 г. Алматы. Казахстан. С. 262.

3 S.V. Akulinichev, V. N. Aseev, Yu. K. Gavrilov. A PROTON DOSE DISTRIBUTION IN A PROSEDURAL OF THE PROTON THERAPY COMPLEX OF INR RAS // International Seminar on charged particle accelerators. "IWCPA 2013", Crimea, Alushta, 08-14 September 2013. Пленарный доклад на международной конференции.

4 S.V. Akulinichev, V.N. Aseev, V.N. Vasiliev, Yu.K. Gavrilov, M.I. Grachev, V.I. Derzhiev, A.A. Kokoncev, D.A. Kokoncev, D.B. Lazebnik, E.V. Ponomareva, V.M. Skorkin, I.A. Yakovlev/ Application of the INR proton LINAC for development of methods of radiotherapy and nuclear medicine. Пленарный доклад на международной конференции, опубликован в «ВАНТ- Вопросы атомной науки и техники» 2013. № 6(88). http://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT\_2013\_6/article\_2013\_6\_183.pdf.

5 Акулиничев С.В., Антанович А.А., Бражкин В.В., Держиев В.И., Зибров И.П., Филоненко В.П. «Источник для брахитерапии». Патент на полезную модель RU 131302 U1 (2013г.).

6 В.Н. Васильев, А.А. Коконцев, С.В. Акулиничев. Связь между кермой в воздухе и поглощенной дозой в воде при близкофокусной рентгенотерапии, «Медицинская физика», 2013, №3 (59) с. 5-14.

7 Акулиничев С.В., Антанович А.А., Бражкин В.В., Держиев В.И., Зибров И.П.,
 Филоненко В.П. «Источник для брахитерапии». Патент на полезную модель RU 131302 U1 (2013г.).

## 8.4 Публикации к разделу 4

1 B.L. Zhuikov. Production of medical radioisotopes in Russia: status and future. A review. Appl. Radiat. Isotop., V. 84, P. 48-56.

2 В. М. Чудаков, Б. Л. Жуйков, С. В. Ермолаев, В. М. Коханюк, М. И. Мостова, В. В. Зайцев, С. В. Шатик, Н.А. Костеников, Д. В. Рыжкова, Л. А. Тютин. Исследование характеристик генератора рубидия-82 для ПЭТ-исследований. Радиохимия, 2014, Вып. 4. Принято к печати.

3 B.L. Zhuikov. A potential for production medical radionuclides in Russia. The First Russian-Nordic Symposium on Radiochemistry, 21-24 October, 2013. Abstracts, Edited by: S.N. Kalmykov, V.G. Petrov and A.Yu. Romanchuk. IDEA PRINT, P. 108.

4 E. Lapshina, S. Ermolaev, B. Zhuikov, S. Kalmykov, R. Aliev, V. Ostapenko, A. Vasiliev. Separation of 225Ac from radionuclides generated by proton irradiated of natural thorium using extraction chromatography. 9th Int. Conference on the Chemistry and Physics of the Actinide Elements, ACTINIDES 2013, Karlsruhe, Germany, July 21-26, 2013, JRC 84465. Abstract Booklet, p. 210-211.

5 Е.В. Лапшина, С.В. Ермолаев, Б.Л.Жуйков, С.Н. Калмыков, Р.А.Алиев, В.С.Остапенко, А.Н. Васильев. Экстракционно-хроматографическое отделение 225Ac от радионуклидов, образующихся при облучении протонами природного тория. Первая Российская конференция по медицинской химии (MedChem Russia-2013) с международным участием, 8-12 сентября, 2013, Тезисы докладов, с.83.

6 В.М. Чудаков, С.В. Ермолаев, Б.Л. Жуйков, М.И. Мостова, С.В. Шатик, В.В. Зайцев, Л.А. Тютин. Эффективность элюирования рубидия-82 из 82Sr/82Rb генератора. Первая Российская конференция по медицинской химии (MedChem Russia-2013) с международным участием, 8-12 сентября, 2013. Тезисы докладов, с.59.

7 С.В. Ермолаев. Генераторы короткоживущих альфа-излучающих радионуклидов: 225Ac→221Fr→213Bi и 223Ra→219Rn→211Pb. Первая Российская конференция по медицинской химии (MedChem Russia-2013) с международным участием. Москва, 8-12 сентября 2013, Тезисы докладов, с.58.

8 R.A. Aliev, S.V. Ermolaev, A.N. Vasiliev, V.S. Ostapenko, E.V. Lapshina, B.L. Zhuikov, N.V. Zakharov, V.V. Pozdeev, V.M. Kokhanyuk, B.F. Myasoedov, S.N. Kalmykov. Isolation of medicine-applicable actinium-225 from thorium targets irradiated by medium-energy protons. Solvent Extraction and Ion Exchange, 2014 to be published.

9 V.S. Ostapenko, A.N. Vasiliev, E.V. Lapshina, S.V. Ermolaev, S.N. Kalmykov, R.A. Aliev. Separation and preconcentration of actinides and rare earth elements by extraction chromatography. The First Russian-Nordic Symposium on Radiochemistry "RNSR-2013": Moscow, 21-24 October 2013, Abstracts, p.103.

10 A. N. Vasiliev, V.S. Ostapenko, R.A. Aliev, S. N. Kalmykov, E.V. Lapshina, S.V. Ermolaev, B.L. Zhuikov. Production of actinium-225 from natural thorium irradiated with protons.

5th Asia-Pacific Symposium Symposium on Radiochemistry (APSORC 13), Kanazawa, Japan, September 22-27, 2013. Book of Abstracts, p. 334.

11 B.L. Zhuikov, S. V. Ermolaev, V. M. Kokhanyuk. Method for producing radiostrontium. European Patent: EP 2 259 269 B1. Date of publication of the grant of the patent: 05.06.2013.

12 B.L. Zhuikov, S. N. Kalmykov, R.A. Aliev, S.V. Ermolaev, V.M. Kokhanyuk, N. A. Koniakhin, I.G. Tananaev, B.F. Myasoedov. METHOD FOR PRODUCING ACTINIUM-225 AND ISOTOPES OF RADIUM AND TARGET FOR IMPLEMENTING SAME. Canadian patent 2738308, 27.09.2013.

13 В.М. Чудаков, Б.Л.Жуйков, В.М. Коханюк. Генератор рубидия-82 и способ его приготовления. Заявка на патент РФ № 2013156953 от 23.12.2013.

8.5 Публикации к разделу 5

8.5.1 Публикации к разделу 5.1

A.I. Belesev, A.I. Berlev, E.V. Geraskin, A.A. Golubev, N.A. Likhovid, A.A. Nozik, V.S. Pantuev, V.I. Parfenov, A.K. Skasyrskaya, "An upper limit on additional neutrino mass eigenstate in 2 to 100 eV region from Troitsk nu-mass data", Письма в ЖЭТФ, том 97, (2013), стр. 67.

2 2. A.I. Belesev, A.I. Berlev, E.V. Geraskin, A.A. Golubev, N.A. Likhovid, A.A. Nozik, V.S. Pantuev, V.I. Parfenov, A.K. Skasyrskaya, "A search for an additional neutrino mass eigenstate in 2 to 100 eV region from Troitsk nu-mass data - detailed analysis", Journal of Physics G – Nuclear and Particle Physics, 41 (2014), 015001

# 8.5.2 Публикация к разделу 5.2

L. Bartoszek,...,R.Djilkibaev, et. al. "Mu2e conceptual design report", FNAL, Fermilab-TM-2545, http://arxiv.org/abs/1211.7019v1

8.5.3 Публикация к разделу 5.3

Valeriy Nazaruk, arXiv:1312.4912 [nucl-th] (2013) Limit on the neutron-antineutron transitions in the alternative models.

# 8.5.4 Публикации к разделу 5.5

1 A. Adare et al., Nuclear modification of psi^prime, chi\_c and J/psi production in d+Au collisions at sqrt(s\_NN) = 200 GeV. Phys.Rev.Lett. 111 (2013) 202301.

2 Adare et al., Medium modification of jet fragmentation in Au+Au collisions at sNN−V=200 GeV measured in direct photon-hadron correlations. Phys.Rev.Lett. 111 (2013) 032301.

3 A. Adare et al., Quadrupole anisotropy in dihadron azimuthal correlations in central d+Au collisions at sqrt(s\_NN)=200 GeV. Phys.Rev.Lett. 111 (2013) 212301.

4 A. Adare et al., υ(1S+2S+3S) production in d+Au and p+p collisions at sNN–V=200 GeV and cold-nuclear matter effects. Phys.Rev. C87 (2013) 044909.

5 A. Adare et al., Inclusive cross section and single-transverse-spin asymmetry for very forward neutron production in polarized p+p collisions at sV=200 GeV. Phys.Rev. C88 (2013) 032006.

6 A. Adare et al., Spectra and ratios of identified particles in Au+Au and d+Au collisions at sqrt(s NN)=200 GeV. Phys.Rev. C88 (2013) 024906.

7 A. Adare et al., Neutral pion production with respect to centrality and reaction plane in Au+Au collisions at sNN-V=200 GeV. Phys.Rev. C87 (2013) 034911.

8 A. Adare et al., Direct photon production in d+Au collisions at sNN-V=200 GeV. Phys.Rev. C87 (2013) 054907.

9 A. Adare et al., Transverse-Momentum Dependence of the J/ $\psi$  Nuclear Modification in d+Au Collisions at sNN–V=200 GeV. Phys.Rev. C87 (2013) 034904.

10 A. Adare et al., Double Spin Asymmetry of Electrons from Heavy Flavor Decays in p+p Collisions at sv=200 GeV. Phys.Rev. D87 (2013) 012011.

#### 8.5.5 Публикации к разделу 5.6

1 Effective Strange Quark/Antiquark Masses from the Chiral Soliton Models for Baryons, Vladimir B. Kopeliovich (Moscow, INR & Moscow, MIPT). Sep 10, 2013. Conference: C12-10-08.1 Proceedings. e-Print: arXiv:1309.2555 [hep-ph] | PDF

2 Baryon Number Violation K.S. Babu, E. Kearns, U. Al-Binni, S. Banerjee, D.V. Baxter, Z. Berezhiani, M. Bergevin, S. Bhattacharya, S. Brice, R. Brock et al.. Nov 20, 2013. 39 pp. e-Print: arXiv:1311.5285 [hep-ph] | PDF. Neutron-Antineutron Oscillations: A Snowmass 2013 White Paper

3 K. Babu (Oklahoma State U.), S. Banerjee (Saha Inst.), D.V. Baxter (Indiana U.), Z. Berezhiani (Gran Sasso & L'Aquila U.), M. Bergevin (UC, Davis), S. Bhattacharya (Saha Inst.), S. Brice (Fermilab), T.W. Burgess (Oak Ridge), L. Castellanos (Tennessee U.), S. Chattopadhyay (Saha Inst.) et al.. Oct 31, 2013. 26 pp. e-Print: arXiv:1310.8593 [hep-ex] | PDF Project X: Physics Opportunities

4 Andreas S. Kronfeld (ed.), Robert S. Tschirhart (ed.), Usama Al-Binni, Wolfgang Altmannshofer, Charles Ankenbrandt, Kaladi Babu, Sunanda Banerjee, Matthew Bass, Brian Batell,
David V. Baxter et al.. Jun 20, 2013. 219 pp. FERMILAB-TM-2557, BNL-101116-2013-BC-81834, JLAB-ACP-13-1725, UASLP-IF-13-001, SLAC-R-1029, ANL-PHY-13-2, PNNL-22523, LBNL-6334E, e-Print: arXiv:1306.5009 [hep-ex] | PDF

5 Effective Strange Quark/Antiquark Masses from Chiral Soliton Models for Exotic Baryons, Vladimir Kopeliovich (Moscow, INR). 2012. 5 pp. Published in PoS ConfinementX (2012) 305 Conference: C12-10-08.1 Proceedings

6 Neutron Rich Hypernuclei in Chiral Soliton Model Vladimir B. Kopeliovich (Moscow, INR). Mar 2012. 8 pp. PoS ConfinementX (2012) 253 Conference: C12-10-08.1 Proceedings

7 Quantized Multiskyrmions as Possible Nuclear Bound States of Antikaons Irina Potashnikova (Santa Maria U., Valparaiso), Vladimir Kopeliovich (Moscow, INR). 2012. 4 pp. Published in PoS ConfinementX (2012) 306 Conference: C12-10-08.1 Proceedings

8.5.6 Публикации к разделу 5.7

1. M. Nanova, V. Metag, E. Ya. Paryev et al (yet 59 co-authors). Determination of the eta/prime-nucleus optical potential. Phys. Lett. B 727 (2013) 417-423.

2. E. Ya. Paryev. Photoproduction of eta/prime mesons off nuclei and their properties in the nuclear medium. J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 40(2013)025201.

3. M. Nanova, V. Metag, E. Ya. Paryev et al (yet 59 co-authors). Determination of the eta/prime-nucleus optical potential. ArXiv: 1311.0122 [nucl-ex] (2013).

# 8.5.10 Публикации к разделу 5.10

1 S.G.Lebedev, "Field Effect Switching in Nano-Graphite Films" to be published in Physics and Chemistry of Solids, 2013.

2 S.G.Lebedev, "Nano-Graphite Films for Solid State Electronic Applications", Advances in High Energy Physics, Volume 2013 (2013), Article ID 612582, 6 pages.

3 S.G.Lebedev, "Field-Effect Switching in Nano-Graphite Films" arXiv preprint arXiv:1303.3190, 2013.

4 Sergey G. Lebedev in: Frontiers in Electronic Materials: A Collection of Extended Abstracts of the Nature Conference Frontiers in Electronic Materials, June 17 to 20 2012, Aachen, Germany, 2013.

5 С.Г.Лебедев, «Бесконтактный быстрый самоограничитель тока на углеродной пленке для электрических сетей» Представление проекта на встрече с инвесторами - бизнес – ангелами в Сколково 23 июля 2013 г.

6 С.Г.Лебедев, «Каррент Лимитед: Разработка бесконтактных токоограничителей для электрических сетей» представление проекта на сессии Троицкого инновационного кластера 3 декабря 2013 г.

7 В.Э.Янц, С.Г.Лебедев «ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕРМОЯДЕРНОЙ ПЛАЗМЫ ГАЗОВЫМ ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫМ ДЕТЕКТОРОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭФФЕКТА БРЕГГА» Препринт ИЯИ РАН, 1368/2013, 2013.

8 В.Э.Янц, С.Г.Лебедев, Н.М.Соболевский, «Геохронология и мониторинг космических лучей по накоплению космогенных изотопов 53Mn, и 10Ве в земных породах» Препринт ИЯИ РАН, 1376/2013, 2013.

9 С.Г.Лебедев, «Исследование магнитной структуры нанографитовых пленок» предложение в программу перспективных исследований на ММФ» статья в сборнике «Программа перспективных исследований на ММФ» ИЯИ РАН, 2013.

10 Л.В.Кравчук, С.Г.Лебедев, «Измерение фононных мод нанокомпозита фононных резонаторов», статья в сборнике «Программа перспективных исследований на ММФ» ИЯИ РАН, 2013.

11 В.Э.Янц, С.Г.Лебедев, Н.М.Соболевский, «Измерение методом нейтронного активационного анализа накопления космогенного изотопа 53Mn в образцах земного грунта с целью реконструкции ретроспективной динамики космических лучей, а также периодов оледенений, водных погружений, вулканических извержений и изменений климата», предложение в программу перспективных исследований на ММФ» статья в сборнике «Программа перспективных исследований на ММФ» ИЯИ РАН, 2013.

12 В.Э.Янц, С.Г.Лебедев, «Разработка радиохимических методов контроля интенсивных нейтронных потоков, пространственного распределения нейтронных полей и термометрии термоядерной плазмы», статья в сборнике «Программа перспективных исследований на ММФ» ИЯИ РАН, 2013.

13 С.Г.Лебедев, «Установка радиационного материаловедения РАДЭКС», статья в сборнике «Программа перспективных исследований на ММФ» ИЯИ РАН, 2013.

14 С.Г.Лебедев, «Разработка бесконтактных переключателей- ограничителей тока для электрических сетей» заявка в ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным

## 8.5.11 Публикации к разделу 5.11

1 L.V.Kravchuk, S.G.Lebedev. "NANOCOMPOSITE OF PHONON RESONATORS", International Review of Physics (IREPHY), v.6, N6, 2012.

2 С.Г.Лебедев В.Э.Янц «ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕРМОЯДЕРНОЙ ПЛАЗМЫ ГАЗОВЫМ ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫМ ДЕТЕКТОРОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭФФЕКТА БРЕГГА» Препринт ИЯИ РАН, 2013.

3 Л.В.Кравчук, С.Г.Лебедев, «Измерение фононных мод нанокомпозита фононных резонаторов», статья в сборнике «Программа перспективных исследований на ММФ» ИЯИ РАН, 2013.

4 Л.В.Кравчук, С.Г.Лебедев, «Разработка технологии получения нанокомпозита «фононных резонаторов», предложение по формированию тематики исследований и разработок по областям государственной программы "Развитие науки и технологий" на 2013 - 2020 годы Минобрнауки, 2013. <u>https://reestr.extech.ru/experty/tematika/tematika\_list.php</u>

8.6 Публикации к разделу 6

8.6.1 Публикации к разделу 6.1

1 Е.С.Конобеевский, С.В.Зуев, М.В.Мордовской, С.И.Поташев, И.М.Шарапов / РЕАКЦИЯ nd-РАЗВАЛА КАК ИНСТРУМЕНТ ИЗУЧЕНИЯ НЕЙТРОН-НЕЙТРОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ // ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА. 2013. Т.76. №11. С.1479-1483.

2 Ю.М.Бурмистров, С.В.Зуев, Е.С.Конобеевский, М.В.Мордовской, С.И.Поташев, И.М.Шарапов / УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КВАЗИСВОБОДНОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНА НА НЕЙТРОНЕ В ИНТЕРВАЛЕ ЭНЕРГИИ 20–60 МэВ // ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ. 2013. Т.77. № 7. С.924-926.

3 Е.С. Конобеевский, М.В. Мордовской, С.И. Поташев, С.В. Зуев, И.М. Шарапов / Спектрометр нейтронного пучка на базе сцинтилляционного детектора с n-γ разделением по форме импульса // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2013. Т. 77. №7. С.919

4 E.S. Konobeevski, M.V. Mordovskoy, I.M. Sharapov, S.V. Zuyev // COMPARISON OF VARIOUS SCINTILLATION DETECTORS WITH n-γ PULSE SHAPE DISCRIMINATION // In Proc. of 4th International Conference Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy (NPAE-Kyiv2012) September 3 - 7, 2012, Kyiv, Ukraine, P.632

5 E. S. Konobeevski, M. V. Mordovskoy, I. M. Sharapov, S. V. Zuyev / Neutron-gamma discrimination in organic scintillators using various pulse-shape parameters // EMIN-2012 XIII International Seminar on Electromagnetic Interactions of Nuclei September 20-23, 2012, Moscow, Russia, P.173

6 Е.С. Конобеевский, С.В.Зуев, А.А.Каспаров / Кинематическое моделирование ядерных реакций с тремя частицами в конечном состоянии и определение параметров детектирующей системы// Труды Всероссийской научной конференции "Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в современном информационном обществе". Москва, МФТИ, 25–30 ноября 2013 года, С.125

7 Е.С. Конобеевский, В.И. Кукулин, С.В. Зуев, В.М. Лебедев, М.В. Мордовской, А.В. Спасский / Исследование нейтрон-нейтронных и протон-протонных корреляций в малонуклонных системах в реакциях с двумя нуклонами в конечном состоянии // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2014. Т. 78

8 Е.С. Конобеевский, М.В.Мордовской, С.В.Зуев / Система сбора информации для совпадательных экспериментов на основе цифровых анализаторов формы импульса // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2014. Т. 78 (в печати) Е.С. Конобеевский, А.А.Каспаров, С.В.Зуев / Программа моделирования экспериментов по исследованию реакций с тремя частицами в конечном состоянии // Известия Российской академии наук. 2014. Т. 78

9 E.S.Konobeevski, S.V.Zuyev, A.A.Kasparov, V.V.Ostashko / THE RESULTS OF SIMULATION OF  $d + T \rightarrow 3He + 2n$ ;  $2n \rightarrow n + n$  REACTION // Few Body Problems 2014

10 E. Konobeevski, V. Lebedev, M. Mordovskoy, A. Spasskii, S. Zuyev / Study of neutronneutron interaction in proton pick-up reactions on 3H// EPJ Web of Conferences 2014

11 E.S.Konobeevski, S.V.Zuyev, A.A.Kasparov, V.V.Ostashko / THE RESULTS OF SIMULATION OF  $d + T \rightarrow 3He + 2n$ ;  $2n \rightarrow n + n$  REACTION // Proceedings of The 22nd European Conference on Few-Body Problems in Physics "EFB22" Kraków, Poland, 9 - 13 September 2013.

12 E. Konobeevski, V. Lebedev, M. Mordovskoy, A. Spasskii, S. Zuyev / Study of neutronneutron interaction in proton pick-up reactions on 3H // Сборник тезисов международной конференции «International Nuclear Physics Conference INPC2013. 2-7 June 2013, Firenze, Italy»

13 Е.С. Конобеевский, В.М.Лебедев, М.В.Мордовской, А.В.Спасский, С.В.Зуев / Исследование нейтрон-нейтронного взаимодействия в реакциях с двумя нейтронами в конечном состоянии // Тезисы доклада на 63 Международной конференции «ЯДРО 2013», Москва, МИФИ, 8–12 октября 2013 г.

14 Е.С. Конобеевский, М.В.Мордовской, С.В.Зуев / Система сбора информации для совпадательных экспериментов на основе цифровых анализаторов формы импульса // Тезисы доклада на 63 Международной конференции «ЯДРО 2013», Москва, МИФИ, 8–12 октября 2013 г.

15 Е.С. Конобеевский, А.А.Каспаров, С.В.Зуев / Программа моделирования экспериментов по исследованию реакций с тремя частицами в конечном состоянии// Тезисы

доклада на 63 Международной конференции «ЯДРО 2013», Москва, МИФИ, 8–12 октября 2013 г.

#### 8.6.2 Публикации к разделу 6.2

1 В. П. Заварзина, В. Е. Пафомов, В. А. Сергеев /«СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМИ СЕЧЕНИЯМИ ДИФРАКЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ СРЫВА НУКЛОНА И СРЫВА ОСТОВА ГАЛО ЯДРА.// ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2013, том 77, № 4, с. 517–521.

2 V. P. Zavarzina, V. E. Pafomov, and V. A. Sergeev /Relations between the Differential Cross Sections for Diffractive Processes of Nucleon Stripping and Halo\_Nucleus Core Stripping.// Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics, 2013, Vol. 77, No. 4, pp. 466–470.

3 V.E. Pafomov, V.A. Sergeev, V.P. Zavarzina. /ON SOME APPROXIMATIONS IN THE THEORY OF REACTIONS WITH HALO NUCLEI. //Доклад на 63 Международной конференции «ЯДРО 2013», Москва, МИФИ, 8–12 октября 2013 г.

4 Ю.К. Хохлов // Замечания об электромагнитных волнах в среде с отрицательными ε и μ / КСФ №7, с. 6 (2013)

5 В печати: Ю.К. Хохлов // К теории электромагнитных волн в сплошных средах / КСФ (2014)

## 8.6.3 Публикации к разделу 6.3

1 А.В.Андреев, Ю.М.Бурмистров, С.В.Зуев, Е.С.Конобеевский, М.В.Мордовской, В.И.Фирсов. НИЗКОФОНОВЫЙ ГАММА СПЕКТРОМЕТР С ЗАЩИТОЙ НА АНТИСОВПАДЕНИЯХ ОТ КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ. ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА И ИНЖИНИРИНГ, 2013, том 4, № 9–10, с.879–882.

2 A.V.Andreev, Yu.M.Burmistrov, E.S.Konobeevski, M.V.Mordovskoy, S.V.Zuyev, V.I.Firsov. LOW-BACKGROUND CHAMBER FOR THE GERMANIUM GAMMA SPECTROMETER. The 4-th International Conference "Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy (NPAE-Kyiv2012)", September 3-7, 2012, Kyiv, Ukraine. Proceedings, Kyiv, 2013, p.519.

3 A.V.Andreev, Yu.M.Burmistrov, A.M.Gromov, E.S.Konobeevski, M.V.Mordovskoy, G.V.Solodukhov, S.V.Zuyev, V.I.Firsov, Yu.M.Zipenyuk. ELECTRON LINEAR ACCELERATOR LUE-8-5 WITH W-Be PHOTONEUTRON TARGET AS A NEUTRON SOURCE. The 4-th International Conference "Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy (NPAE-Kyiv2012)", September 3-7, 2012, Kyiv, Ukraine. Proceedings, Kyiv, 2013, p.522.

4 V.M.Skorkin, S.V.Akulinichev, A.V.Andreev. STUDY OF NEUTRON CAPTURE BY MEDICAL NUCLIDES AT IRRADIATION FACILITIES OF INR RAS. The 4-th International Conference "Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy (NPAE-Kyiv2012)", September 3-7, 2012, Kyiv, Ukraine. Proceedings, Kyiv, 2013, p.575-579.

5 A.V.Andreev, Yu.M.Burmistrov, E.S.Konobeevski, M.V.Mordovskoy, S.V.Zuyev, V.I.Firsov. LOW BACKGROUND GAMMA-SPECTROMETER WITH COSMIC RAY ANTICOINCIDENCE SHIELDING. Proceedings of the XIII International Seminar on electromagnetic interactions of nuclei (EMIN-2012), Moscow, September 20-23, 2012. INR RAS, Moscow, 2013.

6 A.V.Andreev, Yu.M.Burmistrov, A.M.Gromov, E.S.Konobeevski, M.V.Mordovskoy, G.V.Solodukhov, S.V.Zuyev, V.I.Firsov. ELECTRON LINEAR ACCELERATOR LUE-8-5 WITH W-Be PHOTONEUTRON TARGET AS A NEUTRON SOURCE. Proceedings of the XIII International Seminar on electromagnetic interactions of nuclei (EMIN-2012), Moscow, September 20-23, 2012. INR RAS, Moscow, 2013, p.148.

7 Андреев А.В., Бурмистров Ю.М., Зуев С.В., Керзин А.Л., Конобеевский Е.С., Мордовской М.В., Фирсов В.И. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ НИЗКОФОНОВОЙ КАМЕРЫ С ГЕРМАНИЕВЫМ ГАММА-СПЕКТРОМЕТРОМ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ. Тезисы докладов Второго съезда аналитиков России,23-27 сентября,2013,Москва (http://www.wssanalytchem.org /car2013/doc/Abstracts-CRusAn2013.pdf), Москва. 2013. С.123.

8 L.N.Latysheva, A.V.Andreev, S.V.Zuyev, E.S.Konobeevski, N.M.Sobolevsky, G.V.Solodukhov, R.D.Ilic. MONTE-KARLO SIMULATION OF THE PHOTONEUTRON SOURCE OF THERMAL NEUTRONS BASED ON THE ELECTRON ACCELERATOR LUE-8 INR RAS. LXIII INTERNATIONAL CONFERENCE "NUCLEUS 2013" FUNDAMENTAL PROBLEMS IN NUCLEAR PHYSICS, ATOMIC POWER ENGINEERING AND NUCLEAR TECHNOLOGIES (LXII MEETING ON NUCLEAR SPECTROSCOPY AND NUCLEAR STRUCTURE), October 8-12, 2013, Moscow, Russia. BOOK OF ABSTRACTS, p.239.

9 A.V.Andreev, Yu.M.Burmistrov, A.M.Gromov, E.S.Konobeevski, M.V.Mordovskoy, G.V.Solodukhov, S.V.Zuyev, V.I.Firsov, Yu.M.Zipenyuk. ON THE ESTIMATION OF NAA SETUP ABILITY BASED ON THE ELECTRON LINAC LUE-8 WITH W-Be PHOTONEUTRON TARGET. LXIII INTERNATIONAL CONFERENCE "NUCLEUS 2013" FUNDAMENTAL PROBLEMS IN NUCLEAR PHYSICS, ATOMIC POWER ENGINEERING AND NUCLEAR TECHNOLOGIES (LXII MEETING ON NUCLEAR SPECTROSCOPY AND NUCLEAR STRUCTURE), October 8-12, 2013, Moscow, Russia. BOOK OF ABSTRACTS, p.251.

8.6.4 Публикации к разделу 6.4

1 Д.А. Заикин, М.В. Мордовской, И.В. Суркова / Параметр диффузности четно-четных ядер в области 58≤А≤250 и оптическая модель со связью каналов // Известия РАН, сер. Физ. том 77, № 4, с. 449–452, 2013.

2 M.V. Mordovskoy, I.V. Surkova / Isotopic feature of Nn Np function for even-even isotope chains of Ni and Zn// BOOK OF ABSTRACTS LXII International Conference NUCLEUS 2013. P. 147.

3 Mordovskoy M.V., Osipchuk I.I./Direct and compound reactions of neutrons with nuclei // Доклад на на XXV конференции IUPAP по вычислительной физике, Москва, 20.08.2013 — 24.08.2013.

## 8.6.5 Публикации к разделу 6.5

1 Б.А. Бенецкий /О влиянии человеческого фактора на распределение тяжести поражений при ядерных и радиационных авариях и на последствия других чрезвычайных ситуаций// КСФ, 2014, В печати № 5009.(корректура 16.12.2013).

2 М.Н. Лифанов, Б.А. Бенецкий /Проблемы дозиметрии при ликвидации последствий ядерных и радиационных аварий//Ядерная физика и инжиниринг, 2014, том 4, № 12, С 1-6.

3 М.Н. Лифанов. Б.А. Бенецкий. Доклад на 63 Международной конференции «ЯДРО-2013»/Проблемы дозиметрии при ликвидации последствий ядерных и радиационных аварий//LXIII International Conference NUCLEUS 2013 BOOK OF ABSTRACTS October 8-12 2013 Moscow, Russia – SAINT-PETERSBURG, 2013, P.250.

4 Патент на полезную модель «Имитатор-тренажер дозиметр-радиометр». Решение Роспатента от 19.09.2013, приоритет от 06.08.2013, автор М.Н.Лифанов, патентодержатель ИЯИ РАН.

#### 8.7 Публикации к разделу 7

1 А.А.Алексеев, А.А.Бергман, А.И.Берлёв, Э.А.Коптелов, А.С.Егоров, Б.Ф.Самылин, Б.И.Фурсов, В.С.Шорин.// «Сечение подбарьерного деления 241Am».//«Ядерная физика», в печати.

2 Л.Н.Латышева, А.А.Бергман, Н.М.Соболевский, Р.Д.Илич. // О влиянии размеров экспериментальных каналов спектрометра по времени замедления в свинце СВЗ-100 ИЯИ РАН на константу замедления. // Ядерная Физика 76(2013)501-505.

Английский вариант: L.N.Latysheva, A.A.Bergman, N.M.Sobolevsky, R.D.Ilić. // Effect of the Size of Experimental Channels of the Lead Slowing-Down Spectrometer SVZ-100 (Institute of Nuclear Research, Moscow) on the Moderation Constant. // Phys.Atom.Nucl.76(2013)464–468.

3 L.Latysheva, N.Sobolevsky, Radovan D. Ilić. // Computational study of the neutron's slowing-down for spallation neutron sources on proton beams. // Invited talk at the NUFRA2013 International Conference Kemer, Turkey, September 29 – October 6, 2013, http://fias.uni-frankfurt.de/historical/nufra2013/

4 Ю.Е.Титаренко, В.Ф.Батяев, К.В.Павлов, А.Ю.Титаренко, В.И.Рогов, В.М.Живун, К.А.Герасимов (ФГБУ«ГНЦ РФ ИТЭФ»); Н.М.Соболевский (ИЯИ РАН); А.М.Волощенко (ИПМ РАН); П.Н.Алексеев, П.А.Фомиченко, А.А.Дудников, В.А.Невиница, А.А.Седов, А.А.Фролов, А.С.Любина, А.Л.Баланин (НИЦ КИ); А.Станковский, Герд Ван ден Эйнде (Молл, Бельгия), С.Г. Машник (ЛАНЛ, США). / Аналитический бенчмарк вычисления нейтронно-физических параметров мишенного узла ЭлЯУ. // ФЭИ, XXIV научно-технический семинар «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики (Нейтроника-2013)», Обнинск, 5-8 ноября 2013 года.

5 Troitsk ADS project». приглашенный доклад на конференции ThEC13 (Ториевая энергетическая конференция) 27.10 - 31.10.2013 г. Женева, Швейцария. https://indico.cern.ch/contributionDisplay.py?contribld=46&sessionId=12&confld=222140

https://indico.cern.ch/getFile.py/access?contribId=46&sessionId=12&resId=1&materialId=slides&c onfId=222140

6 Дегтярев А.М., Коляскин О.Е., Мясников А.А., Пономарев Л.И. (НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва), Карманов Ф.И. (ИАТЭ НИЯУ МИФИ, г. Обнинск), Серегин М.Б. (ВНИИХТ, г. Москва), Сидоркин С.Ф. (ИЯИ РАН, г. Москва).// Жидкосолевой подкритический реактор - сжигатель трансплутониевых актиноидов // Атомная энергия, 2013, т. 114, вып. 4, апрель, с. 183-188

7 Научная сессия НИЯУ МИФИ-2013. Размножающие характеристики соли LiF-NaF-KF-PuF3 как первичной мишени в модели подкритического жидкосолевого реактора для пережигания минорных актинидов. Дегтярев А.М. (РНЦ «Курчатовский институт», Москва); Блохин А.И. (ФГУП «ГНЦ РФ - ФЭИ», Обнинск), Ефремов Р.О., Карманов Ф.И. (ИАТЭ НИЯУ МИФИ, Обнинск), Сидоркин С.Ф. (ИЯИ РАН, Москва)

8 N.Sobolevsky. // Nuclear models and data in SHIELD-HIT. // Talk at 7th Danish Workshop on Particle Therapy: Nuclear fragmentation models in Monte Carlo codes relevant for particle therapy, 23-24 January 2013, Aarhus University, Denmark. 9 A.Botvina. // Models of nuclear reactions relevant for medical applications. // Talk at 7th Danish Workshop on Particle Therapy: Nuclear fragmentation models in Monte Carlo codes relevant for particle therapy, 23-24 January 2013, Aarhus University, Denmark.

10 N.Bassler, D.C.Hansen, A.Luehr, B.Thomsen, J.B.Petersen, N.Sobolevsky. // SHIELD-HIT12A - a Monte Carlo particle transport program for ion therapy research. // Proc. of the Int. Conf. on the Use of Computers in Radiation Therapy, 6–9 May 2013, Melbourne, Australia. Journal of Physics: Conference Series (JPCS), in print.

11 J.Toftegaard, A.Luehr, N.Sobolevsky, N.Bassler. // Improvements in the stopping power library libdEdx and release of the web GUI dedx.au.dk. // Poster presentation at the Int. Conf. on the Use of Computers in Radiation Therapy, 6–9 May 2013, Melbourne, Australia. Journal of Physics: Conference Series (JPCS), in print.

12 A.Luehr, M.Priegnitz, F.Fiedler, W.Enghardt, N.Sobolevsky, N.Bassler. // Dependence of simulated positron emitter yields in ion beam cancer therapy on modeling nuclear fragmentation. // Appl. Radiat. Isot., Available online 3 January 2013, http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969804312006082

13 V.A. Karnaukhov, A.S. Botvina. // Comment on 'The experimental liquid-vapor phase diagram of bulk nuclear matter'. // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 40 (2013) 058001 (2 pages).

14 N.Eren, N.Buyukcizmeci, R.Ogul, and A.S.Botvina. // Mass distribution in the disintegration of heavy nuclei. // Eur. Phys. J. A49 (2013) 48-54.

15 N.Buyukcizmeci, A.S.Botvina, I.N.Mishustin, R.Ogul, M.Hempel, J.Schaffner-Bielich, F.-K.Thielemann, S.Furusawa, K.Sumiyoshi, S.Yamada, H.Suzuki. / A comparative study of statistical models for nuclear equation of state of stellar matter. // Nucl. Phys. A907 (2013) 13-54.

16 N.Buyukcizmeci, A.S.Botvina, I.N.Mishustin. / Tabulated equation of state for supernova matter including full nuclear ensemble. // arXiv:1304.6741 [nucl-th], 2013, http://fias.uni-frankfurt.de/physics/mishus/research/smsm/. Submited to Astrophysical Journal.

17 A.S.Botvina. / Production of exotic hypernuclei from excited nuclear systems. // Nucl. Phys. A914 (2013) 401-404.

18 A.S. Botvina. / Production of hypernuclei in collisions of relativistic ions. // Invited talk at HypHI collaboration meeting. GSI, Darmstadt, Germany, March 26, 2013.

19 A.Botvina, J.Pochodzalla, K.Gudima, A.Sanchez Lorente, N.Buyukcizmeci, S.Steinheimer, I.Mishustin, M.Bleicher. / Production of hypernuclei from excited nuclear residues formed in relativistic ion collisions. // Invited talk at the NUFRA2013 International Conference Kemer, Turkey, September 29 – October 6, 2013, http://fias.uni-frankfurt.de/historical/nufra2013/

20 A.S.Botvina. / Production of exotic hypernuclei and hyper-matter. (Proposal of new experiments with the nuclotron beams at JINR Dubna, submitted to the NICA White Book.) // arXiv:1305.5474 [nucl-th], http://arxiv.org/abs/1305.5474

21 A.Esser, S.Nagao, F.Schulz, S.Bleser, M.Steinen, P.Achenbach, C.Ayerbe Gayoso, R.Boehm, O.Borodina, D.Bosnar, A.Botvina, V.Bozkurt, L.Debenjak, M.O.Distler, I.Friscic, Y.Fujii, T.Gogami, M.Gomez Rodriguez, O.Hashimoto, S.Hirose, H.Kanda, M.Kaneta, E.Kim, Y.Kohl, J.Kusaka, A.Margaryan, H.Merkel, M.Mihovilovic, U.Mueller, S.N.Nakamura, J.Pochodzalla, C.Rappold, J.Reinhold, T.R.Saito, A.Sanchez Lorente, S. Sanchez Majos, B.S.Schlimme, M.Schoth, C.Sfienti, S.Sirca, L.Tang, M.Thiel, K.Tsukada, A.Weber, K.Yoshida. / Prospects for hypernuclear physics at Mainz: From KAOS@MAMI to PANDA@FAIR. // Nucl. Phys. A914 (2013) 519-529.

22 N.Buyukcizmeci, A.S.Botvina, J.Pochodzalla, M.Bleicher. / Mechanisms for production of hypernuclei beyond the neutron and proton drip lines. // Phys. Rev. C88 (2013) 014611 (10 pages).

23 A.S.Botvina, K.K.Gudima, J.Pochodzalla. / Production of hypernuclei in peripheral relativistic ion collisions. // arXiv:1307.5553 [nucl-th], 2013, submitted to PRC.

24 Магнетизм в квазибинарных системах на основе валентно-нестабильного соединения CeNi, E. C. Клементьев, П. А. Алексеев, В. Н. Лазуков, А. А. Ярославцев, А. В. Грибанов Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, Н. 12, стр. 52-56 (2013);

25 Possible undercompensation effect in Kondo-insulator (Yb,Tm)B12, P. A. Alekseev, K. S. Nemkovski, J.-M. Mignot, E. S. Clementyev et al., subm. to Phys. Rev. B (2013);

26 Magnetic excitation in intermediate-valence EuCu2Si2, P. Alekseev, D. Trunov, E. Clementyev, A. Podlesnyak, subm. to Eur. Phys. Letters (2013);

27 JCNS Workshop 2013 Trends and Perspectives in Neutron Scattering Magnetism and Correlated Electron Systems, 7-10.10.2013, Tutzing, P. Alekseev, D. Trunov, E. Clementyev, A. Podlesnyak, "Magnetic excitation in intermediate-valence EuCu2Si2";

28 E. Clementyev, A. Tsvyaschenko, J. Lebed, Y. Zubavichus, D. Kozlenko, I. Bobrikov, A. Balagurov, S. Popkov Volume collapse and valence instabilities in CeNi; JCNS Workshop 2013 Trends and Perspectives in Neutron Scattering Magnetism and Correlated Electron Systems, 7-10.10.2013, Tutzing,

29 Научная сессия НИЯУ МИФИ-2013, 1-6.02.2013, Москва, П.А. Алексеев, К.С. Немковский, Ж.-М. Миньо, А.В. Грибанов, А.А. Ярославцев, В.Н. Лазуков, Е.С. Клементьев, «Магнитные возбуждения и фазовая диаграмма EuCu2(SixGe1-x)2»;

30 V Euro-Asian Symposium "Trends in MAGnetism": Nanomagnetism. EASTMAG – 2013, 1-21 Sept. 2013, Vladivostok, E.S. Clementyev, A.V. Tsvyaschenko, Yu.B. Lebed, Ya.V. Zubavichus, A.V. Mirmelstein, "Magnetism, valence instabilities and volume collapse in RNi-based pseudobinary systems";

31 Десятый международный Уральский семинар Радиационная физика металлов и сплавов, 25.02-03.03.2013, Кыштым, А.В. Мирмельштейн, О.В. Кербель, Е.С. Клементьев, «Спектр магнитных возбуждений альфа и дельта-плутония»;

32 Десятый международный Уральский семинар Радиационная физика металлов и сплавов, 25.02-3.03.2013, Кыштым, Е.С. Клементьев, А.В. Мирмельштейн, А.В. Цвященко, Ю.Б. Лебедь, «Коллапс 4f электронной оболочки в CeNi: метастабильная фаза и фаза высокого давления»;

33 11-я Молодежная научная школа НИЦ "Курчатовский институт», 12-15.11.2013, Москва, Алексеев П.А., Трунов Д.Н., Клементьев Е.С., Подлесняк А.А., «Нейтронные исследования магнитных возбуждений в EuCu2Si2»;

34 3-я Всероссийская молодежная школа-конференция «Современные проблемы металловедения», 10-13.09.2013, Пицунда, лекция - Е.С. Клементьев, «Аномалии физических свойств интерметаллидов и сплавов на основе лантаноидов и актинидов»;

35 S. Lyubutin, V.V. Struzhkin, A. A. Mironovich, A. G. Gavriliuk, P. G. Naumov, J. F. Lin, S. G. Ovchinnikov, S. Sinogeikin, P. Chow, Y. Xiao, and R. J. Hemley, "Quantum critical point and spin fluctuations in the lower-mantle ferropericlase", PNAS 110(18), 7142-7147 (2013).

36 I.S. Lyubutin, J.F. Lin, A.G. Gavriliuk, A.A. Mironovich, A.G. Ivanova, A.L. Vasilyev, V.V.Roddatis, "Microstructure and high-pressure spin transition of Fe2+ ions in ringwoodite (Mg,Fe)2SiO4", Amer. Mineralogist 98, 1803-1810 (2013).

37 A. G. Gavriliuk, I. S. Lyubutin, S. S. Starchikov, A. A. Mironovich, S. G. Ovchinnikov, I. A. Trojan, Yuming Xiao, Paul Chow, S. V. Sinogeikin, V. V. Struzhkin, " The magnetic P-T phase diagram of langasite Ba3TaFe3Si2O14 at high hydrostatic pressures up to 38 GPa ", Appl. Phys. Lett. 103(16), 162402 (2013).

38 Jungho Kim, Yu Shvyd'ko, MH Upton, D Casa, Yu Orlov, AG Gavriliuk, SG Ovchinnikov, VV Struzhkin, SV Sinogeikin, "Pressure-induced Spin Transition and Evolution of the Electronic Excitations of FeBO3: Resonant Inelastic X-ray Scattering Results", Bulletin of the American Physical Society, (2013)

39 I.S. Lyubutin, J.F. Lin, A.G. Gavriliuk, A.A. Mironovich, A.G. Ivanova, A.L. Vasilyev, V.V.Roddatis, "Microstructure and high-pressure spin transition of Fe2+ ions in ringwoodite (Mg,Fe)2SiO4", Amer. Mineralogist 98, 1803-1810 (2013).

40 A. G. Gavriliuk, I. S. Lyubutin, S. S. Starchikov, A. A. Mironovich, S. G. Ovchinnikov, I. A. Trojan, Yuming Xiao, Paul Chow, S. V. Sinogeikin, V. V. Struzhkin, " The magnetic P-T phase

diagram of langasite Ba3TaFe3Si2O14 at high hydrostatic pressures up to 38 GPa ", Appl. Phys. Lett. 103(16), 162402 (2013).

41 Z.H. Xiao, A.A. Semenov, C.H. Woo and S.Q. Shi, "Single void dynamics in phase field modeling". – J. Nucl. Mater., 2013, Vol. 439, p. 25-32.

42 Yu. A. Davydova, S. S. Starchikov, S. N. Aksenov, A. G. Gavriliuk, I. S. Lyubutin, "The investigation of langasite Ba3TaFe3Si2O14 properties at high pressures", in preparation for submission to Euro. Phys. Lett., (2014)

43 V.L.Kuznetsov, E.V.Kuznetsova, P.V.Sedyshev. Preliminary results of the investigation of the neutron diffraction on single crystal KBr near p-resonance 81Br. International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei (ISINN-21), May 20-25, 2013, Alushta. (to be published)

44 В.Л.Кузнецов, Е.В.Кузнецова, В.С.Литвин. Исследование дифракции нейтронов на монокристалле КВг на 50-ти метровой базе РАДЭКС. Препринт ИЯИ РАН 1367/2013, Москва, сентябрь 2013 г.