Федеральное агентство научных организаций РФ

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИРАН)

УДК 539.1; 539.12; 539.123 № госрегистрации 01201050397 Инв.№

УТВЕРЖДАЮ директор ИЯИ РАН д.т.н. Л.В.Кравчук 19 января 2016 года

ОТЧЁТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА, РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА (промежуточный за 2015 год) 0031-2014-0067 ,

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



Г.И.Рубцов -19 января 2016 года

Москва 2016

Федеральное агентство научных организаций РФ

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)

УДК 539.1; 539.12; 539.123 № госрегистрации 01201050397 Инв.№ УТВЕРЖДАЮ директор ИЯИ РАН д.т.н.

Л.В.Кравчук

19 января 2016 года

ОТЧЁТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА, РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА (промежуточный за 2015 год) 0031-2014-0067

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

Г.И.Рубцов 19 января 2016 года

Москва 2016

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы к.ф.-м.н.

Г.И.Рубцов (введение, заключение) 19.01.2016

Исполнители темы:

д.ф.-м-н. Ткачёв И.И. (раздел 1, 4) 19.01.2016

д.ф.-м-н. Недорезов В.Г. (раздел 2) - 19.01.2016 /\ Shcs

к.ф.-м-н. Конобеевский Е.С. (раздел 3) 19.01.2016

ΡΕΦΕΡΑΤ

Отчёт содержит: 205 с., 92 рис., 9 табл.

РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА, КВАРК-ГЛЮОННАЯ МАТЕРИЯ, ФАЗОВЫЙ ПЕРЕХОД, АДРОННЫЙ КАЛОРИМЕТР, ЛАВИННЫЙ ФОТОДИОД, СОЛИТОН, НИЗКОФОНОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ, ГАММА-СПЕКТРОМЕТР, СПИНОВАЯ АСИММЕТРИЯ, ПОЛЯРИЗУЕМОСТЬ, ФОТОРОЖДЕНИЕ, РЕФРАКЦИОННАЯ ИНТРОСКОПИЯ, ГИГАНТСКИЙ РЕЗОНАНС

Выполнялись работы по программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы, пункт 15. Современные проблемы ядерной физики, в том числе физики элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий, включая физику нейтрино и астрофизические и космологические аспекты, а также физики атомного ядра, физики ускорителей заряженных частиц и детекторов, создание интенсивных источников нейтронов, мюонов, синхротронного излучения и их применения в науке, технологиях и медицине.

Работы проводились в следующих направлениях:

поиск и исследование новых физических явлений в области энергий до нескольких ТэВ, новых элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий в экспериментах на Большом адронном коллайдере;

построение на этой основе теории, существенно расширяющей современную теорию элементарных частиц;

поиск и исследование редких процессов с участием элементарных частиц на протонных и вторичных (пионных, каонных, мюонных) пучках высокой интенсивности в целях открытия новых явлений, происходящих на сверхмалых расстояниях;

создание новых и развитие существующих методов регистрации частиц и излучений для будущих экспериментов в области физики элементарных частиц;

исследование механизмов образования и распада сверхплотной ядерной материи в столкновениях релятивистских ионов, изучение свойств адронов, кварков и глюонов и сверхплотной ядерной среды;

прецизионное исследование электромагнитных взаимодействий нуклонов и ядер;

исследование свойств адронов в ядерной среде, изучение их связанных состояний (мезонные ядра, дельта-ядра, гиперядра);

исследование структуры ядер и механизмов фрагментации в процессах столкновений релятивистских ядер и в электромагнитных реакциях;

исследование свойств адронов и механизмов реакций с их участием при промежуточных (до нескольких ГэВ) энергиях, поиски экзотических состояний, в том числе дибарионов, пентакварков и других;

исследование свойств ядерных изомеров и возможностей высвобождения запасенной в них энергии;

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

В отчёте представлены результаты фундаментальных и прикладных работ, проведённых по государственному заданию в соответствии с планом научных исследований ИЯИ РАН на 2015 год. Из полученных результатов можно выделить следующие важнейшие результаты работ:

Мультифрагментация ядер углерода под действием фотонов. Исследованы реакции мультифрагментации ядер углерода под действием фотонов с энергией 700 – 1500 МэВ. Впервые получены данные о вероятности вылета нуклонов различной множественности вплоть до полного развала ядра углерода на отдельные нуклоны. Изучены энергетические и угловые распределения образующихся фрагментов. Показано, что экспериментальные данные хорошо согласуются с расчётами в рамках каскадно-испарительной модели RELDIS. ИЯИ РАН в коллаборации GRAAL.

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

СОДЕРЖАНИЕ

Реферат 4 Введение 6 Основные результаты 8 1 Отдел экспериментальной физики 8 2 Лаборатория фотоядерных реакций 126
Введение 6 Основные результаты 8 1 Отдел экспериментальной физики 8 2 Лаборатория фотоядерных реакций 126
Основные результаты 8 1 Отдел экспериментальной физики 8 2 Лаборатория фотоядерных реакций 126 2 Паборатория фотоядерных реакций 126
1 Отдел экспериментальной физики 8 2 Лаборатория фотоядерных реакций 126 2 Паборатория фотоядерных реакций 126
2 Лаборатория фотоядерных реакций 126
2 П. б
3 Лаооратория атомного ядра 136
4 Радиоизотопные исследования 172
Заключение 205

ВВЕДЕНИЕ

Выполнялись работы по программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы, пункт 15. Современные проблемы ядерной физики, в том числе физики элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий, включая физику нейтрино и астрофизические и космологические аспекты, а также физики атомного ядра, физики ускорителей заряженных частиц и детекторов, создание интенсивных источников нейтронов, мюонов, синхротронного излучения и их применения в науке, технологиях и медицине.

Работы проводились в следующих направлениях:

поиск и исследование новых физических явлений в области энергий до нескольких ТэВ, новых элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий в экспериментах на Большом адронном коллайдере;

построение на этой основе теории, существенно расширяющей современную теорию элементарных частиц;

поиск и исследование редких процессов с участием элементарных частиц на протонных и вторичных (пионных, каонных, мюонных) пучках высокой интенсивности в целях открытия новых явлений, происходящих на сверхмалых расстояниях;

создание новых и развитие существующих методов регистрации частиц и излучений для будущих экспериментов в области физики элементарных частиц;

исследование механизмов образования и распада сверхплотной ядерной материи в столкновениях релятивистских ионов, изучение свойств адронов, кварков и глюонов и сверхплотной ядерной среды;

прецизионное исследование электромагнитных взаимодействий нуклонов и ядер;

исследование свойств адронов в ядерной среде, изучение их связанных состояний (мезонные ядра, дельта-ядра, гиперядра);

исследование структуры ядер и механизмов фрагментации в процессах столкновений релятивистских ядер и в электромагнитных реакциях;

исследование свойств адронов и механизмов реакций с их участием при промежуточных (до нескольких ГэВ) энергиях, поиски экзотических состояний, в том числе дибарионов, пентакварков и других;

исследование свойств ядерных изомеров и возможностей высвобождения запасенной в них энергии;

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

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

1 Лаборатория релятивистской ядерной физики. Физика атомного ядра, релятивистская

ядерная физика

Научный руководитель, заведующий Лабораторией релятивистской ядерной физики,

доктор физ.-мат. наук, профессор А.Б.Курепин

Исполнители темы:

Старший научный сотрудник канд. физ.-мат наук Т.Л.Каравичева Старший научный сотрудник канд. физ.-мат наук Ф.Ф.Губер Старший научный сотрудник канд. физ.-мат наук А.И.Решетин Ведущий научный сотрудник д-р физ.-мат наук И.А.Пшеничнов Старший научный сотрудник канд. физ.-мат наук Н.С.Топильская Старший научный сотрудник канд. физ.-мат наук А.П.Ивашкин Старший научный сотрудник канд. физ.-мат наук А.С.Садовский Заведующий сектором канд. физ.-мат наук Д.В.Серебряков Зам. директора Института, Зав. отделом О.В.Каравичев Заведующий сектором А.В.Веселовский Ведущий инженер И.В.Морозов Ведущий инженер Н.А.Курепин Научный сотрудник А.И.Маевская Научный сотрудник М.Б.Голубева Младший научный сотрудник О.В.Андреева Младший научный сотрудник С.В.Морозов Младший научный сотрудник О.А.Петухов Младший научный сотрудник Е.В.Карпечев Младший научный сотрудник А.А Тихонов Младший научный сотрудник А.Н.Курепин Ведущий инженер Н.А.Курепин Стажер-исследователь А.С. Коневских Стажер-исследователь Д.А.Финогеев Стажер-исследователь В.В.Исаков Стажер-исследователь А.А.Фурс Стажер-исследователь А.И.Шабанов Техник С.К.Попов

Обозначения и сокращения

CERN (ЦЕРН) – Европейская организация ядерных исследований

LHC (БАК) - Большой адронный коллайдер;

SPS – Супер-протонный синхротрон, кольцевой ускоритель в ЦЕРНе;

АLICE (АЛИСА) – эксперимент на ускорителе LHC

HADES (ХАДЕС) – эксперимент на ускорителе в ГСИ, г. Дармштадт

СВМ – планируемый эксперимента на ускорителе в ГСИ, г. Дармштадт

NA61/SHINE - SPS Heavy Ion and Neutrino Experiment - эксперимент на ускорителе SPS;

NICA (НИКА) – коллайдер, строящийся в г. Дубне, Россия

MPD – Many Purpose Detector- многоцелевой детектор на ускорителе НИКА

- eV (эВ) электронвольт широко используемая в физике единица энергии, равная энергии получаемой электроном при ускорении в электростатическом поле, когда разность потенциалов между двумя позициями частицы составляет один Вольт;
- TeV (ТэВ) единица энергии, равная 10¹² эВ;
- mV (мВ) единица измерения амплитуды сигнала, равная 10⁻³ вольта;
- ns (нс) наносекунда 10⁻⁹ секунды;
- ps (пс) пикосекунда 10⁻¹² секунды;
- fm (фм) единица длины в ядерной физике равная 10⁻¹⁵ метра
- FEE Front-End-Electronics детекторная электроника;
- FPGA Field Programmed Grid Array программируемая логическая интегральная схема;
- ФЭУ фотоэлектронный умножитель;
- МАРД- микропиксельный лавинный фотодиод;
- DAQ система сбора данных;
- ADC цифро-аналоговый преобразователь.

1 ΡΕΦΕΡΑΤ

Отчет: 129 стр., 70 рис., 2 табл., 39 источников, 26 публикаций КВАРК-ГЛЮОННАЯ ПЛАЗМА, БОЛЬШОЙ АДРОННЫЙ КОЛЛАЙДЕР, LIEPH. СТОЛКНОВЕНИЯ ЯДЕР СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ, ЭКСПЕРИМЕНТ АЛИСА, УЛЬТРАПЕРИФЕРИЧЕСКИЕВЗАИМОДЕЙСТВИЯ, ФИКСИРОВАННАЯ МИШЕНЬ, СВЕТИМОСТЬ, ТРИГГЕРНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ, ДЕТЕКТОРЫ ЧЕРЕНКОВА, КВАРЦЕВЫЙ РАДИАТОР, ОПТИЧЕСКИЕ СЕНСОРЫ, ФЭУ НА ОСНОВЕ МИКРОКАНАЛЬНЫХ РЕАКЦИИ, МНОЖЕСТВЕННОСТЬ, ПЛАСТИН. ПЛОСКОСТЬ МАГНИТНЫЙ СПЕКТРОМЕТР, КИРАЛЬНАЯ СИММЕТРИЯ, ВЕКТОРНЫЕ МЕЗОНЫ, ЧАРМОНИЙ, ДИФРАКЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ, АНАЛОГОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, ЭКСПЕРИМЕНТ ХАДЕС, ЭКСПЕРИМЕНТ СВМ, ЭКСПЕРИМЕНТ NA61, ЭКСПЕРИМЕНТ MPD, КОЛЛАЙДЕР НИКА

Эксперимент ALICE "Поиск кварк – глюонной материи при столкновении ультрарелятивистских ядер".

В настоящем отчете представлены результаты, полученные в 2015 году в ходе выполнения сотрудниками Лаборатории ряда научных проектов по изучению столкновений ультрарелятивистких протонов и ядер, фрагментации ядер под действием реальных и виртуальных фотонов. Отчет содержит результаты модернизации действующего в составе супердетектора ALICE (CERN, LHC) детекторного устройства Т0 и результаты анализа физических данных 2012-2015 гг. по определению светимости, идентификации заряженных частиц и плоскости реакции.

В рамках участия Лаборатории релятивистской ядерной физики ИЯИ РАН в международном сотрудничестве по программе физических исследований в эксперименте АЛИСА в ЦЕРНе на Большом Адронном Коллайдере (БАК) в отчётный период проведены тестовые сеансы на пучке релятивистских частиц ускорителя PS в ЦЕРНе. В отчете приведены результаты исследований рабочих характеристик прототипа новой детекторной системы Фронтального интеллектуального триггера (ФИТ), разрабатываемого в ИЯИ РАН для модернизации установки АЛИСА планируемой в 2017-2018 гг.

Проведена модернизация работающего в составе супердетектора АЛИСА детекторного устройства Т0, проведён анализ физических данных 2012-2015 гг. по определению светимости, идентификации заряженных частиц и плоскости реакции.

В 2015 г. на тестовом пучке канала PS T10 в ЦЕРН проведены испытания двух вариантов аналоговой электроники, использующей ТОТ-метод для измерения амплитуды сигналов с прототипа ФИТ-детектора, разрабатываемого для модернизации быстрых триггерных детекторов в эксперименте ALICE. Применялась подсистема сбора данных на

основе TRB2 (Trigger Readout Board). Полученные результаты испытаний будут использованы для разработки канала аналоговой электроники TOT-метода, удовлетворяющей требованиям эксперимента ALICE в RUN3.

В рамках программы исследований дифракционных процессов в эксперименте ALICE в 2015 г. проведены испытания прототипа детектора AD (ALICE Diffraction) на тестовом пучке канала в ЦЕРН. Для выработки быстрого триггера пучка в испытаниях прототипа детектора AD группой сотрудников ЛРЯФ ИЯИ РАН был разработан, испытан и установлен в рабочее положение Телескоп быстрых черенковских детекторов с кварцевыми радиаторами, имеющих временное разрешение около 50 пс. Для усиления и разделения (разветвления) сигналов, поступающих от 12 шт. ФЭУ каждой из "A" и "C" сторон детектора AD на амплитудный и временной каналы измерения в эксперименте ALICE разработан, изготовлен и испытан одноканальный модуль усилителя-разветвителя PASA. На тестовом пучке канала PS T10 в ЦЕРН проведено исследование влияния различных коэффициентов усиления усилителя PASA на максимальный динамический диапазон оцифрованных сигналов.

С помощью модели RELDIS проведены вычисления сечений электромагнитной диссоциации (ЭМД) ядер свинца с эмиссией нейтронов и протонов вперёд при энергии столкновений 5.02 ТэВ на нуклон-нуклонную пару, вычислены вклады протонных событий. Модель RELDIS была применена для изучения механизма развала ядер углерода под действием фотонов с энергиями 700 — 1500 МэВ.

фиксированной Разработано предложение по эксперименту на мишени с использованием пучков БАК. Новые эксперименты в энергетическом интервале между энергиями ускорителя SPS в ЦЕРНе и коллайдера RHIC в Брукхейвене, США очень важны для изучения механизмов рождения и подавления рождения кваркониев и понимания условий возникновения Кварк-Глюонной Плазмы (QGP). Если пучки Большого Адронного Коллайдера (LHC) будут использоваться в экспериментах с фиксированной мишенью, то в р-А и А-А столкновениях может быть исследована область энергии ниже энергии коллайдера RHIC с высокой статистической точностью. Можно использовать фиксированную мишень на пучках БАК в форме тонкого кольца, расположенного в гало пучка, что не мешает другим экспериментам. Это позволяет использовать аппаратуру существующих экспериментов ALICE или LHCb и получать данные с хорошей статистической точностью.

Эксперимент HADES "Исследование рождения векторных мезонов в адрон-ядерных и ядерно-ядерных взаимодействиях на установке HADES"

Физическая программа работ на широкоапертурном магнитном спектрометре ХАДЕС направлена на поиск и исследование явлений, связанных со спонтанным нарушением

киральной симметрии – фундаментальной симметрии сильных взаимодействий. В столкновениях тяжелых ионов при высоких энергиях устанавливаются экстремальные температуры и плотности, при которых ожидается «плавление» кирального конденсата и формирование кирально-симметричной среды. Однако, уже при энергиях налетающих ядер порядка 1 ГэВ на нуклон в лабораторной системе данные эффекты могут проявиться, в частности, в изменении свойств легких векторных мезонов (сдвиг массы и изменение ширины резонансов), рожденных в ядро-ядерных столкновениях. Изучение свойств этих мезонов посредством детектирования их распадов с испусканием электрон-позитронных пар является важнейшим направлением исследований на установке ХАДЕС. Другим важным направлением работ на этой установке является исследование коллективных потоков заряженных частиц, образующихся в столкновениях тяжелых ядер. При энергиях пучка порядка 1-2 ГэВ на нуклон, основная мотивация для изучения потоков связана с исследованием уравнения состояния ядерной материи. Исследование уравнения состояния ядерной материи посредством оценки её сжимаемости позволяет на макроскопическом уровне поставить предел массам нейтронных звезд, что важно для понимания эволюции звезд и астрофизики в целом.

ХАДЕС является в настоящее время единственным экспериментом в ГСИ, который еще будет набирать экспериментальные данный на ускорителе SIS18, а после 2020 года будет перемещен на ускоритель SIS100 комплекса ФАИР и будет той базовой установкой, на которой будут проводиться первые эксперименты на ускорителе SIS100.

Группы ИЯИ РАН (11 чел. из них 2 молодых ученых) участвуют в международной колаборации ХАДЕС (ГСИ, Дармштадт) с 1998 года. Коллаборация ХАДЕС включает 17 Институтов из 9 Европейских стран.

В 2015 году работа по эксперименту ХАДЕС группой ИЯИ РАН проводилась по двум основным направлениям:

- анализ экспериментальных данных по столкновению тяжелых ионов золота Au+Au при энергии налетающего пучка 1.23 ГэВ на нуклон с фиксированной мишенью, полученных на установке ХАДЕС в 2012г.;

- разработка и тестирование электромагнитного калориметра, создаваемого для установки ХАДЕС для работы на пучках, как на действующем ускорителе SIS18 в GSI, так и на создаваемом ускорителе SIS-100 комплекса ФАИР в Дармштадте.

Анизотропные потоки частиц являются независимыми наблюдаемыми для описания свойств и эволюции системы, образующейся в ядро-ядерном взаимодействии. Так, анализ коллективных потоков частиц на экспериментах области ультрарелятивистских энергий на

установках коллайдера RHIC, США (STAR, PHENIX) может рассматриваться в качестве независимого наблюдаемого наступления состояния т. н. кварк-глюонной плазмы (КГП). Вместе с тем интересным представляется и процесс перехода от фазы адронной материи к фазе КГП. В этой связи несколькими коллаборациями (STAR, NA61/SHINE, CBM, NICA-MPD) заявлен интерес и подготовлены, а на действующих экспериментах уже начаты программы сканирования по энергии, связанные с изучением фазовой диаграммы в области около критической точки. Новые возможности по изучению азимутальных потоков имеются теперь и в области энергий порядка 1-ГэВ на нуклон благодаря недавно полученным на установке HADES экспериментальным данным с высокой статистикой в этой области энергий на самой нижней границе предложенной программы сканирования по энергии.

Ведущийся в ИЯИ РАН уже в течении нескольких последних лет анализ азимутальных потоков частиц, полученных в результате изучения реакции Au+Au при энергии налетающего пучка 1.23 ГэВ на нуклон, впервые позволил получить указания на существование более высоких гармоник v3 и v4 в азимутальных потоках в этой области энергии. В 2015 году был продолжен анализ азимутальных потоков. Этот анализ был нацелен, с одной стороны, на более тщательное изучение высоких гармоник, а с другой стороны, на подготовку публикации результатов по уже хорошо изученным в этой области энергий гармоникам направленного (v1) и эллиптического потоков (v2). Для этого использовалась лучшая детализация одновременно по двум кинематическим переменным (pt:y), доступным на установке HADES. Также был продолжен анализ потоков заряженных каонов K⁺, уточнен аксептанс, в котором возможно провести надежное вычитание фона.

Группа ИЯИ РАН продолжила в 2015г. участие в создании новой детекторной системы установки ХАДЕС - электромагнитного калориметра для исследований на пучках как действующего ускорителя SIS18 в GSI, так и создаваемого ускорителя SIS-100 на ФАИР в Дармштадте, Германия. Завершены работы по реконструкции модулей калориметра – в результате около 1000 модулей подготовлено для дальнейшей их сборки с фотоумножителями и системой мониторирования и тестированию на стенде в ГСИ, созданном группой ИЯИ.

Эксперимент NA61 «Исследование рождения адронов в адрон-ядерных и ядроядерных взаимодействиях на ускорителе SPS в ЦЕРН».

В эксперименте NA61/SHINE от ИЯИ участвуют 8 человек – из них 7 научных сотрудников, (включая 2 сотрудника моложе 36 лет), 1 техник.

Одной из основных задач эксперимента NA61/SHINE в ЦЕРНе является поиск критической точки сильновзаимодействующей ядерной материи и детальное исследование

начала деконфаймента. Для поиска критической точки необходимы измерения наблюдаемых, чувствительных к исследуемым эффектам. Такими наблюдаемыми являются множественность рождения и спектральные характеристики вторичных адронов, включая странные барионы/антибарионы, и пособытийные флуктуации некоторых физических величин, таких как множественность, заряды, поперечные импульсы, отношения выхода странных и нестранных мезонов. Резкое увеличение величины флуктуаций может являться отличительной чертой физических явлений вблизи критических областей. Программа исследований NA61 включает проведение измерений выходов заряженных частиц в центральных столкновениях ядер ⁷Be + ⁹Be, Ar +Sc и Xe + La при энергиях 13, 20, 30, 40, 80, 158 ГэВ на нуклон и рассчитана до 2018 г.

В феврале-апреле 2015 г. был проведен сеанс по набору данных в реакции Ar+Sc при энергия ускоренных в SPS ядер аргона 13А, 19А, 30А, 40А, 75А и 150А ГэВ/с. В октябре 2015г. был завершен набор данных для p+Pb взаимодействий при 158 ГэВ/с. Первые данные для этой реакции были получены еще в 2012г.

Из-за поломки магнита VTX-2 в октябре был отменен сеанс по исследованию неупругих p+p взаимодействий при 400 ГэВ/с для получения данных для нейтринных пучков в FERMILAB. Освободившееся время было использовано для проведения тестовых измерений для различных детекторных систем установки, в частности, для переднего адронного калориметра и вершинного детектора. В ноябре 2015г. состоялся тестовый сеанс на выведенном пучке ядер свинца с энергией 30 АГэВ, на котором проводилась отладка детекторных систем установки. На пучке протонов была проведена калибровка переднего адронного калориметра и проведены тесты разных типов электроники для считывания сигналов с одного из модулей калориметра, в котором существующий тип фотодиодов был заменен на МРРС. Эти тесты крайне важны для планирования дальнейшей модернизации калориметра. Кроме этого, перед основным калориметром был установлен и протестирован дополнительный короткий модуль, который был в 2015г. разработан и изготовлен в ИЯИ РАН при финансовой поддержке новой российской группы из МИФИ в коллаборации NA61/SHINE. В сеансе на пучке ядер свинца, группа ИЯИ РАН исследовала энергетическое разрешение и линейность отклика калориметра с дополнительным модулем. Были также проведены измерения для определения угла плоскости реакции в столкновениях ядер свинца с помощью переднего адронного калориметра, а также для исследования азимутальных потоков всех заряженных частиц в этой реакции при энергии 30 АГэВ при выключенном магнитном поле в вершинном детекторе (из-за поломки сверхпроводящего магнита).

В течение года группа ИЯИ занималась также калибровкой калориметра, изучением корреляции измеренной в калориметре энергии с множественностью заряженных частиц в TPC для полученных данных Ar+Sc. Проведено моделирование точности определения угла плоскости реакции для Pb+Pb при энергии 30АГэВ.

По разделу 4:

Эксперимент CBM «Исследование свойств сжатой барионной материи на установке CBM в GSI (Дармшадт, Германия)»

Физическая программа работ на создаваемой экспериментальной установке CBM (Compressed Barionic Matter) направлена на исследования фазовой диаграммы сильно взаимодействующей материи. Область высокой плотности (вплоть до 7 р₀) на фазовой диаграмме будет экспериментально исследована в ядро-ядерных столкновениях с энергиями пучка 2-35 ГэВ/нуклон на создаваемой установке CBM сильноточного ускорительного комплекса ФАИР.

На первом этапе комплекса ФАИР ядро-ядерные столкновения будут изучаться с использованием пучков ускорителя SIS100 с энергиями до 11 ГэВ/нуклон для столкновений AuAu. На втором этапе создания комплекса ФАИР (ускоритель SIS300) энергия пучка будет увеличена до 35 ГэВ/нуклон для ядер золота.

Для этой установки ИЯИ РАН разрабатывает передний адронный калориметр фрагментов, PSD – Projectle Spectator Detector, который необходим определения таких глобальных характеристик событий как центральность и угол плоскости реакции. Этот калориметр необходим для изучения большого набора наблюдаемых в зависимости от центральности столкновения, которая используется для определения плотности энергии, достигаемой в этих реакциях, а также для исследования пособытийных флуктуаций и коллективных потоков идентифицированных адронов и редких пробников, включая J/Ψ.

В течение 2015г. велись работы по моделированию переднего адронного калориметра с целью разработки методов определения центральности и угла плоскости реакции в столкновениях тяжелых ядер и улучшения точности их определения. Изучались корреляции с другими детекторными системами СВМ для более точного определения центральности в ядро-ядерных взаимодействий.

В октябре 2015г проведен тестовый сеанс на пучке протонов в ЦЕРНе, на котором впервые был измерен отклик модуля калориметра переднего адронного калориметра установки NA61 с прототипом считывающей электроники, разработанным для калориметра установки CBM. На основе результатов, проводимого в настоящее время анализа

полученных данных, будет принято решение о модернизации этой электроники, т.к. она сейчас оптимизирована для считывания информации с электромагнитного калориметра установки ХАДЕС.

В ноябре 2015г. подготовлен и подписан контракт ФАИР-ИЯИ на разработку и изготовление переднего адронного калориметра установки СВМ в ИЯИ РАН. Начаты работы по разработке конструкторской документации на изготовление модулей калориметра.

«Исследование коллективных эффектов и не нуклонных степеней свободы в ядрах, переходных процессов в сжатой ядерной материи при столкновениях протонов и тяжёлых ионов с ядрами.», эксперимент MPD, NICA, Дубна.

Основным направлением исследований в рамках проекта MPD/NICA является изучение фазовой диаграммы ядерной материи при высоких плотностях и температурах. Считается, что сверхплотная материя существует в нейтронных звездах и в центре сверхновых, а вот на ранней стадии эволюции Вселенной реализовывались условия, при которых температура была очень высока с примерно равной плотностью барионов и антибарионов. В лабораторных экспериментах похожие условия могут быть реализованы в объеме реакции при столкновениях релятивистских тяжелых ионов. В таких реакциях образуется высокая плотность энергии, значительная часть которой преобразуется и возбуждение новых (цветных) степеней свободы. Главной целью проекта MPD/NICA является изучение столкновений тяжелых ионов при энергиях 4 - 11 ГэВ для исследования свойств адронов в сверхплотной ядерной среде а также уравнения состояния ядерной материи и свойств фазовых переходов, включая поиск возможных сигналов деконфайнмента, критической точки и частичного восстановления киральной симметрии.

Важной проблемой является изучение рождения чармония для исследования механизмов реакции и поиска критической точки перехода материи в квакр-глюонную плазму. Особого внимания заслуживают коллективные эффекты, а именно эллиптические потоки, так как это коллективное поведение формируется в основном на ранней стадии эволюции. Для изучения потоков заряженных частиц требуется определение в каждом событии некоторого выделенного направления - плоскости реакции, по отношению к которому исследуется предпочтительное движение некоторой выборки испущенных частиц (поток). В данном проекте предполагается разработать методику определения плоскости реакции посредством измерения, как координат, так и энергии спектаторов с помощью переднего адронного калориметра фрагментов.

1.1 Исследование ядро–ядерных столкновений на установке ALICE на встречных пучках ускорителя LHC (CERN)

1.1 Введение

Уже в течение нескольких лет в составе супердетектора ALICE, предназначенного для изучения свойств сверхплотной ядерной материи, образующейся при столкновении встречных пучков релятивистских (с энергией несколько ТэВ на нуклон) ионов свинца, успешно используется детекторное устройство Т0, являющееся стартовым тригтерным детектором. Детектор Т0 предназначен для выработки стартового сигнала момента столкновения ионов с точностью лучше 50 пикосекунд для время - пролетной идентификации частиц и решения ряда других задач. Этот детектор состоит из двух сборок черенковских детекторов по 12 детекторов в сборке, расположенных по обе стороны от номинальной точки столкновения ионов.

В ходе работ по модернизации супердетектора ALICE на БАК и расширению возможностей получения новых физических результатов после реконструкции коллайдера в 2017-2018 гг., должен быть модернизирован и детектор Т0. Необходимость модернизации связана с ростом энергии столкновений коллайдера и его светимости, которая будет увеличена более чем в 10 раз.

Получение информации о физическом событии в режиме реального времени, также как и информация о параметрах столкновения пучков и фоновых условиях, являются необходимыми условиями для работы БАК и для достижения высокой эффективности процесса сбора физических данных. Быстрые триггерные передние детекторы T0, V0 и FMD являются настоящее время основополагающей частью детекторной В системы супердетектора ALICE. Эти детекторные устройства используются для формирования триггеров, идентификации частиц, изучения множественности, измерения центральности взаимодействия. Вместе с тем, даже в относительно мягких условиях первого сеанса БАК на установке ALICE режим работы триггерных детекторов был очень напряженным и в отдельные периоды требовал предельно допустимых параметров детекторных систем.

Целью нового направления работ является разработка и реализация на супердетекторе ALICE современного эффективного метода регистрации элементарных частиц на основе детекторного устройства ФИТ с высоким временным разрешением (30–50пс) для поиска и исследования свойств нового состояния ядерного вещества, образованного в ядро-ядерных соударениях БАК. Детекторное устройство ФИТ должно заменить существующие триггерные детекторы T0, Z0 и FMD. В отчетном периоде проведено теоретическое исследование возможностей использования детекторного устройства ФИТ для

формирования триггерных сигналов нулевого уровня, измерений множественности рожденных заряженных частиц, плоскости реакции, мониторирования и определения светимости, измерения времени-пролета рожденных заряженных частиц, диагностики пучка и оценки фоновых событий на основе анализа современной физической, научно-технической, нормативной и методической литературы.

Необходимость создания усовершенствованного детекторного устройства ФИТ супердетектора ALICE, обусловлена тем, что необходимо обеспечить возможность проведения экспериментальных исследований на пучках БАК после реконструкции коллайдера, когда его светимость будет увеличена до уровня 2 * 10³⁴ см⁻²с⁻¹. Новое детекторное устройство ФИТ позволит измерять светимость пучка, идентифицировать частицы, определять центральность, а также вершину взаимодействия в условиях подавления фоновых событий, даст дополнительную информацию о плотности заряженных частиц и плоскости реакции с лучшей точностью, чем существующие в настоящее время детекторные устройства T0, V0 и FMD.

Новое детекторное устройство ФИТ будет представлять собой усовершенствованную версию Т0-детектора, конструкция которого будет значительно отличаться от конструкции Т0-детектора, существующего в настоящее время. Планируется существенно увеличить аксептанс детектора с целью значительного увеличения его эффективности при регистрации протон-протонных столкновений и периферических ионных столкновений.

Проектом модернизации предусмотрено применение в черенковских детекторах фотоумножителей прямоугольной формы на микроканальных пластинах. Это позволит существенно уменьшить площадь «мертвых» участков в непосредственной близости от ионопровода ускорителя. Кроме того планируется увеличить число детекторов в каждой сборке не менее, чем до 24 штук.

Детекторное устройство ФИТ должно сохранить преимущества T0-детектора (в первую очередь высокое временное разрешение) и при этом увеличить эффективность регистрации событий за счет увеличения общей площади.

1.1.1 Модернизация детекторного устройства ТО

Триггерная система эксперимента ALICE представляет собой сложную многофункциональную систему, ключевым звеном которой является центральный триггерный процессор (ЦТП), который обрабатывает триггерные сигналы с различных триггерных детекторов и, в свою очередь, посылает сигналы детекторам на считывание событий и информацию о триггерных решениях в систему сбора данных. ИЯИ РАН внес определяющий вклад в создание стартового и триггерного детектора T0, который является

одним из важнейших компонентов тригтерной системы эксперимента ALICE. Тригтерные сигналы детектора T0 используются для эффективного отбора протон-протонных событий по положению вершины на L0-уровне, а также в качестве minimum-bias триггера. Вершинный триггерный сигнал T0 (сигнал генерируется, если вершина столкновения находится в заданном интервале по оси Z) оказывается малочувствительным к столкновениям пучка с газом, поэтому используется для определения светимости в протон-протонных столкновениях, также его можно использовать для отбора событий по центральности в ядро-ядерных столкновениях. Кроме того, данные детектора T0 используются для точного вычисления времени столкновения, которое используется время-пролетной системой (TOF) и позволяет идентифицировать пионы, протоны при значениях поперечного импульса от 0.5 до 2,5 GeV/с, а для каонов и протонов до 3-4 GeV/с.

В настоящее время настройка, устранение неполадок, поддержание работоспособности, обеспечение безаварийного процесса измерений и получения экспериментальных данных с детектора Т0 и его модернизация выполняются практически полностью сотрудниками ИЯИ, МИФИ и КИ.

Анализ работы детектора T0 в 2015 году показал, что основные параметры детектора T0 соответствуют требованиям, однако были выявлены ряд факторов, влияющих на результаты измерений. Было проведено тестирование модулей QTC, осуществляющих преобразование заряда во время, модуля GRPG, обеспечивающего выработку синхронизирующих сигналов (ворот) для модулей QTC. Оба эти модуля имели время преобразования и время генерирования ворот более 25 нс, что не позволяет работать на частоте 40 МГц, т.е если расстояние между столкновениями составляет 25 нс.

В конце 2014 года были разработаны, а в 2015 году интегрированы в быструю электронику детектора T0 дополнительные модули QTC с временем преобразованием менее 25 нс. В 3 квартале 2015 года было завершено производство нового модуля управления лазером и разветвителя сигналов синхронизации в стандарте VME (Laser Control and Clock Distribution VME Module (LCC), который позволяет также позволяет работать на частоте 40 МГц (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 - Модуль управления лазером и разветвитель сигнала синхронизации в стандарте VME

Проведена модернизация DCS (Система управления и контроля детекторами) детектора T0 с целью включения в нее возможности управления, контроля и конфигурирования модуля LCC.

Триггерные сигналы детектора Т0 вырабатываются модулем Т0TU (Т0 Trigger Unit). Опыт эксплуатации показал правильность выбранной логики работы блока. Однако к ограничениям данного модуля можно отнести то, что временные ворота для первичных триггерных сигналов являются довольно узкими – 6 наносекунд. Это могло приводить к тому, что при настройке режимов тактирования детектора могла происходить потеря триггерных сигналов для ЦТП. Чтобы избежать этого, приходилось тщательно выравнивать фронты первичных триггерных сигналов по отношению к тактовому сигналу ускорителя. Для решения проблемы было желательно увеличить ширину ворот как минимум в два раза.

Поскольку имеющийся блок триггерной электроники выполнен на базе программируемой логической схемы (ПЛИС), наиболее целесообразным решением для поставленной задачи явилось перепрограммирование внутренней структуры ПЛИС в соответствии с новыми требованиями. При этом проверенная и зарекомендовавшая себя электрическая схема модуля не потребовала изменений.

Для расширения входного окна принимаемых триггерных сигналов программируемая внутренняя структура ПЛИС была изменена. На каждом входе был добавлен дополнительный узел электронной схемы - так называемый "счётный триггер", срабатывание которого фиксировалось в такте синхросигнала ускорителя. Это позволило избежать жёсткой привязки первичных триггерных сигналов к фронту синхросигнала.

В результате проведённой модернизации ширина ворот фиксации триггерных сигналов была увеличена до 15 наносекунд в каждом канале, что значительно повысило вероятность безотказной передачи сигналов в центральный триггерный процессор.

До 2015 года пре-триггер для детектора TRD генерировался не зависимо от состояния центрального триггерного процессора, т.е. электроника TRD запускалась на считывание даже когда соответствующие триггерные кластеры, включающие TRD, не были готовы к считыванию новых данных (часть детекторов находилась в состоянии busy). Чтобы уменьшить число бесполезных запусков считывающей электроники TRD, был предложен новый быстрый уровень триггера в центральном триггерном процессоре, который бы запускал электронику TRD до прихода триггера L0 уровня. В связи с этим новый уровень обозначили как LM (Level Minus 1).

В соответствии с планом эксперимента ALICE по модернизации триггерной системы, обеспечивающей дополнительный новый триггерный уровень LM, и необходимости работать при выводе пучков в 2015 году с расстоянием 50 нс и 25 нс между сгустками («банчами») протонов на БАК были выполнены работы по перемещению всей электроники в зону размещения ЦТП. Совместно с оптимизацией электроники детектора T0 это позволило сократить время прихода триггерных сигналов на ЦТП и формировать новый триггерный сигнал LM для TRD детектора через 390 нс после столкновения протонов. Новое положение электроники потребовало создание в марте 2015 года защиты от влияния на работу электроники и лазерной системы калибровки детектора T0 остаточного магнитного поля соленоида и диполя установки ALICE.

Для изучения множественности рождения заряженных частиц, вычисления плоскости реакции и для коррекции зависимости временных параметров детектора от множественности зарегистрированных заряженных частиц требуется стабильное амплитудное разрешение. Для этих целей были разработаны дополнительные модули QTC , осуществляющие преобразование заряда во время с временем преобразования 25 нс. В 2015 году были изготовлены и интегрированы в быструю электронику детектора T0 два типа модулей QTC. Первый тип модуля предназначен для измерения заряда индивидуального канала детектора ТО, второй тип –для измерения суммарной амплитуды сигналов с каждой из сторон выработки детектора И предназначен для контроля триггерных сигналов по множественности. Данные с этих модулей были добавлены в программы считывания данных AliTORawReader, в программу мониторирования в реальном времени и контроля собираемых данных AliT0QADataMakerRec. Внесенные в программу реконструкции изменения позволили записывать в ESD (Event Summary Data) значения амплитуд как со старых модулей QTC., так и с новых QTC. Модулей.

Задачей триггерных детекторов является принятие решений по отбору событий для каждого пересечения банчей, т.е. с частотой 40 МГц. Для отбора событий без внесения

искажений в изучаемые физические процессы необходимо иметь информацию в пределах +-10 банчей о событиях, которые произошли до или после выработанного триггерного сигнала для считывания данных (Past Future Protection). Для реализации этой возможности была проведена модернизация считывающей электроники детектора T0, позволяющей считывать данные, относящиеся к 22 банчам. Также была модернизирована программа реконструкции данных детектора T0.

1.1.2 Определение светимости коллайдера LHC

Для определения абсолютного сечения рождения J/ψ , ψ (2S), и других наиболее важных и интересных физических процессов необходимо определение светимости. Для экспериментального определения светимости и сечений взаимодействий физических процессов используют опорные сечения, измеренные ранее. Однако для энергий, при которых проводится эксперимент ALICE, измеренных сечений нет, поэтому возникает необходимость использования триггерных сечений. Светимость на ALICE измеряется передними детекторами: V0, T0, и ZDC. Триггерные сечения вычисляются при помощи метода Ван дер Меера, где интенсивность счета триггерных сигналов измеряется как функция относительного смещения пучков друг относительно друга.

В рамках этой задачи для определения светимости в 1 квартале 2015 г. произведен анализ данных сканирования Ван дер Меера, для p-p столкновений при энергии $\sqrt{s} = 8$ TeV с использованием передних детекторов T0 и V0. В 3 квартале на установке ALICE проведено сканирование по методу Ван дер Меера для p-p столкновений при энергии $\sqrt{s} = 13$ TeV с использованием передних детекторов T0, V0, AD. В качестве основного сигнала для оценки светимости на установке ALICE использовался тригтерный сигнал детектора T0 0TVX (сигнал генерируется, если вершина столкновении находится в заданном интервале).

Выполнен анализ данных для измерений по методу Ван дер Меера для p-p столкновений при энергии $\sqrt{s} = 13$ TeV, и $\sqrt{s} = 8$ TeV. Анализ показал, что триггерные сечения детекторов T0 и V0 согласуются с данными симуляции и равняются 29,9 ± 0,01 мб и 57,4 ± 0,025 мб для энергии $\sqrt{s} = 13$ TeV и 24,95 ± 0,2 мб и 55,7 ± 0,5 мб для энергии $\sqrt{s} = 8$ TeV.

1.1.3 Идентификация заряженных частиц и измерение плоскости реакции

В 2015 года на установке ALICE продолжен набор физических данных для p-р столкновений при энергии $\sqrt{s} = 13$ TeV. За отчетный период выполнена калибровка и реконструкция данных детектора T0 для всех периодов LHC13- LHC15. Время-пролетная система с использованием стартового сигнала T0 детектора позволяет идентифицировать

пионы, протоны при значениях поперечного импульса от 0.5 до 2,5 GeV/с, а для каонов и протонов до 3 - 4 GeV/c (рис.2). Временное разрешение детектора T0 составляет 45 псек .

Результаты измерения выхода каонов, пионов и протонов для p-p столкновений при энергии $\sqrt{s} = 7$ TeV приведены в работе [2].Для постоянного контроля параметров детектора разработана система автоматической публикации в интернете трендов данных детектора TO как функции номеров измерений (ранов) (по адресу http://aliqat0.web.cern.ch/aliqat0/data/2015/).

Для изучения множественности рождения заряженных частиц, вычисления плоскости реакции и для коррекции зависимости временных параметров детектора от множественности зарегистрированных заряженных частиц требуется стабильное амплитудное разрешение. Для этих целей были разработаны дополнительные модули QTC, осуществляющие преобразование заряда во время с временем преобразования 25 нс. В 2015 году были изготовлены и интегрированы в быструю электронику детектора T0 два типа модулей



Рисунок 1.2 - ТОГ β распределение в зависимости от импульса (левая) и проекция этого распределения для 1.95 <p<2.05 ГэВ/с

QTC. Первый тип модуля предназначен для измерения заряда индивидуального канала детектора T0, второй тип –для измерения суммарной амплитуды сигналов с каждой из сторон детектора и предназначен для контроля выработки триггерных сигналов по множественности. Данные с этих модулей были добавлены в программы считывания данных AliT0RawReader, в программу мониторирования в реальном времени и контроля собираемых данных AliT0QADataMakerRec. Внесенные в программу реконструкции изменения позволили записывать в ESD (Event Summary Data) значения амплитуд как со старых модулей QTC., так и с новых QTC. Модулей.

Для улучшения временного разрешения стартового сигнала детектора T0 для времяпролетного детектора TOF в режиме "offline", необходимо проводить времяамплитудную коррекцию.

Для выполнения коррекции необходимо рассчитать зависимость времени срабатывания каждого канала детектора T0 от амплитуды, вычислить псевдо-непрерывную функцию этой зависимости и обеспечить пересчет времени срабатывания канала с поправкой на амплитуду сигнала. В 2015 году был разработан программный модуль, позволяющий по физическим данным получить спектр событий на плоскости, по оси абсцисс которой располагаются показания модуля зарядового-аналогового преобразователя QTC, а по оси ординат временные значения модуля со следящим порогом CFD.

По полученному спектру программный модуль вычисляет зависимость времени срабатывания модуля CFD от амплитуды исходного сигнала. Для пересчета времени с учетом амплитудно-временной коррекции, необходимо найти функцию, соответствующую вычисленной зависимости (рис.3).



Рисунок 1.3 - Спектр событий в координатах CFD-QTC, синим цветом отмечена зависимость срабатывания модуля CFD от амплитуды аналогово сигнала, черным обозначена найденная функция амплитудно-временной коррекции, значения приведены в каналах

Данная коррекция может улучшить временное разрешение детектора T0 в режиме "offline" на десятки пикосекунд.. В 2015 году выполнены работы по разработке эффективных алгоритмов нахождения функций коррекций для каждого измерительного канала детектора T0.

Данная программа была проверена на обработке данных для Pb-Pb столкновений при энергии $\sqrt{S_{NN}} = 2.76 \text{ TeV}$. Основная задача при вычислении плоскости реакции и ее разрешения заключается в калибровке каждого канала детектора T0 и коррекции вектора Q в зависимости от центральности взаимодействия. Для определения разрешения плоскости реакции для конкретного детектора используются данные с двух других детекторов, которые позволяют также вычислять плоскость реакции. На Рисунок 1.1.4 представлены

результаты по определению разрешения плоскости реакции основных детекторов АЛИСА, которые используются для ее определения.



Рисунок 1.4 - Разрешение направления плоскости реакции для детекторов T0, V0, TPC. В фигурных скобках указаны детекторы, которые используются для определения разрешения.

1.1.4 Модернизация супердетектора ALICE

Новые условия эксперимента требуют модернизации нескольких ключевых подсистем супердетектора ALICE, в частности триггерных детекторов. Вместе с тем, в процессе модернизации супердетектора ALICE предполагается разработка и добавление новых детекторных подсистем, уменьшающих пространство, доступное для монтажа триггерных детекторов на С-стороне – ближайшей к области столкновения пучков. Для решения этих проблем необходимо разработать новый эффективный метод регистрации элементарных частиц и реализовать его в детекторном устройстве ФИТ, расширяющем функциональные возможности существующих детекторных устройств: Т0, V0 и FMD.

В настоящее время осуществляется разработка детекторного устройства ФИТ для модернизированного супердетектора ALICE (модернизация начнется после 2018 года). Для разработки и создания этого детекторного устройства формируется новая международная коллаборация, в которую изъявили желание войти уже 13 институтов. ИЯИ РАН, МИФИ, КИ принимают активное участие в разработке и выработке основных принципов построения детекторного устройства ФИТ.

В качестве основного элемента детекторного устройства ФИТ предполагается использовать черенковский детектор на основе многоанодного фотоумножителя на микроканальных пластинах XP85012. Первые тестовые исследования, проведенные в лабораторных условиях и на ускорителе, показали, что по основным параметрам этот

фотоумножитель подходит для детекторного устройства ФИТ. Однако, для окончательного решения, насколько данный фотоумножитель подходит для реализации детекторного устройства ФИТ, а также для создания электронных систем детекторного устройства, требуются детальные исследования характеристик ФЭУ, не отраженных в стандартном паспорте.

Особенностью этого фотоумножителя является его относительно большой размер (чувствительная площадь 53х53 мм), что необходимо принимать во внимание при создании детектора устройства с временным разрешением лучше 50 пс, т.к. необходимо учитывать время распространения сигнала от места пролета частицы до вывода.

Были проведены тщательные и всесторонние исследования параметров фотоумножителя на микроканальных пластинах ФЭУ ХР 85012 с точки зрения его применения в детекторном устройстве ФИТ с высоким временным разрешением. Показано, что в целом в режиме регистрации одиночных частиц, временное разрешение будет лучше 50 пс, что вполне соответствует требованиям, предъявляемым к детектору ФИТ.

Вместе с тем обнаружено два эффекта, которые влияют на временное разрешение детектора, а именно

а) задержка сигнала на выходе ФЭУ (в силу конструктивных особенностей объединения сигналов с 64 анодов на общий выход) меняется в зависимости от точки засветки на фотокатоде ФЭУ;

б) наблюдаются наводки с канала на канал выхода ФЭУ.

Для устранения этих эффектов совместно с фирмой PHOTONIC, USA было принято решение модернизировать и провести первые испытания на пучках релятивистских частиц в ЦЕРНЕ нового черенковского детектора с модернизированным микроканальным ФЭУ XP85012.

На рисунках 1.5 и 1.6 представлены фотографии стандартного ФЭУ ХР85012 с 64 анодами и дополнительной электронной платой, разработанной в ИЯИ для объединения по 16 анодов. На рисунке 1.7 показан разобранный ФЭУ ХР85012. Внутри ФЭУ ХР85012 имеются внутренние электронные платы (на фотографии они имеют зеленый цвет). На Рисунок 1.1.8 представлена фотография разработанной новой электронной платы для создания модифицированного ФЭУ ХР85012. Разработка и производство новой электронной выполнены В Конструкторском радиоэлектроники Института. планы отделе С PHOTONIC был выпущен использованием этой платы на фирме экспериментальный образец модифицированного ФЭУ XP85012. Сборка черенковского модуля и его настройка были проведены в Конструкторском отделе радиоэлектроники Института.

Фотография изготовленного дополнительного лабораторного образца черенковского детектора ФИТ с использованием модифицированного ФЭУ XP85012 представлена на Рис.9. Новый образец позволят уменьшить количество внутренних плат и соответственно иметь меньшие габариты.



Рисунок 1.5 - Стандартный микроканальный ФЭУ ХР85012



Рисунок 1.6 - Стандартный микроканальный ФЭУ ХР85012 с дополнительной платой для объединения анадов по 16. С каждого фотоумножителя используются четыре выхода



Рисунок 1.7 - Разобранный ФЭУ ХР85012.



Рисунок 1.8 - Новая электронная плата (две стороны) для создания модифицированного ФЭУ XP85012



Рисунок 1.9 - Лабораторный образец черенковского детектора ФИТ с использованием модифицированного ФЭУ XP85012

Тестовые испытания образца черенковского детектора с использованием модифицированного ФЭУ XP85012 были проведены в ЦЕРНЕ . На рис.10 представлены амплитудные спектры и временное разрешение черенковского детектора на основе стандартного и модифицированного ФЭУ XP85012. Использование модернизированного ФЭУ XP85012 позволило получить временное разрешения 22 пикосекунды, амплитуды сигналов с нового ФЭУ XP85012 в два раза больше при одном и том же усилении сигналов.



Рисунок 1.10 - Амплитудные спектры и временное разрешение черенковского детектора на основе стандартного (слева) и модифицированного (справа) ФЭУ XP85012 для четырех квадрантов

1.1.4.1 Испытания прототипа детектора AD (ALICE Diffraction) на тестовом пучке PS T10 канала в ЦЕРН

В рамках программы исследований дифракционных процессов в эксперименте ALICE в 2015 г. проведены испытания прототипа детектора AD (ALICE Diffraction) на тестовом пучке канала в ЦЕРН (1 -7 октября 2015 г.). Целью испытаний являлось измерение функции отклика детектора при прохождении минимально-ионизирующих частиц (протонов, пионов и позитронов) через оптоволоконную систему считывания детектора, имитирующих фоновые процессы, протекающие в реальных условиях эксперимента ALICE.

Схема расположения детекторов на тестовом пучке канала PS T10 в ЦЕРН представлена на Рис.11: пучок релятивистских частиц проходил последовательно через систему XDWC-проволочных координатных дрейфовых камер, «BLACK» - детектор TOFсистемы, испытуемый детектор AD, телескоп быстрых детекторов T0 Дет.1 и T0 Дет.2 и ITSдетекторную координатную систему. Импульс в интервале 1 – 2 ГэВ/с и положительная полярность частиц в тестовом канале задавались системой магнитов и магнитных линз.

Для выработки быстрого триггера пучка в испытаниях прототипа детектора AD группой сотрудников ЛРЯФ ИЯИ РАН в 2015 г. был разработан, испытан и установлен в рабочее положение Телескоп быстрых черенковских детекторов T0 Дет.1 и T0 Дет.2 с кварцевыми радиаторами. Временное разрешение T0 Дет.1 и T0 Дет.2 составляло около 50 пикосекунд.

Процедура подготовки телескопа к тестовым измерениям состояла в следующем:

 с помощью генератора импульсов была сформирована и отрегулирована электронная схема, необходимая для выработки триггера пучка. Временная структура логической электроники для выработки триггера показана на Рис.11 (справа внизу);

- с помощью лазера проведена юстировка 2 пустых цилиндрических корпусов детекторов относительно оси пучка: по крестам лазера и геодезическим отметкам выделена ось пучка; методом регулировки положения прецизионной подставки с направляющей пластиной ось пучка (кресты лучей лазера) пропущена по центрам двух пустых корпусов детекторов;

- по мюонам, образованным в Beam Damper, подобраны временные интервалы в электронной схеме для выработки триггера;

 произведён сдвиг по вертикали второго детектора на 19 мм с юстировкой по оси пучка всей системы в целом для формирования области пересечения размерами 1 мм по вертикали (см. Рис.11, слева внизу);

- в T10 Control Room проведены сигнальные кабели: ТРИГГЕР с временной привязкой по Дет.1, NIM-сигнал от Дет.1 и NIM-сигнал от Дет.2. После преобразования NIM -> TTL сигналы выданы в DAQ-систему детектора AD;

В испытаниях прототипа детектора AD Телескоп быстрых черенковских детекторов выполнял следующие основные функции:

1. Сканирование детектора AD пятном пучка 1 х 2 мм (при перемещении координатной прецизионной подставки с детектором AD в горизонтальном и вертикальном направлениях).

2. Разделение (идентификация) пионов (позитронов) и протонов в пучке по времени пролёта при импульсе частиц 1 и 2 ГэВ/с на пролётной базе 63 см.



Рисунок 1.11 – Схема расположения детекторов на тестовом пучке канала PS T10 в ЦЕРН (1 -7 октября 2015 г.) для испытаний прототипа детектора AD

1.1.4.2 Разработка и изготовление усилителей-разветвителей PASA для детектора AD (ALICE Diffraction)

Для усиления и разделения (разветвления) сигналов, поступающих от 12 шт. ФЭУ каждой из "А" и "С" сторон детектора AD на амплитудный и временной каналы измерения в эксперименте ALICE, группой сотрудников ЛРЯФ ИЯИ РАН в 2015 г. был разработан, изготовлен и испытан одноканальный модуль усилителя-разветвителя PASA.

12 модулей PASA были установлены в специальный бокс, фиксирующий их положение, а также приходящие и исходящие коаксиальные кабели связи. Боксы с 12 модулями PASA каждой из "A" и "C" сторон детектора AD размещены на передней стороне стойки электроники, что обеспечивает отсутствие разности потенциалов общих шин усилителей и регистрирующих модулей. Такое решение предопределило низкий уровень пьедесталов в амплитудных каналах в диапазоне 1-2 цифровых отсчетов.

Таким образом, расширение динамического диапазона "снизу" позволило уменьшить максимальные значения высоковольтного питания ФЭУ и одновременно снизить уровень нелинейности больших сигналов. На тестовом пучке канала PS T10 в ЦЕРН в 2015 г. проведено дальнейшее исследование влияния различных коэффициентов усиления усилителя PASA на максимальный динамический диапазон оцифрованных сигналов.

1.1.4.3 Разработка системы сбора данных на основе TRB (Trigger Readout Board) и фронт-энд TOT (Time Over Threshold) электроники для черенковских и сцинтилляционных детекторов ФИТ-системы в эксперименте ALICE

В 2015 г. на тестовом пучке канала PS T10 в ЦЕРН проведены испытания двух вариантов аналоговой электроники, использующей ТОТ-метод для измерения амплитуды сигналов с прототипа ФИТ-детектора, разрабатываемого для модернизации быстрых триггерных детекторов в эксперименте ALICE. Для испытаний были использованы аналоговые сигналы от черенковского детектора на основе кварцевого радиатора и микроканального ФЭУ при регистрации минимально-ионизирующих частиц (позитроны, пионы, протоны) с импульсом 1 – 6 ГэВ/с и подсистема сбора данных на основе TRB2 (Trigger Readout Board). Измерения проведены при различных порогах срабатывания и варьировании высокого напряжения питания прототипа ФИТ-детектора.

Цель измерений состояла в получении фактического соответствия между амплитудными спектрами с прототипа ФИТ-детектора и спектрами длительностей сигналов дискриминатора ТОТ-метода. Эти данные лягут в основу разработки канала аналоговой электроники ТОТ-метода, удовлетворяющей требованиям эксперимента ALICE в RUN3.

1.1.5 Фрагментация ядер под действием реальных и виртуальных фотонов

1.1.5.1 Изучение ультрапериферических взаимодействий ядер на БАК

Ультрапериферическими взаимодействиями ядер называются столкновения ядер с прицельными параметрами, превышающими сумму радиусов сталкивающихся ядер, в ходе которых партнеры по столкновению воздействуют друг на друга исключительно своими своими кулоновскими полями. Поглощение виртуальных фотонов в таком случае может приводить к разрушению ядер, называемому их электромагнитной диссоциацией (ЭМД). Событием единичной ЭМД является ультрапериферическое взаимодействие, в котором ядро пучка А возбуждается (А -> А*) и испускает, по меньшей мере, один нуклон вперед, который регистрируется соответствующим ZDC. При этом состояние партнера по столкновению ядра из пучка С - остается неизвестным. В отношении ЭМД тяжелых ядер свинца принято считать, что испарение нейтронов из возбужденных ядер доминирует и поэтому события ЭМД без нейтронов очень редки. Тем не менее, модель RELDIS предсказывает, что около 3% ЭМД событий приводят исключительно к эмиссии протонов без испускания нейтронов. Более того, нейтронная эмиссия довольно часто сопровождается эмиссией протонов. Справедливость этих предсказаний предлагается проверить путем использования протонных ZDCs при исследовании ЭМД событий наряду с использованием нейтронных ZDCs в декабрьском сеансе БАК в 2015 году. В большинстве описанных выше одиночных событий

ЭМД, определенных для ядер пучка A соответствующие партнеры по столкновению из пучка C не фрагментируют, а только являются излучателями фотонов. События одиночной ЭМД для пучка C определяются аналогично.

Любой набор событий одиночной ЭМД содержит ультрапериферические столкновения, где происходят дополнительные процессы обмена фотонами. В таких случаях обмениваются два фотона, причем на втором этапе происходит обмен ролями "излучателя" и "поглотителя", см. Рисунок 1.1.12. Второй обмен фотона происходит независимо от первого, поскольку изменением энергии ионов из-за излучения фотонов можно пренебречь. Такие события относятся к событиям взаимной ЭМД и могут быть обнаружены с помощью срабатывания ZDCs с каждой стороны. Сечения ЭМД, вычисленные с помощью модели RELDIS для декабрьского сеанса 2015 года, приведены в таблице 1.



Рисунок 1.12 - Диаграмма Эйлера—Венна для процессов одиночной и взаимной электромагнитной диссоциации ядер А и С в ультрапериферических столкновениях на коллайдере LHC.

Таблица 1.1 Сравнение результатов RELDIS для ультрапериферических PbPb столкновений в первом (2010 год) и втором (2015) сеансах

Энергия столкновений sqrt(s _{NN})	Сечения эмиссии нейтронов, одиночная ЭМД (минимум один нейтрон в одном из ZDC), (барны)		Сечения эмиссии нейтронов, взаимная ЭМД (минимум один нейтрон в каждом из ZDCs), (барны)	
(ТэВ)	RELDIS (LO+NLO)	Измерения ALICE	RELDIS (LO+NLO)	Измерения ALICE
2.76	185.2±9.2	187.4±0.2 (stat) +13.2 -11.2 (syst)	5.5±0.6	5.7±0.1 (stat) ±0.4 (syst)
5.02	205.3±10.3		5.8±0.6	

Энергия столкновений sqrt(s _{NN}) (ТэВ)	Сечения эмиссии протонов без сопровождения нейтронов (минимум один протон <i>в одном</i> из протонных ZDC, но без нейтронов) (барны)		Сечения эмиссии протонов без сопровождения нейтронов (минимум один протон <i>в каждом</i> из протонных ZDC, но без нейтронов) (барны)	
	RELDIS (LO+NLO)	Измерения ALICE	RELDIS (LO+NLO)	Измерения ALICE
5.02	6.1±0.6	Данные в обработке	0.36	Данные в обработке

1.1.5.2 Мультифрагментация легких ядер в результате поглощения фотонов

В опубликованной в 2015 году работе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов поглощения фотонов промежуточных энергий 700 -- 1500 МэВ ядрами углерода, приводящие к множественному образованию фрагментов ядра-мишени, включая их развал на отдельные нуклоны. Было найдено, что в среднем образование восьми фрагментов наблюдается один раз на 100 событий разрушения ядра, а полное расщепление ядра на двенадцать нуклонов происходит в среднем один раз на 2000 событий. Результаты измерений, выполненных с помощью детектора LAGRANgE в широком диапазоне углов вылета фрагментов, хорошо описываются моделью фотоядерных реакций RELDIS и Статистической Моделью Мультифрагментации, разработанными в ИЯИ РАН в сотрудничестве с другими институтами. Согласно предсказаниям модели лёгкие ядра с большей вероятностью получают энергию возбуждения, которая сравнима с их полной энергией связи, по сравнению со средними и тяжёлыми ядрами. Было отмечено, что свойства начального состояния возбуждённой ядерной системы, образующейся в результате поглощения фотонов, характеризуются меньшим разнообразием и поэтому могут быть определены с большей точностью чем свойства горячей ядерной системы, образующейся в столкновениях ядро-ядро. В последнем случае при небольших кинетических энергиях сталкивающихся ядер возникают неопределённости, связанные с отнесением горячей системы либо к ядру-остатку снаряда, либо к ядру-остатку мишени. Работа была выполнена совместно с Лабораторией фотоядерных реакций ИЯИ РАН, физиками из Франции (институт IN2P3) и Италии (институт INFN и университеты).

1.1.6 Предложение постановки новых экспериментов на фиксированной мишени с использованием пучков коллайдера LHC

Новые эксперименты в энергетическом интервале между энергиями ускорителя SPS в ЦЕРНе, коллайдеров RHIC в Брукхейвене, США и LHC в ЦЕРНе очень важны для изучения механизмов рождения и подавления рождения кваркониев и понимания условий возникновения кварк-глюонной плазмы (QGP). Исследование эффектов холодной ядерной

материи (CNM) и понимание свойств ядерной материи требуют систематических и статистически достоверных измерений также в области низких энергий. Чтобы понять эффекты холодной ядерной материи, планируются эксперименты с высокой статистикой по рождению чармония при низких энергиях до 35 ГэВ/нуклон в эксперименте CBM на FAIR и в эксперименте MPD на коллайдере NICA в Дубне. В ЦЕРНе на ускорителе SPS предложен и готовится эксперимент на фиксированной мишени CHIC (Charm in Heavy Ion Collisions) для изучения рождения чармония при энергиях до $\sqrt{s_{NN}} \sim 20$ ГэВ. На коллайдере RHIC проводится программа измерений по уменьшению и сканированию энергии пучка (BES-I) на установках STAR и PHENIX, однако светимость пучка резко падает с уменьшением энергии. Поэтому на установке STAR осуществляется программа измерений на фиксированной мишени и уже получены первые данные в столкновениях Au-Au при энергии 14.5 ГэВ, что соответствует $\sqrt{s_{NN}} = 3.9$ ГэВ в системе центра масс. Однако, эта энергия недостаточна для исследования рождения чармония.

Если пучки Большого Адронного Коллайдера (LHC) будут использоваться в экспериментах с фиксированной мишенью, то в р-А и А-А столкновениях может быть исследована область энергии ниже энергии коллайдера RHIC. Для пучка протонов с энергией 7 ТэВ энергия в нуклон-нуклонном центре масс составляет $\sqrt{S_{NN}} = 114.6$ ГэВ, для пучка свинца с энергией 2.75 ТэВ эта энергия равна $\sqrt{S_{NN}} = 71.8$ ГэВ. Используя пучки LHC с уменьшенной энергией, можно получить данные в диапазоне энергии 30-100 ГэВ. Свойства фазовой диаграммы квантовой хромодинамики (QCD) могут быть изучены с использованием пучков с энергией 10-100 ГэВ на фиксированной мишени. Поиск эффектов фазового перехода и определение критической точки является основной целью энергетического скана. Более того, это дает возможность исследовать механизм рождения и затем подавления в результате адронной диссоциации в Кварк-Глюонной плазме от механизма вторичного рождения чармония в результате рекомбинации очарованных кварка и антикварка, т.к. вероятность рекомбинации сильно падает с уменьшением энергии.

Существующая система газовой мишени для измерения светимости (SMOG) в эксперименте LHCb может быть использована для физики с фиксированной мишенью на Большом Адронном колладере LHC. Проведены тестовые измерения p-Ne и Pb-Ne столкновений, но в настоящее время нет точных измерений плотности и давления газа.

Известно, что эксперименты с фиксированной мишенью обеспечивают большую светимость по сравнению с экспериментами на коллайдерах. Возможно использовать фиксированную мишень на пучках LHC в форме тонкого кольца, расположенного в гало
пучка, что не мешает другим экспериментам. Это позволяет использовать аппаратуру существующих экспериментов ALICE или LHCb и получать данные с хорошей статистической точностью. Разработан проект нового эксперимента AFTER (A Fixed Target ExpeRiment) на пучках LHC, который использует выведенный в сильном кристаллическом поле пучок. Эксперимент AFTER имеет широкую физическую программу, позволяет использовать мишени большой толщины и получать предельно высокую светимость. Сейчас идет работа над предложением (Expression of Interest) по эксперименту на фиксированной мишени для ЦЕРНа. Эксперимент с мишенью в форме тонкого кольца мог бы являться первым шагом в эксперименте AFTER.

Основным параметром для определения возможности рождения чармония в эксперименте с фиксированной мишенью является аксептанс. Проведены расчеты геометрического аксептанса и выходов J/ψ -мезонов на фиксированной мишени на пучках LHC. Результаты, показывающие возможность проведения таких экспериментов с хорошей статистической точностью опубликованы [6,7].

1.1.7 Публикации, в которых основное участие принимали сотрудники ИЯИ

1 B.Abelev ..., F.Guber, T.Karavicheva, O.Karavichev, A.Kurepin, A, Maevskaya

A.Reshetin, I.Pshenichnov et al., ALICE collaboration

"Measurement of electrons from semileptonic heavy-flavor hadron decays in pp collisions at $\sqrt{s} = 2.76$ TeV" Phys. Rev. D 91 (2015) 012001

2 B.Abelev ..., F.Guber, T.Karavicheva, O.Karavichev, A.Kurepin,

A, Maevskaya A. Reshetin, I. Pshenichnov et al., ALICE collaboration

"Measurement of pion, kaon and proton production in proton-proton collisions at

√s=7 TeV" Eur.Phys.J. C75 (2015) 5, 226, 33pp.

3 B.Abelev ..., F.Guber, T.Karavicheva, O.Karavichev, A.Kurepin, A, Maevskaya A.Reshetin, I.Pshenichnov et al., ALICE collaboration

"Inclusive photon production at forward rapidities in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 0.9$,

2.76, and 7 TeV" Eur.Phys.J. C75 (2015)4, 146

4 B.Abelev ..., F.Guber, T.Karavicheva, O.Karavichev, A.Kurepin, A, Maevskaya

A.Reshetin, I.Pshenichnov et al., ALICE collaboration Inclusive quarkonium production at forward rapidityin pp collisions at $\sqrt{s}=8$ TeV. arXiv:1509.08258v1 [hep-ex] 28 Sep 2015, CERN-PH-EP-2015-267 September 26, 2015

5 B.Abelev ..., F.Guber, T.Karavicheva, O.Karavichev, A.Kurepin, A, Maevskaya A.Reshetin, I.Pshenichnov et al., ALICE collaboration Performance of the Fast Interaction Trigger for the ALICE Upgrade, Poster, Quark Matter, 2015, Kobe, Japan 6 N.S.Topilskaya and A.B.Kurepin "Charmonium production in heavy ion collisions" PoS(Baldin_ISHEPP_XXII) 044 (2015)

7 A.B.Kurepin and N.S.Topilskaya "Quarkonium Production and Proposal of the New Experiments on Fixed Target at the LHC " Advances in High Energy Physics, vol. 2015, Article ID 760840, 13 pages, 2015. doi:10.1155/2015/760840

8 V.Nedorezov, A.D'Angelo.....I.Pshenichnov, et al., "Disintegration of ¹²C nuclei by 700 -1500 MeV photons " Nuclear Physics A 940 (2015) 264-278

Диссертации

26.03.2015 Прошла защита диссертации на соискание степени кандидата физ. мат. наук. А.Н.Курепина «Автоматизированная система управления и контроля стартового детектора времяпролетной системы эксперимента ALICE на Большом Адронном Коллайдере»

Общее число публикаций по эксперименту АЛИСА в 2015 году (25):

EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL C - 3 JOURNAL OF HIGH ENERGY PHYSICS - 7 JOURNAL OF INSTRUMENTATION - 4 NATURE PHYSICS - 1 PHYSICAL REVIEW C - 3 PHYSICAL REVIEW D - 2 PHYSICS LETTERS B - 5

Доклады на конференциях (37):

16TH INTERNATIONAL WORKSHOP ON ADVANCED COMPUTING AND ANALYSIS - 1 3RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON NEW FRONTIERS IN PHYSICS - 6 9TH INTERNATIONAL WORKSHOP ON HIGH-PT PHYSICS AT LHC - 5 DARK MATTER, HADRON PHYSICS AND FUSION PHYSICS - 1 DIFFRACTION 2014: INTERNATIONAL WORKSHOP ON DIFFRACTION IN HIGH-ENERGY - 1 HOT QUARKS 2014: WORKSHOP FOR YOUNG SCIENTISTS - 16 Proceedings of the Indian National Science Academy - 1 RESONANCE WORKSHOP AT CATANIA - 4 XLIV INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MULTIPARTICLE DYNAMICS (ISMD 2014) - 1 XXXVII SYMPOSIUM ON NUCLEAR PHYSICS - 1

1.2 Исследование рождения векторных мезонов в адрон-ядерных и ядерно-ядерных

взаимодействиях на установке HADES

Руководитель: ведущий научный сотрудник, кандидат физ.-мат. наук Ф.Ф. Губер

1.2 Наиболее важные научные достижения группы ИЯИ в эксперименте HADES в 2015 г.

В 2015 г. группа ИЯИ РАН продолжала анализ азимутальных потоков частиц, полученных в результате изучения реакции Au+Au при энергии налетающего пучка 1.23 ГэВ на нуклон на установке HADES. Анизотропные потоки частиц являются независимыми наблюдаемыми для описания свойств и эволюции системы, образующейся в ядро-ядерном взаимодействии. Исследование азимутальных потоков легких изотопов водорода (протонов и дейтронов) расширено на высшие гармоники. Впервые в данном диапазоне энергий удалось выделить ненулевой вклад третьей и четвертой гармоник ряда Фурье, что еще не было достигнуто в других экспериментах при этих энергиях. В 2015 году основной акцент в анализе азимутальных потоков, он был направлен на подготовку публикации результатов по уже хорошо изученным в этой области энергий гармоникам направленного (v1) и эллиптического потоков (v2). Для этого была проведена лучшая детализация этих потоков одновременно по двум кинематическим переменным (pt:y), доступным на установке HADES. Показано, что имеющаяся статистика также позволит извлекать потоки вплоть до v4 с хорошей двумерной детализацией.

Значительные усилия изучению эффектов. были уделены систематических Обнаруженная систематика пока не приводит к невозможности определения v3. Учет систематических эффектов для гармоники v4 приводит к невозможности её определения для центральных событий, но для периферических её вклад по прежнему остается ненулевой. Проведен детальный анализ на исключение возможных ошибок в процедуре извлечения гармоник v3 и v4 за счет возможных ошибок при фитировании угловых распределений протонов. Показано, что v3 и v1 имеют разную зависимость от поперечного импульса, таким образом нельзя считать, что в проводимом анализе v3 появляется за счет систематической ошибки при извлечении v1. Также на простой модели изучалась зависимость чувствительности v3 и v4 от доступной статистики. В 2015г. был продолжен анализ потоков заряженных каонов К⁺, уточнен аксептанс в котором возможно провести надежное вычитания фона. В целом, было показано, что для каонов желательна специфическая настройка реконструкции и отбора треков, но и в стандартной версии имеется возможность получения нового результата. Для подготовки публикации потребуется сравнение с моделями.

Результаты анализа докладывались на совещаниях коллаборации HADES, на международной 17 Ломоносовской конференции по физике элементарных частиц, которая состоялась в Москве 20-26 августа 2015г.

Группа ИЯИ РАН продолжила в 2015г. участие в создании новой детекторной системы установки HADES - электромагнитного калориметра для исследований на пучках как действующего ускорителя SIS18 в GSI, так и создаваемого ускорителя SIS-100 на ФАИР в Дармштадте, Германия. Завершены работы по реконструкции модулей калориметра – в результате около 1000 модулей подготовлено для дальнейшей их сборке с фото умножителями и системой мониторирования и тестированию на стенде в ГСИ, созданном группой ИЯИ.

1.2 Введение

Физическая программа работ на широкоапертурном магнитном спектрометре HADES направлена на поиск и исследование явлений, связанных со спонтанным нарушением киральной симметрии – фундаментальной симметрии сильных взаимодействий. При нулевой температуре и барионном химическом потенциале физический КХД-вакуум обладает двумя основными характеристиками: конфайнментом и спонтанно нарушенной киральной симметрией. Нарушение киральной симметрии определяет базовые свойства наблюдаемого мира, в частности, массовый спектр легких адронов. В столкновениях тяжелых ионов при высоких энергиях устанавливаются экстремальные температуры и плотности, при которых ожидается «плавление» кирального конденсата и формирование кирально-симметричной среды. Однако, уже при энергиях налетающих ядер порядка 1 ГэВ на нуклон в лабораторной системе данные эффекты могут проявиться, в частности, в изменении свойств легких векторных мезонов (сдвиг массы и изменение ширины резонансов), рожденных в ядроядерных столкновениях. Изучение свойств этих мезонов посредством детектирования их распадов с испусканием электрон-позитронных пар является важнейшим направлением исследований на установке HADES.

Исследование коллективных потоков заряженных частиц, образующихся в столкновениях тяжелых ядер, также является одним из важных направлений на HADES. При энергиях пучка порядка 1-2 ГэВ на нуклон, основная мотивация для изучения потоков связана с исследованием уравнения состояния ядерной материи. Исследование уравнения состояния ядерной материи посредством оценки её сжимаемости позволяет на макроскопическом уровне поставить предел массам нейтронных звезд, что важно для понимания эволюции звезд и астрофизики в целом.

Для корректной интерпретации данных, полученных в столкновениях тяжелых ионов, необходима также информация об элементарных нуклон-нуклонных столкновениях, которая позволит выделить эффекты в ядерных столкновениях. В настоящее время установка HADES является единственным спектрометром в мире, изучающим образование дилептонов, а также

заряженных пионов, каонов и фрагментов ядер в различных сталкивающихся системах: pp, dp, pA, AA в области энергий столкновений ~1-4 ГэВ на нуклон.

НАDES является в настоящее время единственным экспериментом в ГСИ, который еще будет набирать экспериментальные данный на ускорителе SIS18, а после 2020 года будет перемещен на ускоритель SIS100 комплекса ФАИР и будет той установкой, на которой будут проводиться первые эксперименты на ускорителе SIS100.

Группы ИЯИ РАН (11 чел. из них 2 молодых ученых) участвуют в международной колаборации HADES (ГСИ, Дармштадт) с 1998 года. Коллаборация HADES включает 17 Институтов из 9 Европейских стран.

1.2 Отчет об участии групп ИЯИ РАН в эксперименте HADES в 2015г.

В 2015 году работа по эксперименту HADES группой ИЯИ РАН проводилась по двум основным направлениям:

- анализ экспериментальных данных по столкновению тяжелых ионов золота Au+Au при энергии налетающего пучка 1.23 ГэВ на нуклон с фиксированной мишенью, полученных на установке HADES в 2012г.;

- разработка и тестирование электромагнитного калориметра, создаваемого для установки HADES для работы на пучках, как на действующем ускорителе SIS18 в GSI, так и на создаваемом ускорителе SIS-100 комплекса ФАИР в Дармштадте.

Анизотропные потоки частиц являются независимыми наблюдаемыми для описания свойств и эволюции системы, образующейся в ядро-ядерном взаимодействии. Так, анализ коллективных потоков частиц на экспериментах области ультрарелятивистских энергий (STAR, PHENIX) может рассматриваться в качестве независимого наблюдаемого наступления состояния т. н. кварк-глюонной плазмы (КГП) [1-3]. Вместе с тем интересным представляется и процесс перехода от фазы адронной материи к фазе КГП. В этой связи несколькими коллаборациями (STAR, NA61/SHINE, CBM, NICA-MPD) заявлен интерес и подготовлены, а на действующих экспериментах уже начаты программы сканирования по энергии, связанные с изучением фазовой диаграммы в области около критической точки. Новые возможности по изучению азимутальных потоков имеются теперь и в области энергий порядка 1-ГэВ на нуклон благодаря недавно полученным на установке HADES экспериментальным данным с высокой статистикой в этой области энергий на самой нижней границе предложенной программы сканирования по энергии [4].

Ведущийся в ИЯИ РАН уже в течение нескольких последних лет анализ азимутальных потоков частиц, полученных в результате изучения реакции Au+Au при энергии налетающего

пучка 1.23 ГэВ на нуклон, позволил получить указания на существование более высоких гармоник v3 и v4 в азимутальных потоках в этой области энергии. В 2015 году был продолжен анализ азимутальных потоков. Этот анализ был нацелен, с одной стороны, на более тщательное изучение высоких гармоник, а с другой стороны, на подготовку публикации результатов по уже хорошо изученным в этой области энергий гармоникам направленного (v1) и эллиптического потоков (v2). Для этого использовалась лучшая детализация одновременно по двум кинематическим переменным (p_t :y), доступным на установке HADES. Также был продолжен анализ потоков заряженных каонов K⁺, уточнен аксептанс в котором возможно провести надежное вычитания фона.

После обнаружения группой ИЯИ РАН указания на возможность исследования более высоких гармоник v3 и v4, в коллаборации HADES возник также интерес расширить эти исследования на потоки прямых фотонов, а также на поиски проявления кирального магнитного эффекта.

Одним из направлений группы ИЯИ в анализе азимутальных потоков в 2015 г. было изучение возможных систематических эффектов в результатах полученных нами ранее в 2013-2014 годах. Изучение литературы показало, что в области энергий порядка нескольких ГэВ не имеется публикаций касающихся ненулевого вклада высоких гармоник v3 и v4, следовательно, требуется тщательное изучение возможных систематических эффектов.

Другое направление анализа в 2015г. - разработка улучшенной методики получения более высоких гармоник за счет учета ряда не учтенных ранее эффектов. Это, прежде всего, учет ошибок в определении гармоник v1 и v2, возникающие при фитировании, которые могут приводить к искусственному возбуждению высоких гармоник, а также другой, не учтенной ранее систематики.

В 2015 году было проведено, основанное на подходе Глаубера, более аккуратное, нежели использованное нами в 2013-2014 г.г., разбиение событий на классы центральности. Для этих классов центральности были оценены соответствующие разрешения по углу плоскости реакции, Рисунок 1.13. Разрешение оценивалось методом Оллитро [5] путем равновероятного разбиения ячеек в переднем сцинтилляционном годоскопе (FW) на две подгруппы.



Рисунок 1.13 - Зависимость разрешения R от класса центральности, определенного в процентах как доля полного сечения. Значениям прицельного параметра 0.00<b<3.25, 3.25<b<4.60, 4.60<b<5.62, 4.60<b<6.50, 6.50<b<7.26, 7.26<b<7.95, 7.95<b<8.58, 8.58<b<9.18 соответствуют классы центральности 0–5%, 5–10%, ..., 40–45%

Для оценки систематики, связанной с неточностью учета положения центра пучка, был получен набор измерений азимутальных потоков с включением или исключением ряда коррекций. На рис.2 показаны зависимости v1, v2, v3 и v4 от нормализованной быстроты для протонов, при этом значения поперечного импульса проинтегрированы в области $p_t>303$ MэB/c, после коррекции на эффективность регистрации протона в трековой части установки HADES. Учитывалась коррекция, связанная с процедурой так называемого углового выравнивания остаточной анизотропии угла плоскости реакции, а также коррекция за счет более жесткого отбора по времени пролета частиц-спектаторов (область фрагментации налетающих частиц). Результаты приведены для трех классов центральности 0.00<b<0.25, 0.25<b<0.45 и 0.45d>0.60, которые отображены красным, зеленым и синим цветами для четырех случаев.

1) Учет поправок на центр пучка и на остаточную анизотропию угла плоскости реакции для разных классов центральности за счет введения весов, отвечающих разным углам плоскости реакции, так, что полученное в итоге распределение по углу плоскости реакции изотропно;

2) Дополнительно к 1) применен более жесткий отбор по времени пролета частицспектаторов;

 не сделаны упомянутые в случае 1) коррекции на положение пучка и на угол плоскости реакции;

4) не сделана коррекция на положение пучка, но возникающая анизотропия полученного угла плоскости реакции полностью скорректирована лишь за счет введения соответствующих весов для событий с разными значения угла плоскости реакции.



Рисунок 1.14 - Изучение систематических эффектов, вызванных наличием (или отсутствием) учета положения пучка, пособытийной коррекции угла плоскости реакции, а также возможных отклонений за счет вариации отборов частиц в области фрагментации пучка, основанной на времени пролета регистрируемых частиц в переднем сцинтилляционном годоскопе FW

Видно, что полученные в результате вариаций величин, используемых для угловых коррекций и отклонения геометрического центра пучка, различия в оценке величин Фурьегармоник потоков незначительны, за исключением наиболее центральных событий.

Дополнительно было исследовано возможное влияние ограниченного азимутального аксептанса трековой части установки HADES на систематическую ошибку параметров Фурье разложения азимутального потока изучаемых частиц. Необходимость в таком исследовании продиктована нестабильной работой нескольких секторов многопроволочных камер в сеансе 2012 года, что приводило к невозможности качественной реконструкции импульса треков заряженных частиц в одном (реже в двух) из шести сегментов. Эта нестабильность связана с двумя основными эффектами: — во первых, со старением трековых камер, а, во вторых, с высокой множественностью частиц при столкновении ядер

золота, приводящей к повышенным загрузкам трековых детекторов, и, как следствие, к необходимости временно сбрасывать напряжение на тех камерах, в которых возникали перегрузки по току.

Изучение систематики за счет ограниченного азимутального аксептанса было выполнено для протонов, поскольку их выделение и анализ наиболее прост в данном диапазоне энергий. Из имеющейся в нашем распоряжении месячной статистики были отобраны данные, в которых все 24 камеры (4 камеры в 6-ти секторах) работали в штатном режиме и, таким образом, восстановление импульса с последующей идентификацией частицы были выполнены с высоким разрешением во всех шести секторах установки HADES. Далее, искусственно создавались комбинации, в которых один или несколько трековых секторов исключались из рассмотрения, путем игнорирования вклада от соответствующих частиц при анализе данных. Интересно, что в результате был обнаружен заметный вклад в систематическую ошибку для гармоник v3 и, особенно, для v4.

Группа ИЯИ РАН продолжила в 2015г. участие в создании новой детекторной системы установки ХАДЕС - электромагнитного калориметра. Этот калориметр должен заменить существующий предливневый детектор установки ХАДЕС, который перекрывает область полярных углов 18-45 градусов и полный азимутальный угол. Поэтому, геометрия электромагнитного калориметра повторяет геометрию предливневого детектора (рис.1.13, слева) и также состоит из 6 секторов, каждый из которых собран из 163 модулей. Работа ведется в соответствие с техническим проектом, утвержденным ФАИР в 2014г. (рис.1.15, справа). Ранее планировалось, что данный электромагнитный калориметр будет использоваться как одна из детекторных систем ХАДЕСа в экспериментах на ускорителе SIS100 на ФАИР. Однако, в связи со сдвижкой планов сооружения и ввода в эксплуатацию ускорительного комплекса ФАИР, электромагнитный калориметр планируется собрать в течение 2015-2017гг и начать физические эксперименты с использованием этого калориметра на пучках действующего ускорителя SIS18 в GSI уже 2018 г.



Рисунок 1.15- Слева – конструкция электромагнитного калориметра установки ХАДЕС. Справа – титульная страница утвержденного технического проекта калориметра

В соответствие с этим проектом ИЯИ отвечает за подготовку основных элементов модулей электромагнитного калориметра. Еще в 2008г. группа ИЯИ РАН предложила использовать в качестве основных элементов имеющиеся модули, использованного ранее калориметра установки OPAL в ЦЕРНе. Более 1200 таких модулей были отобраны силами ИЯИ РАН в ЦЕРНе и доставлены в ГСИ. Последняя партия модулей – 260 штук – была отобрана и доставлена в ГСИ из ЦЕРНа в начале 2015г. Коллаборация ХАДЕС оценила это как "in-kind" вклад ИЯИ РАН в данный проект на сумму 1 млн. евро.

Радиатором модуля калориметра является блок свинцового стекла марки CEREN 25 с размерами 92х92х420 мм. В качестве фотодетектора модуля OPAL калориметра использовался триод, который по своим параметрам не удовлетворяет требованиям подходит электромагнитного калориметра ХАДЕС. Поэтому, каждый модуль необходимо вскрыть, вытащить из корпуса блок свинцового стекла с приклеенным триодом, отсоединить триод, отполировать торцевую часть, заменить отражатель из майлара на отражатель из тайвека, корпус модуля отрезать под необходимый размер (рис.4). К концу 2015г. силами группы ИЯИ РАН и ИТЭФ полностью реконструированы вновь доставленные из ЦЕРНа 260 модулей, необходимых для того чтобы полностью укомплектовать для сборки все 6 секторов калориметра.



Рисунок 1.16 - Блок свинцового стекла модуля калориметра с прикленным фототриодом, после его извлечения из корпуса модуля (слева). Отдельные компоненты модуля после его полной разборки (справа)

Параллельно начата сборка модулей (совместно с группой из Чехии) с новыми фотоумножителями и их тестирование в ГСИ на космике на специальном стенде, созданном ИЯИ РАН, позволяющем тестировать одновременно 5 модулей калориметра (рис.5).Для системы сбора данных для этого стенда группой ИЯИ РАН была разработана система с использованием 16 канального модуля CAEN DT-5742 для считывания амплитуды сигналов с модулей калориметра, которая была улучшена в 2015г. В качестве фотоумножителей в калориметре будут использоваться около 600, имеющиеся в ГСИ полуторадюймовые фотоумножители ЕМИ 9003, и трехдюймовые фотоумножители Нататаtsu R6091. Полученные ранее в сеансе на пучке «меченных» гамма квантов на электронном ускорителе в Майнце (Германия) энергетические разрешения модулей электромагнитного калориметра в зависимости от энергии гамма квантов для этих выбранных двух типов фотоумножителей показаны на рис.5, справа. Здесь же приведены значения стохастического члена в энергетическом разрешении. Видно, что наилучшее разрешение получено для трехдюймовых ФЭУ Нататаtsu R6091. Получена хорошая линейность отклика для модулей с ФЭУ ЕМІ 9903КВ и Нататаtsu R6091.



Рисунок 1.17 - Слева - схема общего вида электромагнитного калориметра установки ХАДЕС; справа - Зависимость энергетического разрешения модуля калориметра от энергии

гамма квантов

В 2015г. группа ИЯИ предложила систему для калибровки и мониторинга долговременной стабильности модулей электромагнитного калориметра на основе стабилизированного генератора световых импульсов.

Блок схема устройства представлена на рисунке 6. Небольшая часть энергии световой вспышки, излучаемой светодиодом, контролируется встроенным фотодиодом. Энергия импульса выходного тока фотодиода преобразуется в цифровой код зарядо-чувствительным преобразователем QDC. Основная часть энергии световой вспышки через оптический разъем и оптическое волокно выводится на контролируемый фотодетектор. Работой светодиода управляют генератор коротких импульсов (Pulse generator) и драйвер светодиода (LED driver). Устройство работает с фиксированной длительностью световой вспышки.



Рисунок 1.18 - Блок схема генератора стабилизированных световых импульсов.

Такой генератор световых импульсов уже успешно используется в электромагнитном калориметре установки COMPASS и в переднем адронном калориметре установки NA61 в ЦЕРНе.

Генератор световых импульсов обеспечивает стабильность амплитуды световой вспышки на уровне 1% и амплитуда не зависит от температуры окружающей среды. Это видно из рисунка 7, где показана долговременная стабильность генератора, используемог в переднем адронном калориметре установки NA61.



Рисунок 1.19 - Слева – зависимость амплитуды светодиода от времени (в течение примерно 30 часов). Справа – распределение по амплитуде световой вспышки, полученное в течение измерений

Управление амплитудой световой вспышки осуществляется общим системным модулем (контроллером) (Рисунок 1.8). Системный модуль имеет максимальное количество обслуживаемых элементов, равное 127, встроенный источник питания ~220V(+15%/-20%), W 70, линии связи с компьютером USB-2.0; RS-232, Ethernet. Внутренняя последовательная линия связи осуществляется по протоколу RS485 (100 кбит/с).



Рисунок 1.20 - Фото системного модуля, управляющего элементами электронной схемы калориметра.

Для всего Hades ECAL необходимо изготовить 10-20 таких генераторов.

Программное обеспечение для контроля светодиодных амплитуд и частот уже имеется для 44 светодиодных генераторов, связанных в одну сетью (для переднего адронного калориметра в экспериментеNA61). Оно написано в Java-script и совместимо с операционными системами Linux/Windows и может быть достаточно просто быть адаптировано под любые другие платформы для медленного контроля.

Данный проект системы для калибровки и мониторинга долговременной стабильности модулей ECAL был доложен и обсуждался на совещании коллаборации в октябре 2015г. в Лиссабоне. В начале 2016г. планируется проведение тестов этого генератора с модулями электромагнитного калориметра группой ИЯИ в ГСИ.

1.2 Цитируемая литература.

[1] J. C. Dunlop, M. A. Lisa, and P. Sorensen, Constituent quark scaling violation due to baryon number transport, Phys. Rev. C 84, 044914 (2011)

[2] V. P. Konchakovski et. al., Rise of azimuthal anisotropies as a signature of the quarkgluon plasma in relativistic heavy-ion collisions, Phys. Rev. C **85**, 011902(R) 2012.

[3] Berndt Müller, PHENIX and the quest for the quark–gluon plasma, Prog. Theor. Exp. Phys. 2015, 03A103

[4] G. Odyniec, Beam Energy Scan program at RHIC-experimental approach to the QCD Phase Diagram, Physics of Atomic Nuclei, Volume 75, Issue 5, pp 602-606, 2012.

[5] J. -Y. Ollitrault, Reconstructing azimuthal distributions in nucleus-nucleus collisions, nucl-ex/9711003.

[6] V. Zinyuk et al. Azimuthal Emission Patterns of K + and of K– Mesons in Ni+Ni Collisions near the Strangeness Production Threshold, Phys. Rev. C 90, 025210 (2014)

Список публикаций коллаборации HADES с участием соавторов группы ИЯИ РАН за 2015:

- Partial wave analysis of the reaction p(3.5GeV) +p →pK+Ato search for the "ppK-" bound state, HADES Collaboration (G. Agakishiev,...M.Golubeva, F.Guber, A.Ivashkin, T.Karavicheva, A.Kurepin, A.Lebedev,A.Reshetin, A.Sadovsky, ... et al) Physics Letters B 742 (2015) 242–248
- Subthreshold Ξ- Production in Collisions of p(3.5 GeV)+Nb. HADES Collaboration (G. Agakishiev,...M.Golubeva, F.Guber, A.Ivashkin, T.Karavicheva, A.Kurepin, A.Lebedev,A.Reshetin, A.Sadovsky... et al), arXiv:1501.03894 [nucl-ex], Phys.Rev.Lett. 114 (2015) 21, 212301, DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.212301
- Investigating hadronic resonances in pp interactions with HADES. HADES Collaboration (Witold Przygoda,...M.Golubeva, F.Guber, A.Ivashkin, T.Karavicheva, A.Kurepin, A.Lebedev,A.Reshetin, A.Sadovsky... et al.).. EPJ Web Conf. 97 (2015) 00024.
- Highlights of Resonance Measurements With HADES. HADES Collaboration (Eliane Epple,...M.Golubeva, F.Guber, A.Ivashkin, T.Karavicheva, A.Kurepin, A.Lebedev, A.Reshetin, A.Sadovsky... et al.). EPJ Web Conf. 97 (2015) 00015.
- K*(892)⁺ production in proton-proton collisions at *E*beam=3.5 GeV HADES Collaboration (G. Agakishiev,...M.Golubeva, F.Guber, A.Ivashkin, T.Karavicheva, A.Kurepin, A.Lebedev, A.Reshetin, A.Sadovsky... *et al.*). arXiv:1505.06184 [nucl-ex], Phys. Rev. C 92, 024903 (2015).

6. Verification of Electromagnetic Calorimeter Concept for the HADES spectrometer

O. Svoboda ...M. Golubeva, F. Guber, A. Ivashkin (Moscow, INR) et al.. Phys. Conf. Ser. 599 (2015) 1, 012026

7. Study of the quasi-free $np \rightarrow np\pi + \pi^-$ reaction with a deuterium beam at 1.25 GeV/nucleon HADES Collaboration (G. Agakishiev,...M.Golubeva, F.Guber, A.Ivashkin, T.Karavicheva, A.Kurepin, A.Reshetin, A.Sadovsky... et al), arXiv:1503.04013 [nucl-ex]

Доклады на конференциях, школах и совещаниях

1). A.Sadovsky "Study of azimuthal flow anisotropy of protons, deuterons and tritons produced in Au+Au collisions at $\sqrt{\text{sNN}=2.4}$ GeV", The 17th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, Moscow State University, Moscow, 20 – 26 August, 2015

2). A.Sadovsky "Some updates on reaction plane based azimuthal flow analysis", HADES Collaboration Meeting XXIX, 19/03/2015, Darmstadt

3). F.Guber, A.Ivashkin, S.Morozov, O.Petukhov Proposal for the ECAL LED monitoring system HADES Collaboration Meeting XXX, 09/10/2015, Lisbon

4). A.Sadovsky "Status of reaction plane based azimuthal flow analysis of charged hadrons" HADES Collaboration Meeting XXX, 09/10/2015, Lisbon

1.3 Исследование рождения адронов в адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействиях на ускорителе SPS в ЦЕРН (эксперимент NA-61)

Руководитель : зав. ЛРЯФ, доктор физ- мат. наук А.Б. Курепин

1.3 Введение. Актуальность, цели и программа исследований рождения адронов в адронядерных и ядро-ядерных взаимодействиях в эксперименте NA61(SHINE) на ускорителе SPS

в ЦЕРН

Одной из основных задач эксперимента NA61(SHINE) в ЦЕРНе является поиск критической точки сильновзаимодействующей ядерной материи и детальное исследование начала деконфаймента, т.е. поиск и исследование перехода между двумя фазами сильно взаимодействующей материи [1]. Ряд моделей сильных взаимодействий предсказывают резкую фазовую границу (фазовый переход 1-го порядка) между адронным газом и кваркглюонной плазмой, заканчивающуюся в критической точке (Рисунок 1.1). Поиск и исследование перехода между двумя фазами сильно взаимодействующей материи ведется также в настоящее время на ускорителе RHIC (США) и планируется на вновь создаваемых ускорительных комплексах NICA в Дубне и FAIR в Дармштадте, Германия. Области фазовой диаграммы, которые исследуются (или будут исследоваться) в этих экспериментах, также показаны на рисунке 1.21



Рисунок 1.21 - Переход между двумя фазами сильно взаимодействующей материи: адронный газ и кварк-глюонная плазма

Точное положение критической точки на фазовой плоскости неизвестно. Поэтому в эксперименте NA61(SHINE) ее положение на фазовой плоскости предлагается искать, сканируя эту плоскость посредством реакций с различными ядрами при энергиях налетающих ядер в диапазоне от 13 до 158 ГэВ на нуклон (Рисунок 1.2, слева).



Рисунок 1.22 - Слева - область сканирования на фазовой плоскости в программе исследований эксперимента NA61(SHINE). Справа - ожидаемое увеличение флуктуаций множественности, среднего поперечного импульса и т.д. для системы с вымораживанием вблизи критической точки

Первые экспериментальные свидетельства наступления начала деконфайнмента были получены в эксперименте NA49 на ускорителе SPS в ЦЕРНе [2, 3]. Они основаны на наблюдаемых свойствах адронов, измеренных в центральных Pb + Pb столкновениях. Было показано, что наблюдается сильная энергетическая зависимость для измеренных выходов и

отношений выходов заряженных частиц при импульсе налетающего пучка 30А ГэВ / с (или области энергии √Е_{NN} ≈7,6 ГэВ), которые авторы называют как рог, излом и Дэйл [3], и что эти зависимости согласуются с предсказаниями для начала деконфайнмента.

Новые результаты, полученные на RHIC для центральных Au + Au столкновений в эксперименте при сканировании энергии пучка [4] показывают хорошее согласие с NA49 измерениями при энергиях начала деконфаймента. Однако, получить экспериментальные данные с хорошей статистикой на RHIC BES ниже 30 ГэВ/с на нуклон достаточно трудно изза низкой светимости встречных пучков ядер золота, также в этом эксперименте невозможно объективно выделить центральные столкновения. Поэтому сейчас стало очевидно, что программу NA61/SHINE необходимо расширить с включением исследования столкновения ядер свинца Pb + Pb.

Результаты, полученные на LHC при энергии 2,76 ТэВ для центральных Pb + Pb столкновений [5] показывают, что быстрое изменение энергетической зависимости свойств адронов наблюдается только при низких энергиях SPS. Это согласуется с интерпретацией наблюдаемых в NA49 структур как наступление начала деконфайнмента. Выше этой энергии начала деконфаймента наблюдается только плавное изменение свойств кварк-глюонной плазмы.

Эксперимент NA61(SHINE) является преемником NA49 и дальнейшим его развитием. Как уже отмечалось, главной экспериментальной задачей этого эксперимента является изучение фазовых переходов и поиск критической точки посредством измерения наблюдаемых, чувствительных к исследуемым эффектам. Такими наблюдаемыми являются множественность рождения и спектральные характеристики вторичных адронов, включая странные барионы/антибарионы, и, в особенности, пособытийные флуктуации некоторых физических величин, таких как множественность, заряды, поперечные импульсы, отношения выходов странных и нестранных мезонов.

Полученные ранее данные при максимальных энергиях AGS и SPS показывают, что отношение выходов пионов и странных адронов практически не зависит от размера сталкивающихся ядер для центральных столкновений ядер с $A \ge 30$ - 40. Это означает, что для средних величин простые термодинамические модели могут быть использованы уже для центральных Ar + Ca столкновений в области энергией SPS. С другой стороны, длительность стадии расширения с чисто адронными степенями свободы возрастает с увеличением массы сталкивающихся ядер. Следовательно, температуры теплового и химического вымораживания уменьшаются с увеличением размера сталкивающихся ядер (Рисунок 1.18 в [1]). Материя вымерзает достаточно далеко от границы фазового перехода. Чтобы свести к

минимуму роль адронного перерассеяния столкновения малых ядер с размером порядка ядра аргона кажутся оптимальными для исследования свойств перехода между кварк-глюонной плазмой и адронным газом. Поэтому особое значение в этой программе имеют измерения для центральных Ar + Ca столкновений при значениях импульса пучка 13, 20, 30, 40, 80 и 158 ГэВ/с на нуклон, которые были проведены в начале 2015 г. и сейчас проводится анализ этих данных. Исследования реакций Xe + La и Pb + Pb запланированы на 2016 - 2018 г.г., как показано на диаграмме (Рисунок 1.3).



beam momentum [A GeV/c]

Рисунок 1.23 - Диаграмма набора данных для ионной программы эксперимента NA61/SHINE. Зелеными квадратами показаны уже законченные измерения, красными - программа измерений на период 2016-2018 г.г. Серыми квадратами показаны планируемые измерения Pb + Pb, но которые еще не утверждены программным комитетом ЦЕРНа. [6]

Как уже отмечалось, резкое увеличение величины флуктуаций является отличительной чертой физических явлений вблизи критических областей (Рисунок 1.2, справа). Поэтому основное внимание к физической программе исследований эксперимента NA61 уделяется именно измерению величины флуктуаций данной наблюдаемой от события к событию в зависиости от центральности ядро-ядерного взаимодействия. Для определения центральности взаимодействия в эксперименте используется передний адронный калориметр фрагментов, который был разработан и изготовлен в Институте ядерных исследований РАН. Основная активность группы ИЯИ РАН в данном проекте связана с созданием адронного калориметра высокого разрешения, его использованием в физических экспериментах NA61 и

участием в анализе экспериментальных данных с получением конечных физических результатов.

Другими важными направлениями экспериментальных работ, которые коллаборации NA61 ведет на пучках SPS, являются:

1.3.1 Исследование распределений заряженных частиц с большим поперечным импульсом в протон-протонных и протон-ядерных взаимодействиях.

Наблюдение подавления выхода адронов с большим поперечным импульсом в Au+Au столкновениях (гашение струй в ядерной материи с высокой плотностью) - одно из самых важных открытий на RHIC. Исследования энергетической зависимости этого эффекта при энергиях SPS необходимы для его окончательного толкования. ЦЕРН имеет уникальные возможности для внесения ключевого вклада с помощью измерений на SPS и LHC.

1.3.2 Измерения сечений выхода заряженных адронов для нейтринной физики.

Для определения потоков нейтрино в эксперименте T2K и минимизации систематических ошибок в определение параметров смешивания, в эксперименте NA61 измерены с высокой точностью выходы заряженных пионов и каонов в реакции р + С при энергии налетающих протонов 31 ГэВ. Результаты, полученные для выходов пионов в пилотном экспериментах 2007 и 2009 годов, опубликованы.

1.3.3 Измерения сечений в адрон-ядерных реакциях для физики космических лучей.

Обсерватория Пьера Оже и эксперимент КАЅКАDЕ анализируют широкие атмосферные ливни с целью получения информации об источниках происхождения космического излучения. В эксперименте NA61 выполнены измерения сечений образования заряженных частиц при взаимодействии пионов с ядрами углерода при энергии пионов 158 и 350 ГэВ. Эти сечения необходимы для реконструкции событий космического излучения. Результаты NA61 помогут улучшить разрешение экспериментов на космических лучах, необходимые для определения элементного состава космического излучения при высоких энергиях.

В заключение отметим, что NA61/SHINE начал детальное сканирование в двумерном пространстве параметров: размер сталкивающихся ядер (p + p, p + Pb, Be + Be, Ar +Sc, Xe + La, Pb + Pb) и энергия столкновений (13A, 20A, 30A, 40A, 80A, 158A ГэВ/с) в 2009 г. К настоящему времени выполнено сканирование по энергии для реакций со вторичными пучками протонов и ядер Ве, полученные путем фрагментации ядер свинца на бериллиевой мишени и сформированные каналом транспортировки установки NA61. В 2015г. проведены измерения выходов частиц в реакции Ar + Sc в диапазоне энергий 13 – 150 АГэВ. В течение 2016 – 2018г.г. планируются провести эксперименты на первичных пучках ядер Xe и свинца.

- 1.3.4 Основные направления работы сотрудников Института ядерных исследований РАН в 2015 году в эксперименте NA61, ЦЕРН.
- 1. Участие в подготовке переднего адронного калориметра к сеансам по измерению выходов частиц, обеспечивала работоспособность калориметра и контроль качества данных во время сеансов 2015г., участвовала в рабочих сменах NA61 во время этих сеансов.
- Модернизация переднего адронного калориметра для обеспечения его работы в условиях высоких загрузок и большом динамическом диапазоне измеряемых энергий спектаторов в планируемых экспериментах на прямых пучках тяжелых ионов.
- Проведение Монте Карло расчетов отклика калориметра для адронов и тяжелых ионов с энергией в диапазоне 13 - 150 ГэВ, включая расчеты энергетического разрешения и линейности отклика переднего адронного калориметра
- 4. Проведение измерений отклика модуля калориметра с электроникой считывания, разработанной для модулей калориметра СВМ в рамках подписанного в 2015г. соглашения о сотрудничестве между коллаборациями NA61 и СВМ и ИЯИ по разработке и тестированию модулей переднего адронного калориметра.
- 5. Проведение калибровки переднего адронного калориметра на пучках мюонов и адронов.
- 6. Участие в анализе данных, полученных для реакций Be + Be, Ar+Sc и Pb+Pb.
- 7. Разработка программы для анализа данных, полученных на адронном калориметре.
- 8. Участие в рабочих совещаниях NA61/SHINE и выступление с докладами на международных конференциях.
- 9. Подготовка публикаций.
 - 1.3.5 Основные результаты Института ядерных исследований РАН, полученные в 2015

году

- Группа ИЯИ принимала участие в подготовке переднего адронного калориметра к сеансам по измерению выходов частиц в реакции сеанс по набору данных в реакции Ar+Sc при энергия ускоренных в SPS ядtр аргона 13А, 19А, 30А, 40А, 75А и 150А ГэВ/с, который был проведен в феврале-апреле 2015 г. и в реакции p+Pb взаимодействий при 158 ГэВ/с в октябре 2015г. Группа ИЯИ обеспечивала работоспособность калориметра и контроль качества данных во время сеанса, участвовала в рабочих сменах NA61 во время этих сеансов.
- 2. Разработана конструкция и изготовлен дополнительный короткий модуль калориметра для улучшения отклика калориметра в экспериментах с более тяжелыми ядрами. Он

представляет собой короткий (2 секции) модуль, который аналогичен по своей структуре центральным модулям адронного калориметра, но имеет некоторые особенности, связанные с его использованием в эксперименте.

- 3. Проведены Монте Карло расчеты утечек адронного ливня во всем калориметре, возникающих при прохождении адронов и тяжелых ионов с энергией в диапазоне 13 -150 ГэВ через калориметр, а также энергетического разрешения и линейности отклика переднего адронного калориметра без дополнительного модуля и с учетом дополнительного модуля, который установлен непосредственно в пучке перед адронным калориметром.
- 4. Для обеспечения работы этого короткого модуля в условиях высоких загрузок и большого динамического диапазона в планируемых экспериментах на прямых пучках тяжелых ионов, в нем были использованы фотодиоды MPPC (Hamamatsu), с более быстрым временем восстановления, вместо используемых в настоящее время фотодиоды MAPD-3A (Zecotec). Также была произведена замена используемых в настоящее время в одном из центральных модулей лавинных фотодетекторов MAPD-3A на более быстрые фотодетекторы MPPC. В этих же двух модулях проведена модернизация аналоговой электроники.
- 5. ИЯИ участвует в разработке и изготовлении аналогичного переднего адронного калориметра фрагментов для эксперимента CBM, который готовится на ускорительном комплексе SIS100 ФАИР в Дармштадте. В 2015г. было подписано соглашение о сотрудничестве между коллаборациями NA61 и CBM и ИЯИ по сотрудничеству в разработке и тестированию модулей переднего адронного калориметра. В рамках этого сотрудничества, во время тестового протонного сеанса в октябре 2015г.на установке NA61, группой ИЯИ были проведены измерения отклика модуля калориметра с электроникой считывания, разработанной для модулей калориметра CBM.
- 6. Проведены тестовые измерения отклика модуля калориметра с электроникой считывания на базе модуля CAEN на базе чипа DRS4.

В настоящее время на установке NA61 готовится модернизация электроники считывания на базе этого чипа многих детекторов установки, включая и адронный калориметр. Поэтому, полученные результаты позволят подготовить программное обеспечение и разработать метод анализа данных с калориметра после такой модернизации.

 Выполнена калибровка переднего адронного калориметра с дополнительным коротким модулем на пучках мюонов и адронов.

- 8. Группа ИЯИ участвовала в разработке и подготовке нового Меморандума с предложением по проведению скана по энергии для реакции Pb+Pb, который был представлен для рассмотрения в SPSC. Проведены Монте Карло расчеты точности определения угла плоскости реакции для измерения потоков частиц в Pb+Pb взаимодействиях с помощью переднего адронного калориметра в эксперименте на установке NA61.
- 9. Группа ИЯИ участвовала в анализе данных, полученных для реакции Be + Be, Ar+Sc и Pb+Pb.
- 10. Разработана программа для коррекции амплитудных распределений сигналов в секциях модулей калориметра, вызванных нестабильностью работы считывающей электроники калориметра.
- Группа ИЯИ принимала участие в рабочих совещаниях NA61(SHINE) и выступала с докладами при обсуждении полученных результатов и координации работ на установке. Были представлены доклады на международных конференциях.

1.3.6 Участие ИЯИ РАН в работах по модернизации экспериментальной установки и ее подготовке к физическим сеансам в 2015г.

Выведенный пучок ускорителя SPS транспортируется приблизительно на расстояние 1 км от ускорителя с помощью отклоняющих и фокусирующих магнитов и затем разделяется на 3 пучка. Один из этих пучков направляется на мишень T2, на которой рождаются вторичные частицы. Эти вторичные частицы транспортируются далее каналом вторичных частиц H2 в экспериментальный зал (EHN1), где расположена экспериментальная установка NA61/SHINE. Расстояние установки NA61/SHINE от мишени T2 составляет 535 м. Канал H2 может отбирать и транспортировать вторичные пучки заряженных частиц в широком диапазоне импульсов от 9 GeV/c до максимальной энергии ускорителя 400 GeV/c, а также может транспортировать пучки протонов и ядер Ar, Xe и Pb, а также пучок легких ядер Be, полученного в результате фрагментации пучка ядер свинца на бериллиевой мишени T2.

1.3.6.1 Экспериментальная установка NA61

Эксперимент NA61/SHINE является единственным оставшимся экспериментом на SPS в ЦЕРНе, который имеет утвержденную в ЦЕРНе программу по исследованиям ядро-ядерных взаимодействий при энергиях 13-158 ГэВ на нуклон [1-3].

Экспериментальная установка NA61/SHINE [4] - это существенно модернизированная установка предыдущего эксперимента NA49 [5]. Схема установки показана на Рисунок 1.24 и 25. На вставке рисунка 1.24 показано расположение пучковых детекторов.



Рисунок 1.24 - Схематический вид установки NA61/SHINE в изометрии



Рисунок 1.25 - Схема экспериментальной установки NA61/SHINE (вид сверху)

Установка состоит из ряда пучковых сцинтилляционных детекторов (S1 – S5, V0, V1, V1'), черенковских (C1, C2) детекторов и пропорциональных камер (BPD -1, 2 и 3), расположенных в области мишени. Эти детекторы используются для формирования триггера, стартового сигнала для время-пролетной системы и контроля положения пучка на мишени. Для идентификации и измерения импульсов вторичных заряженных частиц, образовавшихся в ядро-ядерных взаимодействиях, используется магнитный спектрометр, основными компонентами которого являются:

- два сверхпроводящих дипольных магнита с вертикальным зазором 1 метр, обеспечивающие максимальную жесткость пучка 9 Тм;

- две время-проекционные камеры (VTPC-1 и VTPC-2), размещенные в зазорах дипольных магнитов. Каждая из этих камер имеет длину 250 см, ширину 280 см и высоту 98 см. Эти камеры используются для реконструкции вершины взаимодействия, определения импульса частиц и идентификации типа частиц путем измерения ионизационных потерь в газе детекторов;

- две большие время-проекционные камеры (МТРС) с размерами 390 см х 390 см х 110 см, которые располагаются за дипольными магнитами вне области магнитного поля симметрично относительно оси пучка. Они используются дополнительно для измерения импульсов частиц высоких энергий и идентификации типа частиц по их ионизационным потерям;

- еще одна небольшая время-проекционная камера (GAP TPC) с размерами 30 см х 81.5 см х 70 см располагается в области оси пучка, перекрывая область, в которой времяпроекционные камеры VTPC-1 и VTPC-2 нечувствительны к заряженным частицам из-за высокой плотности траекторий частиц. Эта камера обеспечивает дополнительные координаты для высокоэнергетичных треков заряженных частиц при экстраполяции их к вершине взаимодействия;

- два время-пролетных сцинтилляционных годоскопа (TOF-L и TOF-R), по 891 сцинтилляционному детектору в каждом годоскопе. Они располагаются сразу за MTPC, симметрично по обе стороны от оси пучка. Эти годоскопы используются для идентификации заряженных частиц по времени пролета и обеспечивают временное разрешение порядка 60 пикосекунд при исследованиях ядро-ядерных взаимодействий и порядка 120 пикосекунд – в протон - протонных взаимодействиях;

Перечисленные выше элементы установки NA61/SHINE – время-проекционные камеры, магниты и время-пролетные годоскопы TOF-L и TOF-R ранее использовались в NA49 и подробно описаны в работе [5].

В процессе модернизации экспериментальной установки были добавлены несколько детекторных систем, в частности:

- создан новый передний сцинтилляционный время-пролетный годоскоп – TOF-F. Он состоит из 80 вертикальных сцинтилляционных пластин, свет с которых считывается с торцов двумя фотоумножителями, Он и перекрывает область между годоскопами TOF-L и TOF-R для увеличения аксептанса установки NA61. Этот годоскоп использовался в экспериментах по исследованию выходов пионов и каонов в реакции p+C при энергии

налетающих протонов 30 ГэВ для эксперимента Т2К [6,7]. ТОF-F обеспечивал временное разрешение порядка 110 пикосекунд в этом эксперименте;

- изготовлены два специальных радиационно прозрачных двухконтурных гелиевых ионопровода, которые были установлены по оси пучка внутри VTPC-1 и VTPC-2 установки NA61г.. Это позволяет существенно (примерно в 10 раз) уменьшить загрузку трековых детекторов экспериментальной установки от дельта электронов, воникающих при взаимодействии ядер с газом в ионопроводе. В установке NA49 такого ионопровода не было и дельта-электроны от взаимодействия ядер пучка с воздухом попадали в чувствительный объем камер, увеличивая тем самым их фоновую загрузку;

- кроме того, в NA61/SHINE была модернизирована электроника считывания с времяпроекционных камер, что позволило увеличить скорость считывания до 70 - 80 событий в секунду, что почти на порядок превышает скорость считывания в эксперименте NA49;

- создан новый передний адронный калориметр фрагментов (PSD – Projectile Spectator Detector). Впервые он был использован в эксперименте Be+Be в 2011 г. Концепция калориметра, его разработка и изготовление, разработка и изготовление электроники, системы контроля калориметра, а также калибровка и анализ данных с калориметра были полностью выполнены силами ИЯИ РАН [8-10]. Этот калориметр измеряет энергию спектаторов с хорошим энергетическим разрешением и используется в эксперименте для отбора событий по центральности взаимодействия на триггерном уровне. Кроме того, поперечная сегментация калориметра позволяет использовать его для определения угла плоскости реакции в столкновениях ядер.

В заключение этой части отметим, что экспериментальная установка NA61/SHINE имеет следующие основные характеристики:

- достаточно большой аксептанс ~50%;

- высокое разрешение по импульсу $\sigma(p)/p2 \approx 10^{-4} (\text{GeV/c})^{-1}$ (при B=9 T·m);
- разрешение по времени пролета для ToF-L/R: σ(t)≈60 ps; для ToF-F: σ(t)≈110 ps;
- хорошую идентификацию по ионизационным потерям:

 $\sigma(dE/dx)/\langle dE/dx \rangle \approx 0.04$; $\sigma(m_{inv}) \approx 5$ MeV;

- высокую эффективность детектирования заряженных частиц: > 95%;
- скорость считывания событий ~70 событий/sec.

1.3.6.2 Передний адронный калориметр фрагментов установки NA61

Передний адронный калориметра фрагментов – PSD (Projectile Spectator Detector), разработанный и изготовленный группой ИЯИ РАН, является новой детекторной системой, созданной в процессе модернизации экспериментальной установки NA61/SHINE [8-10].

Одна из основных задач этого калориметра заключается в определении центральности ядро-ядерных взаимодействий на триггерном уровне с достаточно хорошей точностью. Для этого необходимо иметь хорошее энергетическое разрешение калориметра порядка

$$\frac{\sigma_E}{E} < \frac{60\%}{\sqrt{E(GeV)}}$$

где Е – кинетическая энергия спектаторов, измеренная в ГэВ.

Другая задача, это определение ориентации плоскости реакции с достаточно хорошей точностью, что необходимо для проведения исследований анизотропии азимутальных потоков частиц, образующихся в ядро-ядерных взаимодействиях.

Для этого калориметр должен иметь достаточно большой поперечный размер из-за широкого распределения спектаторов на входной поверхности калориметра, обусловленного фермиевскм распределением импульсов нуклонов в ядре. Как показывают результаты моделирования калориметр должен иметь поперечный размер порядка 120 х 120 см² при минимальной энергии налетающих ядер 13 АГэВ и при минимально возможном расстоянии калориметра от мишени 17м. Необходимо также обеспечить хорошую однородность энергетического разрешения по всей поверхности калориметра и возможность пособытийного измерения плоскости реакции в ядро-ядерных взаимодействиях.

1.3.6.2.1 Конструкция калориметра

Для выполнения вышеизложенных требований была выбрана модульная структура калориметра (Рисунок 1.1.3, слева), которая обеспечивает поперечную однородность энергетического разрешения калориметра и возможность его использования для измерения плоскости реакции. Калориметр состоит из 44 модулей, которые перекрывают поперечную область 120x120 см². Центральная часть калориметра состоит из 16 маленьких модулей с поперечным размером 10x10 см². Внешняя часть калориметра состоит из 28 больших модулей с поперечными размерами 20x20 см². Такая поперечная сегментация уменьшает загрузку отдельных центральных модулей и является наиболее оптимальной для обеспечения отбора событий по центральности взаимодействий и для реконструкции плоскости реакции.



Рисунок 1.26 - Схема переднего адронного калориметра эксперимента NA61 (слева) и схема конструкции отдельного модуля (справа)

С целью получения необходимого энергетического разрешения каждый модуль собран из 60 слоев свинца с расположенными между ними сцинтилляционными пластинами. Схема модуля показана рис.26, справа. Толщина каждой свинцовой пластины составляет 16 мм, а толщина сцинтиллятора 4 мм. При таком соотношении толщин свинца и сцинтиллятора 4:1 выполняется условие так называемой компенсации, при котором вклад электромагнитной компоненты в адронном ливне равен вкладу от адронного ливня. При этом, как известно [11,12], константный член b в выражении для энергетического разрешения $a/\sqrt{E}(\Gamma \Rightarrow B)$ + b должен быть равен нулю, а величина стохастического члена должна составлять порядка 55%.

Большие и маленькие модули имеют одинаковую структуру. Все 60 слоев свинцовых и сцинтилляционных пластин каждого модуля укладываются в короб из нержавеющей стали с толщиной стенки 0,5 мм и стягиваются стальной лентой с той же толщиной. Эта лента приваривается точечной сваркой к стенке короба. Полная длина каждого из модулей соответствует 5,7 ядерным длинам взаимодействия. Свет с каждой сцинтилляционной пластины собирается с помощью спектросмещающего оптоволокна Кuraray Y11, вклеенного в круглую канавку глубиной 1.2 мм на лицевой поверхности сцинтилляционной пластины. Далее, все выведенные из сцинтилляторов 60 оптоволокон укладываются параллельно на верхней поверхности модуля. Оптоволокна с каждых 6 последовательно расположенных сцинтилляционных пластин вклеиваются в отдельные оптические разъемы, которые размещаются на панели, установленной в конце короба модуля. Таким образом, на этой панели устанавливаются по 10 оптических разъемов для считывания света с 10 секций модуля, каждая из которых состоит из 6 слоев свинцовых и сцинтилляционных пластин.

Такая продольная сегментация модуля на 10 секций обеспечивает равномерную эффективность собирания света по длине модуля. На задней панели также размещен дополнительный оптический разъем с установленным на нем светодиодом. Световые импульсы, испускаемые светодиодом, используются для контроля работы фотодетекторов. Свет со светодиода подводится к лавинным фотодиодам десятью оптическими волокнами, один конец которых вклеен в разъем с установленным на нем светодиодом, а другой конец в соответствующий оптический разъем фотодетектора вместе с шестью спектросмещающими волокнами от сцинтилляционных пластин калориметра.

Для считывания света в каждом модуле используются 10 лавинных фотодетекторов, установленных на оптических разъемах.

1.3.6.2.2 Фотодетекторы калориметра. Тестирование новых фотодиодов для центрального модуля калориметра группой ИЯИ в 2015г.

Для детектирования света со сцинтилляторов с каждой из 10 секций продольно сегментированного модуля калориметра используются 10 отдельных кремниевых полупроводниковых микро-пиксельных лавинных фотодиододв, MAPD-3A, производства Zecotek Photonics Inc (Сингапур) [8,9]. Во время разработки и создания данного калориметра (2006 – 2011гг), это был единственный тип фотодиода, который удовлетворял требованиям, предъявляемым к фотодетекторам калориметра. Данный тип фотодиодов имеет высокую плотность пикселей порядка 15000 на квадратный миллиметр, или порядка 135000 пикселей для фотодиода с чувствительной областью 3х3 мм². Выбор этих фотодиодов для данного калориметра обусловлен, в первую очередь, большим динамическим диапазоном, необходимым для калориметрии, а также такими их свойствами, как высокое внутреннее усиление, высокая квантовая эффективность детектирования фотонов, компактность и нечувствительность отклика к прохождению через них заряженных частиц.

Линейность отклика переднего адронного калориметра во всем диапазоне измеряемых энергий в эксперименте NA61/SHINE зависит от количества пикселей используемого фотодиода. С целью определения линейности отклика данных детекторов нами были проведены измерения зависимости амплитуды сигнала от величины световой вспышки. В этих измерениях использовалось свойство распределения Пуассона, связывающее амплитуду сигнала с его шириной. А именно, при отсутствии насыщения квадрат стандартного отклонения (сигма) амплитудного распределения должен равняться самой амплитуде. В случае же насыщения ширина распределения должна уменьшаться, что приводит к отклонению от линейности данной зависимости. Измерения были выполнены вплоть до амплитуд в 10⁴ фотоэлектронов, см. Рисунок 1.1.4 (слева). Видно, что линейность амплитудного отклика сохраняется в этом диапазоне амплитуд, Этого диапазона вполне

достаточно, т.к. максимально ожидаемая средняя амплитуда для одной секции модуля калориметра составляет около 1500 фотоэлектронов.

Еще одним важным требованием к типу используемых фотодетекторов является их способность работать в условиях достаточно больших загрузок, вплоть до скоростей счета порядка 2x10⁵ Гц, характерных для центральной области калориметра. Для этого, помимо большого числа пикселей фотодиода, необходимо, чтобы и время восстановления пикселей фотодиододов должно быть достаточно быстрым, чтобы обеспечить стабильную амплитуду сигнала при этих загрузках.

С целью изучения быстродействия фотодиодов были проведены измерения амплитуды сигнала для различных фотодиодов при засветке их световыми импульсами с постоянной амплитудой 1500 фотоэлектронов с различной частотой, вплоть до 1 МГц. Отметим, что амплитуда световой вспышки контролировалась фотоэлектронным умножителем. Результаты измерений представлены на Рисунок 1.1.4, справа. Как видно из этого рисунка, амплитуда сигнала для фотодиода MAPD-3A уменьшается уже на 5% при частоте световых импульсов порядка 2x10⁵ Гц (за время сброса пучка ускорителем (~ 10 сек)). Отметим, что максимальная интенсивность пучка эксперимента NA61/SHINE составляет порядка 10⁵ Гц за время сброса пучка ускорителем и ограничивается скоростью счета системы сбора данных. Таким образом, хотя фотодиод MAPD-3A и удовлетворяет требованиям эксперимента по частоте загрузки для большинства модулей калориметра н, тем не менее, использование данного фотодиода в центральном модуле может быть критическим при максимальных интенсивностях пучка.

Ограниченность счетных характеристик фотодиодов MAPD-3A обусловлена их внутренней структурой, из-за которой время реакции, восстановления пикселей может достигать десятков микросекунд.

В последнее время появился новый тип микропиксельных лавинных фотодиодов -S12572-010C/P с размером единичного пикселя 10x10 мкм², производства компания Hamamatsu (Япония). Отличительной особенностью фотодиодов S12572-010C/P является быстрое время восстановления пикселей, которое составляет всего порядка 10 нс. Благодаря такому рекордно короткому времени восстановления, пиксели фотодиода могут быть восстановлены несколько раз в течение одного светового сигнала с переизлучающего волокна, длиной 50-60 нс. Таким образом, эффективная плотность ячеек увеличивается в 3 -4 раза, что и обеспечивает требуемый динамический диапазон.

Быстродействия фотодиодов МАРД-ЗА и S12572-010C/P были исследованы непосредственно в центральном модуле калориметра при его облучении пучком протонов с энергией 150 ГэВ и интенсивностью до 160 кГц за сброс ускорителя. Зависимость

относительной амплитуды сигнала с фотодиода от интенсивности пучка также приведена на Рисунок 1.1.4, справа. Как видно из сравнения с фотодиодом MAPD-3A, амплитуда сигнала с фотодиода S12572-010C/P остается постоянной вплоть до интенсивности 10⁵ Гц, которая является максимальной для эксперимента NA61/SHINE. Отметим, что для обеспечения интенсивности пучка выше 10⁵ Гц коллиматоры пучка были полностью открыты, а поперечный размер пучка был, соответственно, увеличен. Возможно, этот фактор привел к уширению адронного ливня в модуле и незначительному падение амплитуды сигнала при максимально возможной интенсивности пучка 160 кГц.



Рисунок 1.27 - Слева - зависимость квадрата стандартного отклонения (сигмы) амплитудного распределения от величины самой амплитуды для фотодиодов MAPD-3A. Справа - зависимость относительной амплитуды сигнала с фотодиода от интенсивности протонного пучка. Красные точки – для фотодиода MAPD-3A, синие точки – для фотодиода S12572-010C/P

Эффективность регистрации этих фотодиодов в зеленой части спектра составляет около 12% (Рисунок 1.27, слева). Для сравнения, на этом же рисунке, справа, показана эффективность регистрации фотодиодов МАРД-ЗА, которая в максимуме спектра составляет 14%, т.е. эффективности регистрации обоих типов фотодиодов примерно одинаковые, но время восстановления у фотодиода S12572-010C/P значительно быстрее.

Таким образом, было подтверждено, что параметры фотодиодов S12572-010C/P полностью удовлетворяют условиям эксперимента NA61/SHINE, а данные фотодиоды были выбраны для использования в центральном модуле адронного калориметра, а также в дополнительном центральном модуле (см.ниже).



Рисунок 1.28 - Зависимость эффективности регистрации фотонов от длины волны света для фотодиода S12572-010C/P с размером ячейки 10x10 мкм² (слева) и фотодиода MAPD-3A (справа)

1.3.6.3 Электроника съема сигналов с модулей калориметра

Основными требованиями к электронной части адронного калориметра являются:

1. Обеспечение большого динамического диапазона измеряемых амплитуд в секциях модулей калориметра, которые обусловлены разбросом выделенной энергии как от одиночных спектаторов при центральных взаимодействиях ядер, так и от тяжелых фрагментов в перефирийных столкновениях ядер. Учитывая, что программой эксперимента NA61/SHINE используются пучки ядер от бериллия до свинца с энергиями в пределах 13 ГэВ – 160 АГэВ, динамический диапазон должен быть не менее 2000 для центрального модуля, куда попадает прямой пучок.

2. Интенсивность пучка ионов в ускорителе превышает 10⁵/с, что предъявляет требование к скорости загрузки электронных каналов не менее 200 кГц.

3. Для формирования триггера эксперимента по центральности взаимодействия используется суммарная выделенная энергия в адронном калориметре. С этой целью, необходимо обеспечить аналоговое суммирование амплитуд сигналов с модулей центральной части калориметра для формирования логического сигнала, поступающий в триггерную систему эксперимента.

4. Поскольку основными детекторами в идентификации типов вторичных частиц являются время-проекционные камеры с временем дрейфа около 4 мкс, то при больших интенсивностях пучка возникает вероятность ложной регистрации двух ядерных взаимодействий в одном событии. Для идентификации таких событий адронный калориметр должен обеспечивать считывание информации во временном окне около 8 мкс.

5. Использование микропиксельных лавинных фотодиодов (MAPD) в калориметре предъявляет особые требования к точности установки рабочих напряжений данных фотодетекторов, усиление которых чрезвычайно чувствительно к приложенному напряжению. В связи с этим, необходимо обеспечить точность установки напряжений на

лавинных диодах с шагом менее 0.1 В и обеспечить стабильность напряжения в пределах 0.01-0.02 В.

6. Сильная чувствительность коэффициента усиления MAPD от температуры обуславливает необходимость ее стабилизации и постоянного контроля в зоне размещения фотодиодов.

7. Отладочная опция в настройке рабочей точки лавинных фотодиодов требует возможности контроля сигнала с лавинных фотодиодов на осциллографе.

В соответствии с изложенными требованиями в ИЯИ РАН была разработана схема электронной части для каждого модуля калориметра, которая включает в себя 10 блоков управления напряжением лавинных диодов, 10 каналов зарядовых усилителей-интеграторов, аналоговый сумматор, контрольный усилитель с коммутатором, 11 каналов АЦП (ADC). Логика управления параметрами электронной схемы и передачи цифровых данных адронного калориметра в общую систему сбора данных всех детекторов экспериментальной установки обеспечивается микросхемой «Stratix- 2» (FPGA).

Для формирования триггера по отбору событий с центральными взаимодействиями все 10 сигналов с выхода интегратора также приходят на аналоговый сумматор, установленный в каждом модуле калориметра. Амплитуды сигналов со всех сумматоров также суммируются во внешнем электронном блоке. Суммарная амплитуда отражает выделенную энергию во всем калориметре, и, следовательно, центральность события.

Каждый блок электроники модуля калориметра имеет индивидуальный адрес для обращения к нему. Общее число измерительных каналов калориметра равно 487 (с учетом 3х каналов дополнительного центрального модуля). Конструктивно блок состоит из трех печатных плат, с поперечными размерами 95 х 95 мм², рис.6.

Первая плата (Рисунок 1.1.6, слева) выполнена по мезонинной технологии. На ней размещены аналоговые элементы электронной части: интеграторы, контрольный усилитель, коммутатор и сумматор. На второй плате Рисунок 1.1.6, середина) размещены цифровые элементы: три микросхемы АЦП ADS6425 (12 каналов), 10 каналов ЦАП для управления напряжением питания фотодиодов и канал измерения температуры. На третьей плате (Рисунок 1.29, справа) размещена программируемая логическая микросхема STRATIX – 2, в которой реализовано управление АЦП и ЦАП. В ней же находится буфер памяти для записи информации с АЦП и ее передачи в общую систему сбора данных эксперимента. На данной плате также находятся стабилизаторы питания микросхемы, переключатель адреса платы, тактовый генератор и разъемы питания, сигнала триггера, сигнала сумматора, разъемы для управления и связи с системой сбора данных.



Рисунок 1.29 - Три платы электронного блока калориметра (см. описание в тексте) Все три платы соединяются между собой через разъемы IDC (Рисунок 1.30). Сигналы от лавинных диодов подаются на модуль через плоский кабель на нижней плате.



Рисунок 1.30 - Фото электронного блока модуля калориметра, состоящего из трех печатных плат

1.3.6.4 Система управления и контроля модулей калориметра

Для контроля и управления режимами работы калориметра был разработан программно-аппаратный комплекс «slow control», обеспечивающий выполнение следующих функций:

- Полностью дистанционное управление электроникой калориметра во время работы ускорителя: включение, перезагрузка и выключение электроники.

- Задание напряжения на фотодиодах с шагом не хуже 0.1В.

- Задание режимов работы системы стабилизации фотодиодов.

- Сохранение и быстрая смена конфигураций режимов работы.

- Контроль за напряжениями на фотодиодах и выдачи сигналов предупреждения: визуального (цветом модуля) и голосового (синтезированного компьютерного) - в случае отклонения от заданных значений.

Программное обеспечение системы контроля и управления калориметром написано на языке Java, что позволяет использовать его без необходимости компиляции на платформах

любых операционных систем. Обе программы запускаются на терминале, подключенном как к локальной сети, так и к изолированной сети управления экспериментом, что позволяет удалённо управлять параметрами работы калориметра.

Внешний вид интерфейса программ контроля и управления калориметром показан на Рисунок 1.31.





Рисунок 1.31 - Интерфейс программного обеспечения slow control. Вверху – программа управления и контроля распределения высокого напряжения, Внизу – программа управления питанием электроники низкого напряжения и питанием концентраторов

1.3.6.5 Принцип обработки аналогового сигнала с лавинного диода

Принцип обработки аналогового сигнала с лавинного диода приведен на Рисунок 1.1.9. Слева на рисунке показан сигнал с лавинного диода с усилением 5x10⁴, в центре – сформированный сигнал с усилителя-интегратора с амплитудой, пропорциональной заряду входного сигнала и длительностью около 300 нс. В правой части рисунка представлена оцифрованная форма сигнала в АЦП с частотой 30 МГц. Расстояние между соседними дискретными записями АЦП составляет 33 нс.



Рисунок 1.32. - Принцип обработки аналогового сигнала с лавинного диода

Вид реального сигнала, полученного с одной секции адронного калориметра (PSD) системой сбора данных представлен на диаграмме на Рисунок 1.32 (слева). Здесь горизонтальная ось соответствует развертке по времени считывания сигнала с интегратора, а вертикальная ось – амплитуде сигнала в данный временной промежуток (канал АЦП). Отсчеты АЦП до прихода сигнала представляют уровень пьедестала в данном канале, который должен быть вычтен из амплитуды сигнала. Как видно, пьедестал представляет собой периодическую структуру, обусловленную помехой от системы температурной стабилизации. Сам полезный сигнал заранее подобранной задержкой выставлен примерно в центр временного окна, и имеет длительность около 300 нс (9 отчетов АЦП с расстоянием между ними 33 нс). Все временное окно в 256 отсчетов АЦП составляет 8.4 мкс. Максимальная амплитуда сигнала соответствует 4096 каналам АЦП, имеющим разрядность 12 бит.



Рисунок 1.33 - Вид реального сигнала, полученного с одного секции адронного калориметра (PSD) системой сбора данных (слева) и принцип поиска полезного сигнала (справа)

Для определения полезного сигнала применялся метод поиска промежутка с максимальной амплитудой в интеграле 6-ти отсчетов. Схематично это представлено на Рисунок 1.1.10 (справа). Красным цветом отмечен интервал поиска максимальной суммы, а

синим - найденный промежуток с максимальным сигналом. Далее из найденного интеграла вычитался пьедестал, отстающий от временного окна строго на период помехи (110 отсчетов). Таким образом, влияние периодической помехи нивелируется.

3.4 Триггерная система и отбор событий по центральности в сеансах на пучках аргона и свинца в 2015г.

Для отбора частиц из пучка ускорителя была использована система выработки триггерного сигнала, основанная на нескольких сцинтилляционных счетчиках, а также специального сигнала, вырабатываемого аналоговой электроникой системы считывания PSD в качестве порогового сигнала выборки событий по центральности ядерно-ядерных взаимодействий. Принципиальная схема триггерной системы пучка представлена на Рисунок 1.34



Рисунок 1.34 - Схема расположения триггерных счетчиков на пучке ускорителя для эксперимента NA61. Слева показана система координат

Сцинтилляционные счетчики S1 и S2, включенные в схему совпадения, выделяют отдельную частицу из пучка. Для отсеивания гало пучка и событий, которые относятся к взаимодействиям, происходящим задолго до мишени NA61, применялись VETO счетчики - V0, V1. Они представляют собой сцинтилляторы с отверстием в центре, включенные в систему триггера в режиме антисовпадений. Дополнительный счетчик S4 использовался для отбора событий с любым типом взаимодействия (minimum biased) - при включении на антисовпадение, а также для выбора ядер пучка - при включении на совпадение. Отбор при этом можно было производить, подстраивая порог срабатывания дискриминатора счетчика S4. На схеме также представлены пучковые камеры BPD-1, BPD-2 и BPD-3, по которым осуществлялся отбор треков и определение их параметров, но уже на этапе обработки экспериментальных данных.

Для отбора событий по центральности были использованы аналоговые выходы системы считывания PSD. Каждый модуль PSD имеет сумматор всех 10-ти секций, сигнал с которого поступал на NIM-модуль сумматора. Группы по 8 модулей затем можно было комбинировать, получая нужный сигнал. Для формирования триггерного сигнала-решения использовались 16 центральных модулей PSD. Порог срабатывания регулировался
подстроечным резистором в модуле дискриминатора триггерной системы NA61. Таким образом, можно было настроить систему триггерного сигнала на отбор событий с определенным уровнем центральности взаимодействий. Пример сканирования для принятия решения о выставлении порога приведен на Рисунок 1.35.



Рисунок 1.35 - Кривая настройки порога дискриминатора аналогового сумматора PSD для выделения событий с заданным уровнем центральности

Для принятия решения применялся модуль на основе ПЛИС (FPGA), в который поступали все логические сигналы триггерных счетчиков и сигнал PSD. Настройки позволяли выставить логику работы 4-х триггерных уровней. Они получили названия T1, T2, T3 и T4. Триггер T1 содержал схему совпадений S1, S2 и VETO в режиме антисовпадений. Таким образом, T1 триггер соответствовал пучковой частице. Триггер T2, помимо тех же сигналов, что и T1, включал в себя сигнал от PSD, давая триггер взаимодействия с заданным порогом по центральности. Триггер T3 использовался во вспомогательных контрольных измерениях и не участвовал в отборе событий. Триггер T4 содержал сигнал от счетчика S4, давая возможность регистрировать minimum biased события. Примеры спектров на пучке аргона с различными типами триггерного решения представлены на Рисунок 1.36.



Реконструированная энергия в PSD, [ГэВ]

Рисунок 1.36 - Пример реконструированной энергии событий в PSD (аргон, 150ГэВ/с) для разных решений триггерной системы: Т1, Т2 и Т4

Для оптимизации статистики набранных событий было принято решение установить выборку на уровнях: 80% событий с триггерным решением T2, 10% с триггерным решением T1 и 10% с T4.

1.3.7 Проблемы, обнаруженные при исследовании отклика калориметра на пучках ядер аргона в 2015г.

При измерениях энергии спектаторов налетающего ядра в реакции Ar +Sc, обнаружился и ряд потенциальных проблем, связанных с динамическим диапазоном измерения энергии калориметром, с утечками адронного ливня в—калориметре, с проблемой насыщения пикселей микропиксельных лавинных фотодиодов, а также с формированием сигнала интегратором.

Из-за огромного количества света, возникающего от адронного ливня при прохождении ядер аргона через модуль калориметра, часть пикселей не успевает восстановиться, т.к. время восстановления используемых в настоящее время в калориметре лавинных фотодиодов производства ZECOTEK составляет порядка 10 мксек. Это приводит к эффекту насыщения пикселей и, как следствие, к падению амплитуды сигнала. Этот эффект наблюдался уже в эксперименте с налетающими ядрами аргона и составлял порядка 9% при энергии налетающих ядер аргона 150 ГэВ/нуклон.

Чтобы использовать калориметр в дальнейших экспериментах с более тяжелыми ядрами ксенона и свинца, которые планируется провести в течение 2016 -2018г.г., требуется комплексный подход к решению этих проблем. Рассмотрим несколько подробнее, как эти проблемы решались в эксперименте по столкновению налетающих ядер аргона с мишенью скандия и обсудим предложения по решению этих проблем в будущих экспериментах на пучках ядер ксенона и свинца.

а) Проблема динамического диапазона измерения энергии спектаторов. При энергии налетающих ядер свинца 150 ГэВ/нуклон в калориметре выделяется энергия порядка 30 ТэВ. С другой стороны, калориметр должен измерять и энергию единичного нуклона при энергии налетающих ядер свинца 13 ГэВ/нуклон т.е. 13 ГэВ. Таким образом, динамический диапазон измерения энергии должен составлять более 2000, что потребует разработки новой аналоговой электроники, по крайней мере, для центральных модулей калориметра, где выделяется максимальная энергия от налетающих ядер свинца и их тяжелых фрагментов. Эта проблема возникла уже и в эксперименте с налетающими ядрами аргона - если пучок направлялся в один из центральных модулей, то наблюдался эффект насыщения амплитудноцифровых преобразователей при энергии налетающих ядер аргона 150 ГэВ/нуклон. Это

видно из Рисунок 1.37, где показаны распределения по реконструированной энергии в каждой из 10 секций калориметра.



Рисунок 1.37 - Распределения по реконструированной энергии в каждой из 10 секций калориметра для случая, когда пучок аргона попадает в один из центральных модулей калориметра вблизи оси пучка

В эксперименте с ядрами аргона эта проблема была решена посредством установки калориметра таким образом, чтобы пучок направлялся в геометрический центр калориметра (в точку соприкосновения углов четырех центральных модулей). При этом энергия адронного ливня от прохождения ядер аргона через калориметр распределялась между четырьмя центральными модулями и в распределениях по реконструированной энергии по секциям калориметра, в этом случае, эффекта насыщения практически нет (Рисунок 1.38).

Таким образом, в эксперименте с ядрами аргона проблема динамического диапазона была решена путем перераспределения энергии адронного ливня между четырьмя центральными модулями калориметра. В этом случае энергия адронного ливня в каждом из 4 центральных модулей эффективно соответствует энергии лишь 10 нуклонов (40/4).



Рисунок 1.38 - Распределения по реконструированной энергии в каждой из 10 секций калориметра, когда пучок попадает в геометрический центр калориметра

При переходе к экспериментам с ядрами свинца, при таком же положении калориметра на пучке, в каждом из 4-х центральных модулей калориметра будет выделяться энергия, соответствующая энергии примерно 50-ти нуклонов. Для того, чтобы избежать насыщения амплитудных спектров, необходимо будет переделать аналоговую электронику центральных модулей, уменьшить коэффициент усиления усилителей сигналов с фотодиодов и уменьшить напряжение питания фотодиодов. При этом эффективность измерения одиночных нуклонов в центральных модулях сильно упадет. Необходимо также использовать в центральных модулях фотодиоды с более быстрым временем восстановления. Такие фотодиоды сейчас уже появились на рынке – это фотодиоды МРРС, производства НАМАМАТSU, которые имеют время восстановления порядка 10 нсек.

б) проблема с утечками энергии пучка ядер аргона.

Другая проблема связана с утечками энергии ядер аргона. Калориметр имеет продольную длину всего 5.6 ядерных длин, которая при больших энергиях протонов недостаточна для полного поглощения адронного ливня и часть его энергии утекает через заднюю поверхность калориметра. Эффект утечек зависит от энергии налетающих адронов. На рисунке 1.38 были показаны результаты реконструкции энергий протонов передним адронным калориметром, когда пучок направлен в центр одного из центральных модулей.

Асимметрии формы распределения по выделенной в калориметре энергии наблюдается уже при энергиях протонов больше 60 ГэВ при больших энергиях адронов.

Другая причина утечек заключается в том, что калориметр не является полностью герметичным: он имеет модульную структуру и основные элементы модуля - свинцовые пластины и сцинтилляторы - упакованы в корпус из нержавеющей стали. Толщина стенки модуля (с учетом толщины стягивающей ленты), изготовленного из листа нержавеющей стали, составляет 1 мм. Более того, на одной из поверхностей пластин свинца и сцинтилляторов имеется вырез глубиной 3 мм для укладки оптоволокон.

Следует также учесть, что поперечные размеры модулей имеют определенные допуски при их сборке и не являются идеально одинаковыми, и при сборке калориметра появляются небольшие зазоры между модулями, которые также приводят к его не герметичности. Как следствие, если пучок адронов или ядер аргона направлен в геометрический центр калориметра, то утечки ливня значительно возрастают по сравнению с тем, когда пучок направлен в центр одного из центральных модулей.

Для того, чтобы уменьшить утечки адронного ливня в эксперименте с пучком ядер аргона (пучок направлен в центр калориметра), был использован латунный поглотитель с длиной порядка 0.5 ядерных длин и диаметром поглотителя – 50 мм, который был установлен перед калориметром, на оси пучка, проходящей через геометрический центр калориметра (Рисунок 1.39). Назначение этого поглотителя – образование адронного ливня налетающими ядрами аргона еще до входа в калориметр и тем самым, хотя бы частично, уменьшение утечек ливня от прохождения ядер аргона через центральную часть калориметра.

Латунный



Рисунок 1.39 - Фотография передней части калориметра с установленным перед ним на оси пучка латунным поглотителем.

Реконструированная энергия пучка, а также измеренные продольные профили адронного ливня во всем калориметре показаны на Рисунок 1.40 для энергии пучка 150 ГэВ/нуклон для двух различных измерений – без использования абсорбера (верхние рисунки) и с использованием абсорбера (нижние рисунки). Величины утечек адронного ливня, полученные из фитирования профилей адронного ливня функцией $E_{dep} = A \cdot x^B \cdot e^{-Cx}$, составляют порядка 39% без абсорбера и порядка 29% при наличии абсорбера. Кроме того, сдвижка среднего значения распределения по выделенной энергии несколько увеличивается за счет поглощения части энергии ядер аргона в пассивном абсорбере, но ширина распределения по выделенной энергии несколько уменьшается при использовании абсорбера (уменьшается низкоэнергетическая часть спектра), что является важным фактором для увеличения эффективности отбора центральных событий адронным калориметром. Связано это с тем, что низкоэнергетичная часть этого распределения от ядер аргона дает вклад в спектр выделенной энергии от взаимодействия ядер аргона с мишенью.



Рисунок 1.40 - Распределения по реконструированной энергии пучка ядер аргона и измеренные продольные профили адронного ливня при энергии ядер аргона 150 ГэВ/нуклон. В верхнем ряду - результаты измерений без абсорбера. В нижнем ряду – те же распределения, но при наличии абсорбера перед калориметром

Величины утечек адронного ливня, полученные из фитирования профилей адронного ливня функцией $E_{dep} = A \cdot x^B \cdot e^{-Cx}$, составляют порядка 39% без абсорбера и порядка 29% при наличии абсорбера. Кроме того, сдвижка среднего значения распределения по выделенной энергии несколько увеличивается за счет поглощения части энергии ядер аргона в пассивном абсорбере, но ширина распределения по выделенной энергии несколько уменьшается при использовании абсорбера (уменьшается низкоэнергетическая часть спектра), что является важным фактором для увеличения эффективности отбора центральных событий адронным калориметром. Связано это с тем, что низкоэнергетичная часть этого распределения от ядер аргона дает вклад в спектр выделенной энергии от взаимодействия ядер аргона с мишенью.

Таким образом, триггер для определения центральности, который определяется величиной энергии в калориметре, меньшей определенного порога, будет срабатывать не только от реального взаимодействия ядер аргона с мишенью, но и от низкоэнергетичной части энергетического спектра, получающегося при прохождении ядер аргона через калориметр. Как видно из приведенных выше распределений, эта задача частично была решена в сеансе с пучком аргона посредством установки пассивного абсорбера перед калориметром. Аналогичные результаты получены при энергии ядер аргона 20 ГэВ/нуклон.

Величины утечек адронного ливня, полученные из фитирования профилей адронного ливня, составляют при этом порядка 20 процентов, когда нет абсорбера. При наличии абсорбера утечки составляют порядка 19 процентов. Здесь, также как и при энергии 150 ГэВ/нуклон, наблюдается сдвижка среднего значения распределения по выделенной энергии за счет поглощения части энергии ядер аргона в пассивном абсорбере, ширина распределения по видимой энергии несколько уменьшается при использовании абсорбера.

Следует отметить, что форма профилей распределения, а также величина сдвижек средних значений выделенной в калориметре энергии определяется не только реальной утечкой ливня, но и фактором насыщения пикселей микропикселных фотодиодов, как уже отмечалось выше.

Полученные данные для пучкового триггера Т1 и интенсивности пучка порядка 10⁵ за сброс ускорителя (5 сек.) показали, что вклад в сдвижку средних значений выделенных энергий из-за эффекта насыщения пикселей микропикселных фотодиодов составляет порядка 9 процентов.

1.3.8 Модернизация центральной части калориметра группой ИЯИ в 2015 г. для экспериментов на пучках тяжелых ядер

Исходя из анализа отклика переднего адронного калориметра в сеансе ⁴⁰Ar +⁴⁵Sc, изложенного выше, был сделан вывод о необходимости модернизации центральной части существующего переднего калориметра для того, чтобы его можно было использовать в экспериментах на пучках ядер ксенона и свинца, которые планируется провести в 2016 – 2018гг. Для этого группой ИЯИ в 2015г была выполнена следующая работа:

- разработан и изготовлен новый короткий дополнительный модуль, который должен заменить пассивный абсорбер, использовавшийся в сеансе с пучком аргона. Использование такого дополнительного модуля позволит уменьшить утечки адронного ливня через заднюю поверхность калориметра и тем самым улучшить энергетическое разрешение и линейность отклика калориметра. Кроме того, его использование позволит расширить динамический диапазон измерения энергии существующего калориметра;

 проведены Монте Карло расчеты утечек адронного ливня во всем калориметре с учетом этого дополнительного модуля, включая моделирование продольных профилей адронных ливней, возникающих при прохождении адронов и тяжелых ионов с энергией в

диапазоне 13 - 150 ГэВ через калориметр, расчеты энергетического разрешения и линейности отклика переднего адронного калориметра.

- проведена замена используемых в настоящее время микропиксельных лавинных фотодиодов (производства ZECOTEK) на фотодиоды с более быстрым временем восстановления пикселей (HAMAMATSU). Это необходимо сделать, по крайней мере, для четырех центральных модулей калориметра. Но в 2015г. для тестирования такая замена была произведена только в одном из центральных модулей. Фотодиоды производства HAMAMATSU были использованы также и в новом дополнительном центральном модуле;

 разработана и изготовлена более быстрая аналоговую электронику, как для нового дополнительного модуля, так и для одного из четырех центральных модулей, а также электроника для системы контроля дополнительного центрального модуля и системы термостабилизации для этого модуля.

1.3.8.1 Разработка группой ИЯИ РАН конструкции дополнительного центрального

модуля калориметра

К центральным модулям калориметра предъявляются особенно жесткие требования как с точки зрения обеспечения широкого динамического диапазона измерения энергии, так и их работы в условиях высоких загрузок первичным пучком налетающих ядер. Измерения энергии, выделенной в центральных модулях, необходимы и для формирования триггера эксперимента по отбору ядро-ядерных взаимодействий с нужной центральностью. Надежная селективность триггера является основным фактором, обеспечивающим качество набранных экспериментальных данных. Действительно, в эксперименте используются физические мишени с вероятностью ядерного взаимодействия 1-3%. Поэтому основная масса частиц, регистрируемых калориметром, не является продуктами ядерных взаимодействий в мишени, а представляет собой просто частицы первичного пучка. Неполное восстановление энергии частиц пучка приводит к ложной идентификации события, как взаимодействия в мишени, что приводит к неэффективности триггера по центральности и ухудшению качества набранных экспериментальных данных.

Исходя из результатов предварительного анализа данных, полученных в эксперименте Ar+Sc, было принято решение об использовании дополнительного короткого модуля перед основным калориметром, взамен используемого пассивного абсорбера в сеансе с пучком ядер аргона.

Все эти требования к центральному модулю калориметра учитывались при модернизации конструкции этого модуля, методов съема сигнала, выборе фотодетекторов и разработке методов мониторинга коэффициентов усиления. Так, из анализа данных,

полученных на пучке аргона, следует, что надо улучшить герметичность калориметра к выделенной в адронном ливне энергии, что обусловило выбор составного центрального модуля, имеющего общую ядерную длину около 7 λ_I и состоящего из двух частей с независимым съемом сигнала. Основная часть центрального модуля по геометрическим размерам идентична другим модулям адронного калориметра и состоит из 10 продольных секций. В 2015г в этом модуле существующие фотодетекторы были заменены более быстрые фотодиоды, а также модифицирована и аналоговая электроника в центральном модуле.

Конструктивно дополнительный центральный модуль отличается от основного модуля центральной части калориметра в первую очередь продольной длиной. Он представляет собой короткий (2 секции) модуль и имеет продольную длину равную 1.1 ядерной длины. По своей структуре этот дополнительный модуль аналогичен центральным модулям адронного калориметра (Рисунок 1.1.22, слева). Модуль имеет поперечные размеры 10 х 10 см² и состоит из 12 чередующихся слоев сцинтилляционных и свинцовых пластин (полная продольная длина модуля составляет 1.1 ядерных длин), помещенных в отдельный корпус.

В существующих модулях калориметра, фотодетекторы и электроника установлены непосредственно в конце модуля, т.к. и фотодетекторы не подвержены облучению частицами пучка. Т.к. дополнительный центральный модуль состоит только из двух секций, то для защиты фотодекторов от радиационного облучения, они вынесены в отдельный корпус (Рисунок 1.1.18, в центре), в котором устанавливается также аналоговая и считывающая электроника. Свет от сцинтилляционных тайлов передается с помощью оптоволокон на установленные в этом корпусе фотодиоды (Рисунок 1.41, справа).



Рисунок 1.41 - Слева – фотография собранного дополнительного центрального модуля без верхней крышки корпуса. В центре – корпус для размещения светодиодов и электроники для дополнительного модуля. Справа – полная сборка дополнительного модуля

Этот корпус модуля устанавливается вне зоны пучка. Основной корпус дополнительного модуля с расположенными в нем сцинтилляционными и свинцовыми пластинами устанавливается непосредственно на оси пучка (Рисунок 1.42).



Дополнительный центральный модуль

Фотоприемники и электроника дополнительного модуля

Рисунок 1.42 - Фото с расположенным дополнительным модулем перед калориметром.

1.3.8.2 Калибровки переднего адронного калориметра на пучках мюонов и реконструкция энергии протонов в октябре 2015г.

Энергетическая калибровка всех 442 секций модулей калориметра, включая 2 секции дополнительного центрального модуля, была проведена в октябре 2015г. на пучке мюонов с импульсом 158 ГэВ/с во время тестового сеанса на установке NA61/SHINE. Канал транспортировки пучка H2 был настроен таким образом, что при частично открытых коллиматорах канала транспортировки вторичного пучка на адронный калориметр установки NA61, вторичный пучок адронов (пионов и протонов) имеет существенную примесь мюонов от распавшихся в канале транспортировки пионов. Полная интенсивность пучка составляла порядка нескольких тысяч частиц в секунду, при этом доля мюонов в пучке составляла

На Рисунок 1.43, слева, показаны амплитудные спектры мюонов и адронов (в каналах АЦП), энергии которых одновременно измерялись одним из модулей калориметра сканируемого пучком. Пик в начале шкалы соответствует суммарной выделенной энергии мюонов во всех 10 секциях калориметра, а правый пик соответствует суммарной выделенной энергии энергии адронов (пионов и протонов). Все налетающие частицы имеют импульс 158 ГэВ/с.



Рисунок 1.43 - Слева - амплитудные спектры мюонов и адронов (в каналах АЦП), которые одновременно измерялись одним из модулей калориметра (пояснения см. в тексте). В центре

- амплитудные спектры мюонов при полностью закрытых коллиматорах. Справа распределение по числу сработавших секций в одном из модулей при регистрации мюонов

Для того чтобы убедиться, что левый пик действительно соответствует мюонам, были проведены измерения с полностью закрытыми коллиматорами в канале транспортировки. При этом в пучке присутствовали только мюоны и калориметр измерял только их энергию (Рисунок 1.43 в центре). На этом же рисунке, справа, показано, что при прохождении мюонов через модуль калориметра, одновременно срабатывают все 10 секций в модуле.

После первого этапа калибровки всех 45 модулей калориметра на пучке мюонов, напряжения на лавинных фотодиодах были изменены таким образом, чтобы положение пиков от мюонов в каждой секции калориметра было примерно одинаковыми. После этого была проведена окончательная калибровка мюонами всех модулей калориметра.

В качестве примера, на Рисунок 1.44 синим цветом показаны амплитудные спектры мюонов для 10 секций одного из маленьких центральных модулей калориметра. Красным цветом показаны шумовые амплитудные спектры, которые наблюдаются в секциях данных модулей при прохождении мюонами одного из соседних модулей. Видно, что средняя амплитуда от мюонов во всех секциях хорошо отделяется от средних значений шумовых амплитуд.



Рисунок 1.44 - Амплитудные спектры мюонов (синий цвет) для 10 секций одного из маленьких центральных модулей калориметра. Красным цветом показаны шумовые амплитудные спектры

Средние значения потерь энергии мюонов в каждой секции модуля калориметра определяются суммарной толщиной 6 сцинтилляторов и составляют порядка 5 МэВ. Поэтому, для энергетической калибровки каналов соответствующих амплитудно-цифровых преобразователей, распределения амплитуд от мюонов (в единицах каналов) для каждой секции калориметра аппроксимировались сверткой распределений Гаусса и Ландау (Рисунок 1.45). После этого, амплитуде сигнала, соответствующей максимуму в этом распределении, присваивалось значение энергии 5 МэВ. Цена канала амплитудного преобразователя преобразуется в энергетическую шкалу простым делением этой энергии на соответствующий номер канала.



Рисунок 1.45 - Аппроксимация выделенной энергии мюонов в одной из секций модуля 5 сверткой распределений Гаусса и Ландау.

После проведенной калибровки энергетической шкалы амплитудных преобразователей всех 442 секций модулей калориметра на мюонном пучке был исследован отклик калориметра при его поперечном сканировании пучком адронов с энергией 158 ГэВ. Для этого использовались данные по выделенной энергии адронов в секциях модулей калориметра, которые были измерены одновременно с мюонами в процессе мюонной калибровки.

После проведенной калибровки всех секций модулей калориметра и получения калибровочных коэффициентов для каждого события вычислялась выделенная энергия адронов во всем калориметре, т.е. во всех 440 секциях калориметра.

Завершающим этапом реконструкции энергии налетающих протонов является итерационная процедура сглаживания, которая заключается в следующем:

- для каждого сканируемого модуля считается отношение энергии пучка к реконструированной энергии в калориметре.
- эти отношения умножаются на калибровочные коэффициенты секций соответствующих модулей – получаются новые калибровочные коэффициенты, с которыми повторяется анализ данных.

Таким образом, калибровочные коэффициенты для каждой последующей итерации представляют собой произведения калибровочных коэффициентов, использованных в предыдущей итерации, и отношений энергии пучка к реконструированной с этими коэффициентами энергии в калориметре.

После 4-5 итераций реконструированная с полученными, таким образом, калибровочными коэффициентами энергия в калориметре не зависит от положения сканируемого модуля.

1.3.8.3 Результаты тестирования группой ИЯИ модернизированного калориметра с дополнительным модулем на тестовом пучке протонов в октябре 2015г.

Модернизированный калориметр с дополнительно установленным перед основным калориметром коротким модулем был откалиброван и протестирован как на протонном пучке в диапазоне энергий 20 -158 ГэВ.

Продольные профили для выделенной энергии протонов в калориметре исследовались для случаев, когда пучок протонов с энергией 158 ГэВ направлен в центр одного из центральных модулей – модуль 6 и в геометрический центр калориметра (см. Рисунок 1.46).



Рисунок 1.46- Схема расположения модулей переднего адронного калориметра

Следует отметить, что в октябрьском и ноябрьском сеансах 2015г. калибровка калориметра и тестовые измерения проводились при стабилизированной температуре на фотодиодах равной 23 градусов, в то время, как в сеансе на пучке аргона, измерения проводились при температуре 20 градусов, т.к. из-за высокой температуры наружного воздуха, система температурной стабилизации калориметра не могла обеспечить температуру 20 градусов. Кроме того, как уже отмечалось, для расширения динамического диапазона, необходимого для проведения тестовых измерений на пучке ядер свинца, в одном из центральных модулей и в дополнительном коротком модуле были установлены новые МРРС фотодиоды, уменьшены коэффициенты усиления в усилителях и, кроме того, уменьшено напряжения питания на фотодиодах.

Некалиброванные спектры выделенной энергии протонов и мюонов в модуле 6 после его модернизации, полученные для пучка протонов и мюонов с энергией 158 ГэВ, показаны на Рисунок 1.47 красным цветом. При этом напряжение на фотодиодах в этом модуле было понижено. Синим цветом показаны спектры для протонов и мюонов, полученные с прежними фотодиодами MAPD-3A, и электроникой, используемой в сеансе на пучке ядер аргона.



Рисунок 1.47 - Некалиброванные спектры выделенной энергии в модуле 6, полученные при облучении его пучком протонов и мюонов с энергией 158 ГэВ. Синим цветом показаны спектры для протонов и мюонов, полученные с фотодиодами MAPD-3A, и электроникой, используемой в сеансе на пучке ядер аргона. Красным цветом показаны спектры выделенной энергии в модуле с новыми фотодиодами MPPC и электроникой с уменьшенным усилением.

Видно, что после такой модернизации динамический диапазон измерения выделенной энергии адронов в модуле 6 увеличен, по сравнению диапазоном, который примерно в 6 раз, что и требуется для проведения измерений на пучке ядер свинца.

Для этих двух конфигураций расположения дополнительного модуля перед калориметром был проведен скан по энергии. На рис.36 показано энергетическое разрешение (слева) и линейность отклика калориметра (справа) с установленным дополнительным модулем перед центральным модулем 6. В обоих этих модулях было установлено пониженное напряжение на фотодиодах МРРС и использовались усилители с пониженным коэффициентом усиления, по сравнению с остальными модулями калориметра с фотодиодами MAPD-3A, и электроникой, с таким же напряжением и усилением как в сеансе на пучке ядер аргона. Энергетическое разрешение калориметра аппроксимировалось

функцией с тремя параметрами $y = \sqrt{((a/\sqrt{E})^2 + b^2 + (c/E)^2)}$, где а – константа стохастического члена, в – константный член, с – параметр, который описывает вклад шумов электроники.



Рисунок 1.48 - Энергетическое разрешение (слева) и линейность отклика калориметра (справа) с установленным дополнительным модулем перед центральным модулем 6

1.3.8.4 Тестирование модернизированного калориметра с дополнительным модулем

на тестовом пучке ядер свинца в октябре 2015г.

В ноябре 2015г., в рамках подготовки к физическому сеансу на пучке ядер свинца в 2016г, состоялся тестовый сеанс на пучке ядер свинца при энергии 29 АГэВ, на котором был проведен ряд тестовых измерений на переднем адронном калориметре.

Измерения проводились при уменьшенном напряжении на фотодиодах в модуле 6, по сравнению с напряжением, которое было использовано при измерениях на пучке ядер аргона в начале 2015г. На Рисунок 1.1.26, слева показан продольный профиль для выделенной энергии в калориметре, когда пучок ядер свинца с энергией 29АГэВ направлен в центр одного из центральных модулей - модуль 6, с установленным передним коротким дополнительным модулем. На этом же рисунке в центре показан продольный профиль для выделенной энергии в калориметре, когда пучок ядер свинца направлен в геометрический центр калориметра без дополнительного модуля и с установленным перед ним дополнительным коротким молулем (справа).



Рисунок 1.49 - Продольные профили для выделенной энергии в калориметре, когда пучок свинца с энергией 29 АГэВ направлен в центр модуля 6, с установленным перед ним коротким модулем (слева); пучок направлен в геометрический центр калориметра без дополнительного короткого модуля (в центре) и с дополнительным модулем (справа) Видно, что использование дополнительного модуля, установленного в геометрическом центре калориметра, приводит к резкому уменьшению утечек адронного ливня.

Это видно и из распределений по реконструированной энергии ядер свинца в калориметре (Рисунок 1.50), где эти распределения показаны для двух случаев: когда пучок ядер свинца направлен в геометрический центр калориметра без дополнительного модуля и, когда пучок свинца направлен в геометрический центр калориметра с установленным перед ним дополнительным модулем.



Рисунок 1.50 - Сравнение экспериментальных результатов по измерению реконструированной энергии в калориметре на пучках ядер свинца при энергии 29 АГэВ. Слева - пучок направлен в геометрический центр калориметра без дополнительного модуля. Справа - пучок направлен в геометрический центр калориметра с установленным перед ним дополнительным модулем

Видно, что при использовании дополнительного модуля резко уменьшаются утечки адронного ливня.

На Рисунок 1.51 показаны распределения по сумме выделенной энергии в зависимости от интенсивности пучка ядер свинца. Видно, что среднее значение выделенной энергии не меняется, вплоть до интенсивностей - 800 тыс. частиц за сброс ускорителя. Этот результат получен для пучка, направленного в центр 6 модуля, в котором были использованы



Рисунок 1.51 - Распределение выделенной энергии в модуле 6 на пучках ядер свинца при энергии 29 АГэВ. И при разных интенсивностях пучка ядер свинца

Данные с 9 секций модуля калориметра считывались CAEN DT5742 с чипом DRS4 со скоростью порядка 900 событий в секунду. Таким образом, этот тест продемонстрировал возможность работы переднего адронного калориметра при загрузках до 10⁶ ионов свинца в секунду, при замене существующих фотодиодов MAPD-3A на фотодиоды MPPC S12572-010C/P и обеспечивать скорость считывания до 1000 событий в секунду при планируемом переходе к новой системе считывания для всей установки NA61, на основе электроники с DRS4 чипом.

1.3.8.5. Тестирование на пучке протонов отклика калориметра системы считывания сигналов с модуля калориметра с помощью PADIWA + TRB3 для калориметра CBM и системы считывания сигналов с модуля калориметра с помощью CAEN на основе DRS4

На тестовом сеансе на пучках протонов осенью 2015г. были исследованы возможности применения альтернативных систем сбора данных с модулей калориметра PSD:

- система временного считывания TRBv3;

- быстродействующие аналого-цифровые цепочки DRS4 (модуль CAEN DT5742).

1.3.8.5.1 Система временного считывания TRBv3

Для унификации детекторов с временным съемом информации специалистами центра тяжелых ионов ГСИ (Дармштадт) была разработана система временного считывания TRB (Time Readout Board). В нашем распоряжении оказалась третья версия данной платы - TRBv3. Внешний вид ее представлена на Рисунок 1.1.29 (слева).



Рисунок 1.52 - Внешний вид платы TRBv3 (слева) и модуля PaDiWa-Amps (справа)

Данная плата позволяет осуществлять одновременное считывание до 260 каналов 23пс (RMS). Это временных отсчетов с точностью достигается за счет многофункциональных ПЛИС (FPGA) Lattice, на которых собраны быстродействующие ВЦП (TDC). Для контроля работы внешних модулей данная плата имеет возможность работы по медленным протоколам, а также осуществлять сбор данных с пропускной способностью до 400Мб/с. Для считывания и обработки данных используется разработанный для этих целей программный комплекс "DABC + Go4". Считывание сигналов с модуля детектора NA61 осуществлялся с помощью дополнительного модуля PaDiWaAmps. Внешний вид платы PaDiWa представлен на Рисунок 1.52 (справа), а принципиальная схема канала считывания представлена на Рисунок 1.53.



Рисунок 1.53 - Принципиальная схема считывающего канала электроники платы PaDiWa

Входной сигнал поступает на линейный усилитель, параметры которого можно настроить согласно требованиям детекторной формы сигнала. Далее часть сигнала идет на вход дискриминатора быстрого импульса. Другая его часть поступает на интегратор, на

выходе которого формируется длинный сигнал специальной формы. Задний фронт этого сигнала определяется порогом срабатывания быстрого дискриминатора, за которым следит FPGA. Данная схема слежения запускает цепочку разрядки накопительной емкости линейного усилителя постоянным током через высокое сопротивление. Таким образом, задний фронт получается линейно-спадающим, и после прохождения его через второй дискриминатор, вырабатывает импульс, ширина которого получается пропорциональной амплитуде входного сигнала. Фото экспериментальной установки представлено на Рисунок 1.54.



Рисунок 1.54 - Фото установки для считывания модуля калориметра NA61 с помощью платы TRBv3 и модулей PaDiWa-Amps

Для тестового сеанса использовались 2 платы PaDiWa-Amps с немного отличающимися модификациями, одна использовалась в ГСИ для считывания сигнала с ФЭУ электромагнитного калориметра, а друга – с пучкового годоскопа установки ХАДЕС. После выбора 5-ти подходящих каналов PaDiWa-Amps на каждой плате, были проведены сеансы считывания данных для протонов энергии 30-158 ГэВ/с. Для считывания использовался модуль 41 калориметра с установленными фотодиодами MPPC (Хамаматсу). Предварительный результат полученного энергетического разрешения и линейности отклика представлены на Рисунок 1.55.



Рисунок 1.55 - Энергетическое разрешение и линейность отклика при считывании платой TRBv3 + PaDiWa-Amps (красная и синяя линии показывают результаты для двух вариантов PaDiWa-Amps)

1.3.8.5.2 Система считывания САЕN DT5742 (DRS4)

Для отработки методики считывания будущей электроникой на основе DRS4 (Domino Ring Sampling 4-й версии) был проведен тестовый сеанс со съемом сигнала модулем CAEN DT5742. Внешний вид этого модуля представлен на Рисунок 1.1.33 (сверху). Модуль CAEN DT5742 представляет собой 16-канальный быстрый АЦП с частотой дискретизации до 200пс, основанный на микросхеме с цепочкой переключающихся конденсаторов (Switch Capasitor Array - SCA), позволяющих непрерывно запоминать форму импульса входного сигнала в виде последовательных значений амплитуд и по запросу выдавать мгновенный "снимок" этих значений. Управление и считывание осуществляется по шине USB2.0, а также есть возможность подключить оптическую линию с более высокой пропускной способностью. В тестовом эксперименте использовался выход USB2.0 со считыванием программой "wavedump", поставляемой с модулем CAEN DT5742.



Рисунок. 1.56 - Внешний вид модуля CAEN DT5742 (сверху) и вид тестовой установки для считывания модуля калориметра NA61/SHINE (снизу)

Дальнейшая обработка была выполнена в среде ROOT с помощью специально написанного программного пакета. Результат полученного относительного энергетического разрешения и линейности отклика калориметра на пучке протонов импульсов 30-158 ГэВ/с представлены на Рисунок 1.1.34.



Рисунок 1.57 - Энергетическое разрешение и линейность отклика при измерении модуля калориметра NA61/SHINE считывающей системой на основе DRS4 CAEN DT5742 1.3 Список использованных источников

- [1] N. Antoniou et al. [NA61/SHINE Collaboration], CERN-SPSC-2006-034.
- [2] C. Alt et al. [NA49 Collaboration], PhysRev C77, 024903 (2008) [arXiv:0710.0118.
- [3] M. Gazdzicki, M. Gorenstein, P. Seyboth, Acta Phys. Polon. B42, 307 (2011)
- [arXiv:1006.1765 [hep-ph]].
- [4] N. Abgrall et al ., JINST 9 (2014) P06005
- [5] S. Afanasiev et al. (NA49 Collab.), Nucl. Instrum. Meth. A430 (1999) 210.
- [6] N. Abgrall et al. PhysRev C.85.035210, 2012
- [7] N. Abgrall et al., Nucl.Instrum.Meth. A701 (2013) 99-114
- [8] A.Ivashkin, et al., http://arxiv.org/abs/arXiv:1205.4864.
- [9] M.Golubeva, et al., Phys.Atom.Nucl. 75 (2012) 673-675.
- [10] О.Андреева, М.Голубева, Ф.Губер и др. «Передний адронный калориметр
- эксперимента NA61 на ускорителе SPS в ЦЕРН», Препринт ИЯИ РАН 1362/2013.
- [11] S.Uozumi et al., NIM A487 (2002) 389-429.
- [12] Y.Fujii, NIM A453 (2000) 237-241.
- [13] T. Matsui and H. Satz, 1986, Phys. Lett. B 178, 416.
- [14] Helmut Satz, 2013, arXiv 1303.3493
- [15] Berndt Mu⁻ller, 2013, arXiv:1309.7616.

[16] Grigory Feofilov (for NA61/SHINE Collaboration), «NA61/SHINE vertex detector for open charm measurements», proceedings of SQM-2015, (Submitted to Journal of Physics:Conference Series (JPCS))

[17] W. Cassing, E.L. Bratkovskaya, arXiv:0907.5331

[18] W. Cassing, E. L. Bratkovskaya, and A. Sibirtsev, 2001, Nucl. Phys. A691, 753.

[19] O. Linnyk et al., Int. J. Mod. Phys., 2008, E17, 1367; [arXiv:0808:1504 [nucl-th]].

[20] The ALICE Collaboration, 2013, Technical Design Report for the Upgrade of the ALICE Inner Tracking System ALICE-TDR-017, CERN-LHCC-2013-024.

1.4 Участие ИЯИ РАН в 2015 г. в работах по моделированию и анализу данных, полученных в эксперименте NA61/SHINE

1.4.1 Результаты анализа экспериментальных данных полученных в p+p, pA и AA столкновениях в эксперименте NA61/SHINE

В 2015 г. коллаборацией NA61/SHINE продолжен анализ экспериментальных данных, полученных в реакциях p+p, pA и AA в диапазоне энергий налетающих частиц 13 -150 ГэВ на нуклон. Так, подготовлена и послана в печать статья по инклюзивному образованию л-гиперонов в неупругих p + p взаимодействиях при импульсе пучка протонов 158 ГэВ/с [1]. Данные были получены на установке NA61/SHINE в ЦЕРНе на ускорителе SPS.

В статье представлены спектры Λ -гиперонов по поперечному импульсу (до 2 ГэВ/с) и по поперечной массе, а также распределения по быстроте (от -1.75 до 1.25) и X_F (от -0.4 до 0.4). Получена средняя множественность оказалась равной 0.120 ± 0.006 (стат.) ± 0.010 (сист.). В качестве примера, на Рисунок 1.1.1(слева) показана энергетическая зависимость средней множественности Λ -гиперонов в неупругих p+p взаимодействиях. Здесь синие и зеленые символы указывают множественности, полученные на пузырьковых камерах [2-6], а красная точка показывают мировые данные по множественности для других энергий протонов [7]. Средняя множественность, полученная в EPOS1.99 [8] показана в виде кривой. Систематическая ошибка результата NA61/SHINE обозначена заштрихованной области.



Рисунок 1.58 - Слева - энергетическая зависимость средней множественности Λ-гиперонов в неупругих p+p взаимодействиях (Рисунок 1.1.16 из [1]) (пояснения см. в тексте). Справа – распределения Λ-гиперонов по поперечной массе(Рисунок 1.1.19 из [1]), которые приведены для области средних быстрот IYI ≤ 0.4 для реакций A + A, и IYI ≤ 0.25 для p + p

Полученные результаты находятся в разумном согласии с измерениями, полученными ранее на пузырьковых камерах в той же области энергии, но которые имеют гораздо худшую точность. Сравнение полученных новых данных с предсказаниями моделей EPOS, UrQMD и FRITIOF, показало, что данные описываются достаточно хорошо только в модели EPOS. Две другие модели дают значительные расхождения с экспериментальными данными.

На этом же рисунке, справа, показаны распределения Л-гиперонов по поперечной массе, полученные в эксперименте NA61 для неупругого р + р взаимодействия и центральных C + C, Si + Si [9], и Pb + Pb столкновений [10] для пучка с импульсом 158 AGeV.

Полученные результаты позволят расширить наши знания об элементарных протонпротоных взаимодействиях и позволят более точно описать процесс образования странности в элементарных взаимодействиях.

Полученные данные будут использоваться не только в качестве важного вклада в исследования сильно взаимодействующей материи, но могут быть также использованы для настройки МС-генераторов, в том числе и тех, которые используются для исследования ливней от космических лучей и и моделирования пучков нейтрино.

В 2015г.подготовлена и отправлена в печать статья с результатами измерения флуктуаций множественности и поперечного импульса заряженных частиц для неупругих р + р взаимодействий при импульсах пучка протонов 20, 31, 40, 80 и 158 ГэВ/с [11]. В этой статье представлены результаты для нормированной дисперсии распределения по множественности и для трех сильно интенсивных параметров флуктуации распределений по множественности и поперечному импульсу - Δ [P_T, N], Σ [P_T, N] и Ф_{PT}. Впервые результаты по флуктуациям полностью поправлены на экспериментальные неточности, вызванные, в

частности, потерями неупругих событий из-за отбора по триггеру и отбора событий для анализа, а также примесью частиц из слабых распадов и вторичных взаимодействий. Результаты по флуктуациям множественности и поперечного импульса существенно отличаются от ожиданий для независимого образования частиц (Рисунок 1.1.2). Они также зависят от зарядов отобранных адроны. Струнно-резонансные Монте-Карло модели EPOS and UrQMD не описывают полученные экспериментальные данные. В ряде случаев энергетическая зависимость, предсказываемая моделями, даже показывает тренд качественно отличающийся от измерений. Нормированная дисперсия флуктуаций множественности значительно выше в неупругих р + р взаимодействиях, чем для 1% наиболее центральных Pb + Pb столкновений, измеренных ранее в NA49 эксперименте при энергии 158 АГэВ. Это качественно не согласуется с предсказаниями модели возбужденных нуклонов. В рамках статистических моделей повышенная флуктуация множественности в неупругих р + р взаимодействиях может быть интерпретирована как по-событийные флуктуации энергии и (или) объема файербола.



Рисунок 1.59 - Энергетическая зависимость величин Δ [P_T, N], Σ [P_T, N], Φ_{PT и} ω [N], для неупругого p + p взаимодействия (Рисунок 8 из [1]). Экспериментальные данные NA61/SHINE (красные кружки) сравниваются с предсказаниями EPOS1.99 (треугольники вверх) и UrQMD (треугольники вниз) моделями с учетом NA61 / SHINE аксептанса. Статистические неопределенности (практически не видны) показаны вертикальными линиями, систематические неопределенности показаны затененными полосами

Интерпретация экспериментальных результатов, полученных в ядро-ядерных столкновениях, опирается в значительной степени на сравнении с соответствующими данными, полученными в p + p и p + A взаимодействиях. Вместе с тем, практически отсутствуют экспериментальные данные о флуктуациях. Подходящие измерения флуктуаций существуют только при протонов с импульсом 158 ГэВ/с [12,13] для p + p взаимодействий.

Более того, измеренные флуктуации не могут быть поправлены модельно независимым образом из-за ограниченного аксептанса фазового. Таким образом, измерения для всех энергий должны быть выполнены в одинаковой области фазового пространства.

В ядро-ядерных реакциях прицельный параметр столкновения не может быть жестко контролироваться. Эта проблема приводит к дополнительных нежелательным вкладам в

эффект флуктуаций, которые необходимо подавить использованием так называемых сильно интенсивных параметров. В данной публикации, в дополнение к Φ_{PT} , исследуются и две недавно предложенные сильно интенсивные величины Δ [P_T, N], Σ [P_T, N].

В 2015г. была закончена и послана в печать статья [14] с новыми результатами анализа экспериментальных данных по измеренным спектрам заряженных пионов, каонов, а также K0s и Л-гиперонов, полученными в p+C взаимодействиях при импульсе налетающих протонов 31 GeV/c в 2009 году со статистикой в 8 раз превышающую статистику данных, измеренных ранее в 2007г.и опубликованных [15, 16]. Эти данные имеют очень важное значение для моделирования потоков нейтрино для эксперимента T2K эесперимента [17] на J-PARC. Приводится также сравнение полученных экспериментальных данных с предсказаниями нескольких моделей.

1.4.2 Состояние анализа экспериментальных данных полученных на пучке аргона в 2015г.

Процедура отбора событий, разработанная при участии группы ИЯИ РАН

Предварительный анализ экспериментальных данных в реакции Ar + Sc был начат осенью 2015г. совместными усилиями нескольких групп, в том числе групп ИЯИ и СПбГУ. На данный момент созданы первые версии выходных файлов с реконструированными данными для пучков аргона с импульсами 150, 75, 40, 30, 19 и 13 ГэВ/с на нуклон. Группой СПбГУ при участии группы ИЯИ было проведено исследование методики отбора полезных событий для данных 150 ГэВ/с на нуклон. При этом были выбраны следующие критерии отбора:

- триггер Т2 (взаимодействие в мишени с определенным порогом по центральности на основе отклика аналоговой суммы центральных модулей калориметра PSD);

- требование надежного восстановления трека первичного иона аргона по пучковым камерам (BPD);

- вершина треков вторичных частиц, восстановленная с помощью время-проекционных камер (TPC), лежит в пределах +-10см около мишени

- вершина восстановлена с хорошим качеством фиттирования трека по кластерам во время-проекционных камерах (ТРС);

- спектр счетчика S1, проанализированный с помощью быстрого цифрового анализатора формы сигнала, содержит единственный изолированный пик в точке прихода триггерного сигнала;

- сигнал со счетчика S5 по амплитуде меньше 100 отсчетов (для исключения событий неэффективности на пороге срабатывания).

На Рисунок 1.60 представлен двумерный спектр зависимости множественности треков в детекторе TPC от реконструированной энергии в переднем калориметре обработанных данных Ar+Sc при энергии налетающего ядра аргона 150А ГэВ. Видно, что, несмотря на отбор, события распределены в нескольких зонах ("облаках"). События, лежащие в зоне 1 (см. Рисунок 1.60), представляют собой хорошие события с взаимодействием в мишени и для них соблюдается анти-корреляция между множественностью восстановленных треков и откликом PSD. Для нахождения причин отклонения событий в других зонах было проведено их комплексное пособытийное исследование.



Рису

В результате было найдено, что:

 для зоны номер 2 события представляют собой наложение дополнительного сигнала на основную частицу триггера. Данные события могут быть исключены более сильным отбором по цифровому анализатору формы сигнала счетчика S1.

- события в зоне номер 3 представляют собой вторичное взаимодействие в мишени, тогда как первичное происходит в объеме газа (аргон) пучковой трековой камеры BPD-1. Также здесь находятся события, в которых только часть треков в TPC восстанавливают вершину в области мишени. Для исключения таких событий был усовершенствован алгоритм отбора по восстановленной вершине и по отношению количества треков, использованных для фиттирования вершины, к общему количеству треков в TPC. - события в зоне номер 4 представляют собой наложения вторичного сигнала на начальную частицу, при этом разница во времени очень мала, 50-100нс.

Таким образом, данный двойной сигнал проходит через время формирования системы триггерного сигнала, а также не виден в небольшом временном окне счетчика S5. Единственным детектором, где данное наложение сигнала можно распознать, является калориметр PSD.

Таким образом, исследование методики отбора событий показало исключительную эффективность переднего адронного калориметра PSD еще и как инструмента для изучения и повышения эффективности отбора ядерно-ядерных взаимодействий в сложных системах детекторов.

1.4.3 Проведение группой ИЯИ РАН в 2015г. тестовых измерений и моделирования точности определения угла плоскости реакции Рb+Pb при 29 АГэВ для исследования азимутальных распределений потоков частиц в столкновениях ядер свинца на установке

NA61/SHINE.

Группа ИЯИ РАН продолжила в 2015г. работу по исследованию возможности изучения потоков частиц в ядро-ядерных столкновениях на установке NA61/SHINE. Исследование коллективных потоков частиц, образующихся в столкновениях тяжелых ионов, остается одним из современных направлений современной релятивистской ядерной физики, изучающей свойства сильно взаимодействующей материи, в частности, уравнение состояния ядерной (адронной) материи. Исследование коллективных потоков в реакциях столкновений тяжелых ионов начато в 1980-х на BEVALAC и в 1990-х продолжено такими экспериментами как KaoS, FOPI в GSI в области кинетических энергий налетающего пучка порядка 1 ГэВ на нуклон, а также в эксперименте E877, BNL в области энергий около 10 ГэВ на нуклон. Исследования были продолжены в ЦЕРНе на SPS (эксперимент NA49 и др.) в области энергий пучка 20 – 180 ГэВ на нуклон, а в последние годы на коллайдерах RHIC и LHC. Первые эксперименты по изучению коллективных потоков фокусировались в основном на изучении первых двух гармоник – т.н. направленного и эллиптического потоков, характеризующих процессы на начальном этапе столкновений. В то же время, эксперименты на RHIC и LHC, благодаря многократно возросшим статистическим данным, провели измерения вплоть до 3-ей и 4-й гармоник, характеризующих, вязкость адронной материи. Таким образом, акцент в изучении уравнения состояния адронной материи постепенно сдвигается В сторону исследований динамики столкновения и уточнений eë гидродинамических параметров на разных этапах.

Для изучения потоков заряженных частиц требуется определение в каждом событии некоторого выделенного направления – плоскости реакции - по отношению к которому исследуется предпочтительное движение некоторой выборки испущенных частиц (поток). В данном проекте предполагается разработать методику определения плоскости реакции посредством измерения как координат, так и энергии спектаторов с помощью переднего сегментированного адронного калориметра эксперимента NA61/SHINE. Однако, наличие магнитного поля перед адронным калориметром в установках NA61/SHINE требует разработки методики компенсации влияния магнитного поля на точность определения плоскости реакции.

В 2015г. группой ИЯИ РАН было проведено моделирование точности определения угла плоскости реакции с помощью переднего адронного калориметра установки NA61/SHINE для реакции Pb+Pb при энергии 29А ГэВ, Рисунок 1.61, слева. Для сравнения, на этом же рисунке представлены результаты моделирования для реакции Au+Au, при энергии 35А ГэВ, выполненные ранее для аналогичного калориметра для установки CBM на ускорительном комплексе ФАИР в Дармштадте.



Рисунок 1.61 - Слева показаны результаты моделирования разрешения угла плоскости реакции для Au+Au, при энергии 35АГэВ, выполненные для NA61/SHINE, а также результаты моделирования для установки CBM. Справа показаны результаты для более легкой системы - Ar+Sc

Видно, что разрешение по углу плоскости реакции достаточно хорошее для полуцентральных взаимодействий и сравнимо с лучшими значениями, полученными на установке АЛИСЕ, Рисунок 1.61, справа.

В то же время, при этой энергии был в ноябре 2015г. был проведен тестовый сеанс, одна из задач которого заключалась в получении первых оценочных экспериментальных данных для оценки потоков частиц в этой реакции. Во время этого сеанса магнит вершинного детектора не работал из-за поломки, поэтому идентификации вторичных

заряженных частиц не было, но была возможность провести измерения корреляции множественности заряженных частиц в ТРС детекторах и выделенной энергии в переднем адронном калориметре с поперечной сегментацией.

В 2015г. был разработано новое предложение по исследованиям реакции Pb+Pb в диапазоне энергий 20-150А ГэВ, которое представлено в программный комитет ЦЕРНа [18]. Первые экспериментальные результаты по этой реакции планируется получить уже в конце следующего года. В 2016г. планируется также продолжение разработки методики и моделирование определения точности определения угла плоскости реакции для исследований потоков частиц в столкновениях Pb+Pb в диапазоне энергий 20 -150А ГэВ.

1.4.9 Разработка и поддержка группой ИЯИ РАН программного обеспечения для моделирования адронного калориметра и для визуализации работы калориметра во время

сеансов

Создание программного обеспечения для эффективного моделирования установок в физике высоких энергий является одной из главных задач любого эксперимента. Для установки NA61/SHINE существует пакет программ, основанный на библиотеках GEANT3. Однако при моделировании тяжелых ион-ионных систем, подобных Ar+Sc, и тем более Pb+Pb, возможностей GEANT3 оказывается недостаточно. Поэтому в среде обработки и реконструкции данных эксперимента NA61/SHINE под названием "Shine" была предусмотрена возможность создания модулей, отвечающих за моделирование в среде GEANT4.

Группой ИЯИ РАН в 2015г. была выполнена работа по интеграции программы моделирования отклика калориметра PSD в среду Shine, а также была написана программамодуль для разыгрывания отклика электроники считывания (digitizer). Вид установки NA61/SHINE с калориметром PSD представлен на Рисунок 1.62.



Рисунок 1.62 - Визуализация геометрии детекторов установки NA61 с калориметром PSD в программном пакете моделирования на основе GEANT4 в среде Shine

С помощью файла конфигурации можно задавать положение калориметра PSD согласно тому, как он был установлен в реальном эксперименте. Также можно устанавливать дополнительный короткий модуль в любом месте перед калориметром. Все параметры геометрии, материалы и их расположение внутри модулей полностью повторяют реальную конструкцию калориметра. Пример отклика детектора (одной секции на мюоны и всего калориметра на адронный ливень) представлены на Рисунок 1.63.



Рисунок 1.63 - Сравнение моделирования (показано красным цветом) и реальных данных (синим). Слева - отклик одной секции в единицах ADC на сигнал от мюона. Справа – выделенная энергия в единицах отклика мюонов (MIP) на адронный ливень для протонов с импульсом 40 ГэВ/с

Трехмерная визуализация события представлена на Рисунок 1.64.



Рисунок 1.64 - Пример смоделированного события: протон 40 ГэВ/с в калориметре PSD

Для моделирования столкновений ядер в качестве генератора для программы моделирования был использован пакет SHIELD (DCM-QGSM), так как в нем есть возможность формировать фрагменты ядер, оставшихся после взаимодействия (спектаторы). Для того, чтобы иметь возможность читать выходной файл данного пакета, был разработан модуль чтения формата вывода этого генератора. После сбора всех потерь энергий в чувствительном объеме калориметра формировался набор откликов всех секций во всех модулях PSD. Для моделирования эффектов детекторной электроники, шумов, имитации ограниченного количества пикселей фотодиода и формирования сигнала, аналогичного тому, что поступал с реального калориметра, был написан модуль оцифровки (digitizer). Он представляет из себя дополнительный программный модуль в среде Shine, который можно активировать в файле конфигурации последовательности запусков модулей.

Для визуализации отклика калориметра PSD на сеансах набора данных был разработан и встроен в систему обзора событий установки NA61 программный код на основе пакета ROOT. Он позволяет в режиме реального времени следить за работой калориметра, вовремя обнаруживать ошибки в его работе и настраивать положение пучка на поверхности калориметра. Также при переключении питания низковольтной шины системы сбора данных можно было оперативно проверить правильность перезапуска ПЛИС (FPGA). Примеры работы программ визуализации представлены на Рисунок 1.1.8.



Рисунок 1.65 - Пример работы программ визуализации отклика калориметра PSD. Слева мгновенный "снимок" события в калориметре, с распределением энергий (условные единицы) во всех модулях. Справа - пример картинки мониторинга правильности перезагрузки ПЛИС (FPGA) (специально выбрана картина с ошибками в перезагрузке в виде ярких полос)

1.4.10 Список использованных источников

[1] NA61 Collaboration, N. Abgrall, CERN-PH-EP-2015-274,

e-Print: arXiv:1510.03720 [hep-ex], отправлено в Eur. Phys. J. С

[2] V.V. Ammosov et al., Nucl. Phys. B 115, 269 (1976)

[3] J.W. Chapman et al., Phys.Lett. 47B, 465 (1973)

[4] D. Brick et al., Nucl. Phys. B 164, 1 (1980)

[5] K. Jaeger et al., Phys. Rev. D 11, 2405 (1975)

[6] F. LoPinto et al., Phys. Rev. D 22, 573 (1980)

[7] M. Ga'zdzicki, and D. Röhrich, Z. Phys. C 71, 55 (1996)

[8] K. Werner, F.-M. Liu, and T. Pierog, Phys. Rev. C 74, 044902 (2006)

[9] C. Alt et al. (NA49 Collaboration), Phys. Rev. Lett. 94,052301 (2005)

[10] T. Alt et al. (NA49 Collaboration), Phys. Rev. C 78,034918 (2008)

[11] NA61 Collaboration, N. Abgrall et al., CERN-PH-EP-2015-273,

e-Print: arXiv:1510.00163 [hep-ex], отправлено в Eur. Phys. J. C

[12] C. Alt et al., [NA49 Collab.] Phys.Rev. C75 (2007) 064904,

arXiv:nucl-ex/0612010 [nucl-ex].

[13] T. Anticic et al., [NA49 Collab.] Phys. Rev. C70 (2004) 034902.

[14] NA61 Collaboration, N. Abgrall, et al., CERN-PH-EP-2015-278

e-Print: arXiv:1510.02703 [hep-ex], отправлено в Eur. Phys. J. C

[15] N. Abgrall, et al., Phys. Rev. C84, 034604 (2011). DOI10.1103/PhysRevC.84.034604

[16] N. Abgrall, et al., Phys. Rev. C85, 035210 (2012). DOI10.1103/PhysRevC.85.035210

[17] K. Abe, et al., Phys. Rev. Lett. 107(4), 041801 (2011).

DOI 10.1103/PhysRevLett.107.041801

1.4.11 Список докладов, сделанных сотрудниками ИЯИ РАН на международных совещаниях и конференциях в 2015 г. по тематике NA61

В 2015г. сотрудники ИЯИ РАН выступили с 1 докладом от имени коллаборации на международной конференции и с 14 докладами на международных совещаниях коллаборации NA61/SHINE:

 S.Morozov for NA61/SHINE Collaboration "Recent results from NA61/SHINE" The 17th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, Moscow State University, Moscow, 20 – 26 August 2015

NA61 Analysis/software/calibration meeting, 26 - 30 January 2015, Katowice, Poland

- 1) PSD settings during the Ar run. Sergey Morozov (Russian Academy of Sciences (RU))
- 2) Reaction plane reconstruction by the PSD for flow analysis, Marina Golubeva (Russian Academy of Sciences (RU)), Alexander Sadovskiy (Russian Academy of Sciences (RU))

PSD implementation in SHINE, Sergey Morozov (Russian Academy of Sciences (RU))
Hardware Upgrade Workshop at CERN, 21 – 23 February 2015

 PSD upgrade: Ar-present and Xe-future, F.Guber, M.Golubeva, A.Ivashkin, S.Morozov, O.Petukhov (INR, Moscow)

Monte Carlo Workshop at CERN, 16-17 March 2015.

1) PSD: simulation status and needs Sergey Morozov (INR, Moscow)

NA61 collaboration meeting, 25 – 29 May 2015, Paris, France

1) "PSD upgrade", Fedor Guber, Alesander Ivashkin

2) "PSD calibration for Ar beam data 2015", Marina Golubeva, Sergey Morozov

NA61 collaboration meeting, 21 – 25 September 2015, CERN

1) Status of the PSD central module upgrade and preparation to the PSD beam test runs in October/November 2015, A.Ivashkin

- "Preliminary results of the reaction plane angle simulation in Pb+Pb collisions at 29 A GeV/c", S. Morozov
- 3) "MoU NA61-CBM on PSD", F.Guber

Ar+Sc Analysis Meeting at CERN, (23 November - 4 December 2015)

1) Status of event selection, M.Golubeva, S.Morozov

Hardware Upgrade Meeting, 2 – 4 December 2015

1) M.Golubeva, S.Morozov, Study of the PSD response after upgrade 2015,

- 2) F.Guber, A.Ivashkin, Plans for the PSD upgrade 2016
- S.Morozov First beam and cosmic test results for NA61 TOF Scint. Detector with SiPMs readout
- 1.4.12 Список статей в научных журналах, опубликованных в 2015г. в подготовке которых сотрудники ИЯИ РАН играли лидирующую роль.

1. N. Abgrall,O.Busygina, M.Golubeva, F.Guber, A,Ivashkin, A.Kurepin, V.Matveev, V.Marin,

O.Petukhov, A.Sadovsky, et al., NA61 Collaboration,

Production of A hyperons in inelastic p+p interactions at 158 GeV CERN-PH-EP-2015-274, arXiv:1510.03720 [hep-ex], отправлено в Eur. Phys. J. C

N. Abgrall,O.Busygina, M.Golubeva, F.Guber, A,Ivashkin, A.Kurepin, V.Matveev, V.Marin,
O.Petukhov, A.Sadovsky, et al., NA61 Collaboration,

Measurements of $\pi\pm$, K \pm , K0S, Λ and proton production in proton-carbon interactions at 31 GeV/c with the NA61/SHINE spectrometer at the CERN SPS

CERN-PH-EP-2015-278, arXiv:1510.02703 [hep-ex], отправлено в Eur. Phys. J. С

N.Abgrall,O.Busygina, M.Golubeva, F.Guber, A,Ivashkin, A.Kurepin, V.Matveev, V.Marin,
O.Petukhov, A.Sadovsky, et al., NA61 Collaboration,

Multiplicity and transverse momentum fluctuations in inelastic proton-proton interactions at the CERN Super Proton Synchrotron CERN-PH-EP-2015-273, отправлено в Eur. Phys. J. C

4. N. Abgrall, ,...O.Busygina, M.Golubeva, F.Guber, A,Ivashkin, A.Kurepin, V.Matveev, V.Marin,

O.Petukhov, A.Sadovsky, et al., NA61 Collaboration, Report from the NA61/SHINE experiment

CERN-PH-EP-2015-273, CERN-SPSC-2015-036; SPSC-SR-171

5 N. Abgrall,O.Busygina, M.Golubeva, F.Guber, A,Ivashkin, A.Kurepin, V.Matveev, V.Marin, O.Petukhov, A.Sadovsky, et al. NA61 Collaboration,

Addendum to the NA61/SHINE Proposal SPSC-P-33 Beam momentum scan with Pb+Pb collisions CERN-SPSC-2015-038; SPSC-P-330-ADD-8

1.5 Эксперимент CBM «Исследование свойств сжатой барионной материи на установке CBM в GSI (Дармшадт, Германия)

1.5 Введение. Актуальность проблемы. Основные цели эксперимента СВМ

Физическая программа работ на создаваемой экспериментальной установке CBM (Compressed Barionic Matter) направлена на исследования фазовой диаграммы сильно взаимодействующей материи [1]. На коллайдерах RHIC и LHC фазовая диаграмма КХД изучается при очень высоких температурах и очень низкой барионной плотности. Для
больших значений барионной плотности и меньших температур ожидается фазовый переход первого рода между адронной и партонной или кварковой материей заканчивающийся критической точкой, а также киральный фазовый переход. Экспериментальное открытие этих процессов было бы важным прорывом в нашем понимании свойств ядерной материи. Область высокой плотности на фазовой диаграмме будет экспериментально исследована в ядро-ядерных столкновениях с энергиями пучка 2-45 ГэВ/нуклон на создаваемой установке СВМ сильноточного ускорительного комплекса ФАИР. На первом этапе комплекса ФАИР ядро-ядерные столкновения будут изучаться с использованием пучков ускорителя SIS100 с энергиями до 11 ГэВ/нуклон для столкновений AuAu. На втором этапе создания комплекса ФАИР (ускоритель SIS300) энергия пучка будет увеличена до 35 ГэВ/нуклон для ядер золота.

Как показывают расчеты, основанные на транспортных моделях, уже при энергиях SIS100 в центральных столкновениях тяжелых ионов будут достигаться плотность ядерной материи вплоть до 7 ρ_0 и исследование уравнения состояния ядерной материи (EoS) при таких больших плотностях, близких к плотности нейтронных звезд, имеет приложения к вопросам астрофизики.

Для определения таких глобальных характеристик событий как центральность и угол плоскости реакции, получаемых в ядро-ядерных столкновениях на установке CBM, ИЯИ РАН является ответственным за разработку переднего адронного калориметра фрагментов, PSD – Projectle Spectator Detector. Этот калориметр необходим для изучения большого набора наблюдаемых в зависимости от центральности столкновения, которая используется для определения плотности энергии, достигаемой в этих реакциях, а также для исследования пособытийных флуктуаций и коллективных потоков идентифицированных адронов и редких пробников, включая J/Ψ.

1.5.1 Краткий отчет об участии группы ИЯИ РАН в эксперименте СВМ в 2015г.

В течение 2015г. велись работы по моделированию переднего адронного калориметра с целью разработки методов определения центральности и угла плоскости реакции в столкновениях тяжелых ядер и улучшения точности. Изучались корреляции с другими детекторными системами СВМ для более точного определения центральности в ядроядерных взаимодействий.

В октябре 2015 г. проведен тестовый сеанс на пучке протонов в ЦЕРНе, на котором впервые был измерен отклик модуля калориметра переднего адронного калориметра установки NA61 с прототипом считывающей электроники, разработанным для калориметра установки CBM. На основе результатов, проводимого в настоящее время анализа

полученных данных, будет принято решение о модернизации этой электроники, т.к. она сейчас оптимизирована для считывания информации с электромагнитного калориметра установки ХАДЕС.

В ноябре 2015г. подписан контракт ФАИР-ИЯИ на разработку и изготовление переднего адронного калориметра установки СВМ в ИЯИ РАН. Начаты работы по разработке конструкторской документации на изготовление модулей калориметра.

1.5.2 Участие группы ИЯИ РАН в эксперименте СВМ в 2015г.

В 2015 году работа по эксперименту СВМ группой ИЯИ РАН проводилась по нескольким основным направлениям:

- подготовка контракта ФАИР-ИЯИ РАН на разработку и изготовление переднего адронного калориметра установки СВМ в ИЯИ РАН в соответствие с вопросами и замечаниями администрации ФАИР;

- разработка конструкторской документации на изготовление модулей калориметра;

 продолжение разработки методов определения центральности в установке СВМ, моделирования точности определения угла плоскости реакции передним адронным калориметром, а также исследования корреляций отклика калориметра с другими детекторными системами СВМ;

- выступления на совещаниях коллаборации СВМ с докладами.

1.5.2.1 Краткое описание установки СВМ

Установка СВМ [2] представляет собой магнитный спектрометр со сверхпроводящим магнитом и ряд детекторных систем для идентификации типа частиц, определения их импульсов, электромагнитного калориметра, а также переднего адронного калориметра – PSD для измерения энергии частиц-спектаторов не участвовавших в процессе взаимодействия налетающего ядра с ядром мишени. Существует две версии установки CBM – одна для детектирования распадов векторных мезонов по их распадам на электрон-позитронные пары, другая, для детектирования распадов на мюонные пары. Адронный калориметр, используется в обеих версиях и служит для определения таких глобальных характеристик взаимодействия как центральность взаимодействия и определение угла плоскости реакции, необходимого для определения потоков частиц.



Рисунок 1.66 - Установка СВМ. Слева - версия для детектирования электрон-позитронных пар. Справа – версия установки для детектирования мюонных пар.

1.5.2.2 Подготовке контракта ФАИР-ИЯИ переднего адронного калориметра

В коллаборации СВМ за разработку и создание переднего адронного калориметра отвечает группа ИЯИ РАН. Работы по разработке этого калориметра ведутся в ИЯИ РАН с 2006г. В апреле 2015г. Технический проект переднего адронного калориметра установки СВМ был окончательно одобрен ФАИР [3] и опубликован, Рисунок 1.65, слева. В этом техническом проекте обобщены результаты моделирования определения плоскости реакции передним калориметра. Детальное техническое описание модулей калориметра, результаты тестов изготовленных прототипов и т.д. также представлены в Техническом проекте этого калориметра.

Далее, в течение полугода готовился и согласовывался с участием ИЯИ текст контракта, который определяет этапы разработки и создания калориметра, а также сроки проведения тестов, доставки и монтажа калориметра на ускорительном комплексе ФАИР. Монтаж калориметра и его запуск планируется завершить в 2019г. Окончательно контракт был подписан в ноябре 2015г., Рисунок 1.67, в центре и справа.

	Page (1478	Crawlene
	Collaboration Contract	Automative to apply the trade of the Andrewson's Faculty States of the Andrewson's
Technical Design Report	Defenser	trant.
for the CBM Experiment	Pacility for Amtgrotice and for Research in Durage Gentl	Hannen Uranga (Hangara) Manatasi Antonominaka kanangang (Hangara)
1 Alexandre Ale	Number for Nuclear Research of the Hazaran Academy of Science	- the Som
Projectile appendix detector (PSD)	For	Authoritants to any an balant of BB
The CBM Collaboration	of the Projectile Special Constants (PSS)	Norme Port Dr. L. & Constant Prantime Term
	Report of the Work Parkage PSP 111102.1	manner and faire 1
	As daily get to data taken	Authoritant in cape to interf of the UNIX Collination state.
ă MM		Factor Halt Dr Friendlanger Finalise (MI Spotsessen) Date St. (2000)
		Ph.
ANK A		1 Kupr
Balder 2010		

Рисунок 1.67 - Копия титульной страницы Технического проекта переднего адронного калориметра установки CBM (слева) и контракта (в центре и справа)

1.5.2.3 Разработка конструкторской документации на изготовление модулей калориметра

PSD (Projectile Spectator Detector) – это модульный адронный калориметр, состоящий из 44 отдельных модулей (Рисунок 1.1.3, слева и в центре) с отверстием диаметром 60мм в центральной части калориметра для прохождения налетающего пучка ядер. В 2015г. были начаты работы по разработке рабочей документации для изготовления модулей калориметра. Каждый модуль адронного калориметра (Рисунок 1.68, справа) имеет поперечный размер 20 х 20 см² и состоит из 60 слоев пластин свинца с толщиной каждой пластины 16мм с расположенными между ними пластинами из пластикового сцинтиллятора толщиной 4 мм. Полная длина модуля калориметра соответствует 5.6 длинам ядерного взаимодействия. Вес одного модуля порядка 500 кг.



Рисунок 1.68 - Чертеж общего вида переднего адронного калориметра (слева) и общий вид спереди (в центре). Схема вида отдельного модуля PSD (справа).

Свет с каждой из 60 сцинтилляционных пластин в модуле собирается с помощью спектросмещающего оптоволокна Кигагау Y11, вклеенного в канавку глубиной 1.2 мм на одной из лицевых поверхностей сцинтилляционной пластины. Все выведенные из сцинтилляторов 60 спектросмещающих оптоволокон укладываются параллельно на верхней поверхности пакета модуля. Оптоволокна с каждых шести последовательно расположенных сцинтилляционных пластин в модуле вклеиваются в соответствующие отдельные оптические разъемы, которые размещены на панели, установленной в конце короба модуля. Таким образом, на этой панели установлены 10 оптических разъемов с лавинными фотодиодами для считывания света с 10 секций модуля. Такая продольная сегментация модуля на 10 секций обеспечивает однородность собирания света по длине модуля. На этой же панели размещен дополнительный оптический разъем с установленным на нем светодиодом, свет от которого передается к лавинным фотодиодам по десяти оптическим волокнам. Один конец оптоволокна вклеен в разъем с установленным на нем светодиодом, а другой конец - в оптический разъем фотодетектора вместе с шестью спектросмещающими волокнами от

сцинтилляционных пластин калориметра с соответствующей секции модуля. Световые импульсы со светодиода используются для контроля работы фотодетекторов.

Сборка из 60 чередующихся слоев сцинтилляционных и свинцовых пластин стягиваются в один пакет лентой из нержавеющей стали толщиной 0.5 мм с помощью специального натяжного механизма. Лента приваривается точечной сваркой к стальным вставкам, установленным в начале, середине и в конце пакета (рис. 1.69)



Рисунок 1.69 - Чертеж общего вида пакета модуля калориметра, который состоит из 60 чередующихся слоев сцинтилляционных и свинцовых пластин, стянутых в пакет лентой из нержавеющей стали с помощью стягивающего механизма (на переднем плане)

После сборки пакета он закрывается верхним коробом, изготовленным также из листа нержавеющей стали толщиной 0.5 мм. Боковые стенки верхнего короба привариваются точечной сваркой к боковым стенкам нижнего короба, к стягивающей ленте, а также к тем же стальным вставкам на пакете.

1.5.2.4 Тестирование прототипа считывающей электроники для переднего калориметра установки СВМ в ЦЕРНе на установке NA61

В 2015г. силами группы ИЯИ впервые на установке NA61 в ЦЕРНе были проведены тестовые измерения отклика модуля адронного калориметра с электроникой считывания, разработанной для модулей адронного калориметра CBM в рамках подписанного в 2015г. соглашения о сотрудничестве между коллаборациями NA61 и CBM и ИЯИ по разработке и тестированию модулей переднего адронного калориметра.

Для унификации считывающей электроники с детекторов CBM с временным съемом информации специалистами центра тяжелых ионов ГСИ (Дармштадт) была разработана

система временного считывания TRB (Time Readout Board). Для тестирования считывающей электроники использовалась третья версия данной платы - TRBv3.

Данная плата позволяет осуществлять одновременное считывание до 260 каналов 23пс (RMS). Это временных отсчетов с точностью лостигается за счет многофункциональных ПЛИС (FPGA) Lattice, на которых собраны быстродействующие ВЦП (TDC). Для контроля работы внешних модулей данная плата имеет возможность работы по медленным протоколам, а также осуществлять сбор данных с пропускной способностью до 400Мб/с. Для считывания и обработки данных используется разработанный для этих целей программный комплекс "DABC + Go4". Считывание сигналов с модуля переднего адронного калориметра установки NA61, полностью идентичного модулю адронного калориметра установки СВМ осуществлялось с помощью дополнительного модуля PaDiWaAmps.

Входной сигнал поступает на линейный усилитель, параметры которого можно настроить согласно требованиям детекторной формы сигнала. Далее часть сигнала идет на вход дискриминатора быстрого импульса. Другая его часть поступает на интегратор, на выходе которого формируется длинный сигнал специальной формы. Задний фронт этого сигнала определяется порогом срабатывания быстрого дискриминатора, за которым следит FPGA. Данная схема слежения запускает цепочку разрядки накопительной емкости линейного усилителя постоянным током через высокое сопротивление. Таким образом, задний фронт получается линейно-спадающим, и после прохождения его через второй дискриминатор, вырабатывает импульс, ширина которого получается пропорциональной амплитуде входного сигнала.

Для тестового сеанса использовались 2 платы PaDiWa-Amps с немного отличающимися модификациями, одна использовалась в ГСИ для считывания сигнала с ФЭУ электромагнитного калориметра, а друга – с пучкового годоскопа установки ХАДЕС. После выбора 5-ти подходящих каналов PaDiWa-Amps на каждой плате, были проведены сеансы считывания данных для протонов энергии 30-158 ГэВ/с. Для считывания использовался модуль 41 калориметра с установленными фотодиодами MPPC (Хамаматсу).

На основе результатов, проводимого в настоящее время анализа полученных данных, будет принято решение о модернизации этой электроники, т.к. она сейчас оптимизирована для считывания информации с электромагнитного калориметра установки ХАДЕС.

1.5.2.5 Моделирование адроноого калориметра CBM – определение центральности и угла плоскости реакции в ядро-ядерных столкновениях.

Для исследования основных характеристик адронного калориметра в 2015г. продолжались работы по детальному моделированию столкновений тяжелых ионов с реалистичными генераторами образования ядер-осколков, и их транспортировкой с использованием GEANT4 через полную геометрию CBM детектора, а также азимутальных потоков рожденных частиц.

Исследовались различные возможности определения центральности ядро-ядерных взаимодействий и ориентации плоскости реакции как с использование только переднего адронного калориметра, который измеряет энергию спектоторов в области передних быстрот, так и его корреляции с другими детекторами CBM, в частности с трековым детектором STS, который измеряет множественность заряженных частиц в области центральных быстрот (midrapidity).

Для этого, каждое событие, измеренное калориметром, разбивалось на 3 составных подсобытия, в соответствии с радиальным положением модулей калориметра в поперечной плоскости (помечены разными цветами и цифрами 1, 2, 3 на рис.9, слева).

На Рисунок 1.1.5, справа, показана, для примера, зависимость точности определения центральности в зависимости от прицельного параметра для реакции AuAu при энергии 10 АГэВ. Видно, что при независимом определении центральности только с помощью калориметра, точность определения центральности составляет порядка 10% для полуцентральных взаимодействий. Таким образом, PSD может обеспечивать независимый метод в определении центральности в СВМ эксперименте с достаточно хорошей точностью. Было показано также, что при использовании калориметра совместно с STS, можно улучшить 5% точность определения центральности до полуцентральных для взаимодействий.



Рисунок 1.70 - Слева – схема разбиения модулей калориметра для измерения энергий спектаторов в 3х подсобытиях -1, 2 и 3. Справа - зависимость разрешения по прицельному параметру в зависимости от центральности взаимодействия для энергии налетающих ядер золота 10 АГэВ при расстояний PSD от мишени 8м

В 2015г. продолжена разработка методики определения плоскости реакции в ядроядерных столкновениях с помощью переднего адронного калориметра. В частности начаты работы по адаптации пакета программ в CBMroot, которые используются в АЛИСЕ для вычисления Q-вектора, необходимого для определения плоскости реакции. Это позволит автоматизировать в значительной степени процесс расчетов азимутальных потоков, как с использованием различных генераторов событий, так и экспериментальных данных. На рисунке 6, слева, показаны распределения для корректирующего фактора, учитывающего разрешение по углу плоскости реакции для эллиптического потока, полученного с помощью этого пакета программ для трех подсобытий для различных детекторных систем установки АЛИСЕ. Для сравнения, на правом рисунке показан корректирующий фактор, полученный для CBM эксперимента с помощью калориметра для ядро-ядерных столкновений при энергии 35 АГэВ. На этом же рисунке показаны и результаты расчета этого фактора для реакции PbPb при энергии 29 АГэВ для аналогичного калориметра установки NA61.



Рисунок 1.71 - Слева – зависимость корректирующего фактора, учитывающего разрешение по углу плоскости реакции, для трех подсобытий для различных комбинаций детекторных систем установки АЛИСЕ. Справа – аналогичная зависимость, полученная для AuAu и PbPb реакций с помощью PSD на установках CBM и NA61 при энергиях ядер порядка 30

АГэВ

В 2015 г. велись работы по установке этого пакета программ и его отладки. В 2016г. планируются проведение систематических исследований азимутальных потоков для различных частиц с помощью этой программы.

1.5.3 Список цитируемой литературы

[1] B. Friman et al., The CBM physics book: Compressed baryonic matter in laboratory

experiments, Lect.Notes Phys. 814, 1 (2011), doi:10.1007/978-3-642-13293-3.

[2] CBM Collaboration, P. Senger and V. F. (Eds.), CBM Report 2013, http://www-alt.gsi.de/documents/DOC-2014-Mar-16-1.pdf (2012).

[3] PSD TDR, https://repository.gsi.de/search?p=id:%22GSI-2015-02020%22

1.5.4 Наиболее важные научные достижения группы ИЯИ в эксперименте СВМ в 2015г.

В октябре 2015г проведен тестовый сеанс на пучке протонов в ЦЕРНе, на котором впервые был измерен отклик модуля калориметра переднего адронного калориметра установки NA61 с прототипом считывающей электроники для калориметра установки CBM. На основе анализа полученных результатов будет принято решение о модернизации этой электроники, т.к. она сейчас оптимизирована для считывания информации с электромагнитного калориметра установки XAДЕС.

В ноябре 2015г. подписан контракт ФАИР-ИЯИ на разработку и изготовление переднего адронного калориметра установки СВМ в ИЯИ РАН и начались подготовительные работы по его разработке и изготовлению.

Продолжались работы по моделированию переднего адронного калориметра с целью разработки методов определения с хорошей точностью центральности и угла плоскости

реакции в столкновениях тяжелых ядер и улучшения точности. Изучались корреляции с другими детекторными системами CBM для более точного определения центральности в различных диапазонах центральности ядро-ядерных взаимодействий.

1.5.5 Список публикаций по тематике СВМ с участием соавторов группы ИЯИ РАН за

2015г.

1) Guber, F. (Editor) ; Selyuzhenkov, I. (Editor), GSI-2015-12020, GSI Darmstadt

Technical Design Report for the CBM Projectile Spectator Detector (PSD)

https://repository.gsi.de/search?p=id:%22GSI-2015-02020%22

2) V. Mikhaylovy, M. Golubeva, A. Kugler, V. Kushpil, S. Seddiki, I. Selyuzhenkov, and P.Tlusty

"Anisotropic flow and reaction plane reconstruction with the CBM Experiment"

Friese, V. (Editor); Sturm, C. (Editor), GSI-2015-01521, GSI, Darmstadt

CBM Progress Report 2014

http://repository.gsi.de/record/97909/files/978-3-9815227-1-6.pdf

3) V. Mikhaylovy, M. Golubeva, A. Kugler, S. Seddiki, I. Selyuzhenkov, and P. Tlusty

"Collision centrality determination in the CBM experiment"

Friese, V. (Editor) ; Sturm, C. (Editor), GSI-2015-01521, GSI, Darmstadt

CBM Progress Report 2014

http://repository.gsi.de/record/97909/files/978-3-9815227-1-6.pdf

4) **V.** Mikhaylov_†, F. Guber, A. Ivashkin, A. Kugler, S. Kushpil, V. Kushpil, O. Svoboda, P.Tlustý, V. Ladygin, S. Seddiki, I. Selyuzhenkov;

"Performance of the forward calorimeters for heavy-ion experiments at FAIR, NICA, and CERN SPS" Отраавлено в PoS, 2015

1.5.6 Список выступлений группы ИЯИ РАН на международных совещаниях и конференциях по тематике CBM

CBM collaboration meeting, 14 – 18 September 2015, Prague, Czech

1). - F.F. Guber Status of the preparation to the PSD construction and nearest plans

2). - A.I.Ivashkin Performance of the slow control system of the PSD at NA61 experiment,

1.6 Эксперимент MPD «Исследование коллективных эффектов и не нуклонных степеней свободы в ядрах, переходных процессов в сжатой ядерной материи при столкновениях протонов и тяжёлых ионов с ядрами», НИКА, Дубна

1.6 Введение

Изучение экстремально горячей и плотной ядерной материи является актуальной задачей современной физики. Особый интерес к таким средам связан с возможностью обнаружить новое и пока слабо изученное состояние материи - так называемую кваркглюонную плазму (КГП), существование которой предсказано современной теорией сильного взаимодействия - квантовой хромодинамикой (КХД). Изучая свойства кваркглюонной плазмы, можно исследовать наиболее фундаментальные проблемы современной физики: уравнение состояния ядерной материи при высоких плотностях, проявление и свойства фазового перехода в состояние деконфаймента, свойства вакуума КХД и восстановление киральной симметрии, свойства кварк-адронной смешанной фазы и наличие критической точки на фразовой диаграмме, а также пролить свет на эволюцию Вселенной и механизмы образования нейтронных звезд.

В последнее время основное внимание физиков было направлено па исследования свойств кварк-глюонной плазмы при высоких энергиях сталкивающихся нуклонов. В результате проведенных экспериментов был обнаружен ряд новых явлений, таких как сильные коллективные потоки вторичных частиц, значительное уширение распределений по поперечным импульсам, повышенный выход странных частиц.

Таким образом, недавние эксперименты указывают на образование нового состояния материи - кварк-глюонной плазмы в столкновениях релятивистских тяжелых ионов. Однако ощущается существенный недостаток экспериментальных данных для полного описания событий в области энергий 2—10 ГэВ. Согласно последним теоретическим представлениям именно в этой области энергии должен наблюдаться фазовый переход между различными состояниями ядерной материи, связанный с кварк-глюонной плазмой. Этот факт стимулирует передовые лаборатории мира предпринять новые усилия для более детального изучения этой области физики. Причем основными требованиями к новым экспериментальным установкам являются высокая светимость ускорительного комплекса и больший аксептапс детектора. Одна из таких установок – ускорительный комплекс НИКА и многоцелевой детектор МПД, создаваемый в ОИЯИ, Дубна. ИЯИ РАН является ответственным за одну из детекторных систем экспериментальной установки – передний адронный калориметр фрагментов.

1.6 Важнейшие результаты, полученные в 2015 г.

В 2015 г. Продолжались работы по разработке переднего адронного калориметра фрагментов для установки MPD/NICA. Калориметр состоит из двух идентичных левой/правой частей, симметрично расположенных относительно точки взаимодействия ионов золота в пучках ускорителя.

Представлен новый технический проект калориметра, в котором предложен вариант детектора с большим аксептансом и поперечными размерами около 1x1 м², рис.1.72. Каждая часть калориметра состоит из 45 индивидуальных модулей размером 15x15 см². Центральный модуль имеет отверстие диаметром 10 см для вакуумной трубы ионного пучка.

Предложенный вариант калориметра обладает точностью восстановления угла плоскости реакции примерно 20⁰, что почти в 2 раза лучше предыдущей версии с компактным калориметром. Кроме того, использование сигналов отдельно с центральных и периферических модулей калориметра позволяет организовать триггер по отбору событий с требуемой центральностью.



Рисунок 1.72 - Схема переднего адронного калориметра фрагментов, предложенного для установки MPD/NICA

Продолжен анализ экспериментальных данных, полученных при исследовании прототипа модуля калориметра на тестовом пучке протонов с энергией 1-6 ГэВ. Экспериментальный модуль состоял из 10 продольных секций с индивидуальным съемом сигнала. Общая длина модуля составляла около 6 длин ядерного взаимодействия λ_i . Показано, что оптимальное энергетическое разрешение может быть получено для модуля с 7 продольными секциями ($4\lambda_i$). Зависимость энергетического разрешения модуля от энергии протонов для различного числа продольных секции представлена на рис.1.73. Модули

данной длины имеют размеры, допустимые для установки в ограниченное пространство внутри сверхпроводящего магнита установки MPD/NICA.



Рисунок 1.73 - Зависимость энергетического разрешения модуля калориметра от энергии протонов при различном числе продольных секций модуля

В настоящее время ведутся работы по схеме интеграции калориметра фрагментов в общую структуру экспериментальной установки. Проводятся исследования нескольких методов энергетической калибровки модулей калориметра в реальных условиях работы детектора на пучке тяжелых ионов.

1.6 Измерение рождения чармония в MPD эксперименте на коллайдере NICA

Измерение состояний чармония по их распаду на пару лептонов в MPD эксперименте на коллайдере НИКА при энергиях $\sqrt{S_{NN}} = 4 - 11$ ГэВ на нуклон может дать важную информацию для решения проблемы аномального подавления J/ ψ мезонов, впервые обнаруженного в ЦЕРНе в эксперименте NA50 в центральных столкновениях Pb-Pb при энергии 158 ГэВ на нуклон. Механизм рождения чармония сложен при высоких энергиях, включает в себя помимо рождения в жестких столкновениях также эффекты рождения в процессе рекомбинации, эффекты горячей ядерной материи, эффекты партонного перерассеяния, поглощения и потери энергии. При низких энергиях ожидается более простой механизм. Однако в настоящее время не имеется измерений сечения рождения чармония в столкновениях тяжелых ионов при энергии ниже $\sqrt{S_{NN}} = 17$ ГэВ. Проведены оценки выходов чармония в эксперименте MPD/NICA.

1.6 Список публикаций за 2015 г.

1 M.Kapishin et. al, MPD Zero Degree Calorimeter Technical Design Report, 2015 http://nica.jinr.ru/files/TDR_MPD/TDR_ZDC. 2 A.B.Kurepin and N.S.Topilskaya "Solving the problem of anomalous J/ψ suppression by the MPD experiment on the NICA collider", Eur. Phys. J A, Topical Issue "NICA White Paper", 2015 - послано в печать

Доклады на конференциях и школах и совещаниях

A.Ivashkin, "Zero Degree Calorimeter at MPD/NICA", NICA Days 2015, Warsaw, 3-7 November, 2015

1.6 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1.6.1 Эксперимент ALICE "Поиск кварк – глюонной материи при столкновении ультрарелятивистских ядер"

В 2015 году на установке ALICE проведены физические измерительные сеансы для рр и PbPb столкновений при энергии 13 ТэВ для pp и 5.02 ТэВ для PbPb столкновений. Детектор T0 принимал участие (100%) во всех измерительных сеансах. Для pp столкновений он является основным люминометром установки ALICE.

Результаты использования данных детектора Т0 представлены в публикациях [1-5] Модернизация, настройка, устранение неполадок, поддержание работоспособности, обеспечение безаварийного процесса измерений и получения экспериментальных данных с детектора Т0 были выполнены практически полностью сотрудниками ИЯИ.

За отчетный период с помощью модели RELDIS были выполнены расчеты сечений электромагнитной диссоциации (ЭМД) ядер свинца с эмиссией нейтронов и протонов вперёд при энергии столкновений на нуклон-нуклонную пару 5.02 ТэВ и определены вклады протонных событий

Всесторонние исследования параметров фотоумножителя на микроканальных пластинах ФЭУ XP 85012 с точки зрения его применения в детекторном устройстве ФИТ позволяет сделать следующие выводы:

- Фотоумножитель XP 85012 подходит для детектора ФИТ. но временной сигнал можно снимать только с общего вывода. При съеме временного сигнала с анодов наблюдаются большие наводки, делающие временные измерения невозможными. Аналоговые сигналы можно снимать и с анодов.

- Фотоумножитель XP 85012 MOD (без общего вывода) подходит, и временные, и амплитудные измерения можно проводить с анодными импульсами. Временные параметры черенковского детектора с этим фотоумножителем лучше, чем со стандартным и удовлетворяют требованиям FIT.

-Оптимальное количество радиаторов –4. При использовании одного радиатора на весь фотокатод фотоумножителя ХР 85012 требуемое временное разрешение (50 пс) может быть достигнуто, но с дополнительными ухищрениями.

В рамках программы исследований дифракционных процессов в эксперименте ALICE в 2015 г. проведены испытания прототипа детектора AD (ALICE Diffraction) на тестовом пучке канала в ЦЕРН. Для выработки быстрого триггера пучка в испытаниях прототипа детектора AD группой сотрудников ЛРЯФ ИЯИ РАН был разработан, испытан и установлен в рабочее положение Телескоп быстрых черенковских детекторов с кварцевыми радиаторами, имеющих временное разрешение около 50 пс. Для усиления и разделения (разветвления) сигналов, поступающих от 12 шт. ФЭУ каждой из "A" и "C" сторон детектора AD на амплитудный и временной каналы измерения в эксперименте ALICE разработан, изготовлен и испытан одноканальный модуль усилителя-разветвителя PASA. На тестовом пучке канала PS T10 в ЦЕРН проведено исследование влияния различных коэффициентов усиления усилителя PASA на максимальный динамический диапазон оцифрованных сигналов.

Предложен эксперимент с фиксированной мишенью на пучках БАК. Проведенные расчеты геометрического аксептанса и выходов J/ ψ -мезонов на фиксированной мишени показывают возможность проведения такого эксперимента с хорошей статистической точностью.

1.6.2 Эксперимент HADES "Исследование рождения векторных мезонов в адрон-

ядерных и ядерно-ядерных взаимодействиях на установке HADES"

В 2015 г. группа ИЯИ РАН продолжала анализ азимутальных потоков частиц, полученных в результате изучения реакции Au+Au при энергии налетающего пучка 1.23 ГэВ на нуклон на установке ХАДЕС. Анизотропные потоки частиц являются независимыми наблюдаемыми для описания свойств и эволюции системы, образующейся в ядро-ядерном взаимодействии. Исследование азимутальных потоков легких изотопов водорода (протонов и дейтронов) расширено на высшие гармоники. Впервые в данном диапазоне энергий удалось выделить ненулевой вклад третьей и четвертой гармоник ряда Фурье, что еще не было достигнуто в других экспериментах при этих энергиях. В 2015 году основной акцент в анализе азимутальных потоков, он был направлен на подготовку публикации результатов по уже хорошо изученным в этой области энергий гармоникам направленного (v1) и эллиптического потоков (v2). Для этого была проведена лучшая детализация этих потоков одновременно по двум кинематическим переменным (p;:y), доступным на установке HADES.

Показано, что имеющаяся статистика также позволит извлекать потоки вплоть до v4 с хорошей двумерной детализацией.

Значительные усилия были уделены изучению систематических эффектов. Обнаруженная систематика пока не приводит к невозможности определения v3. Учет систематических эффектов для гармоники v4 приводит к невозможности её определения для центральных событий, но для периферических её вклад по прежнему остается ненулевой. Проведен детальный анализ на исключение возможных ошибок в процедуре извлечения гармоник v3 и v4 за счет возможных ошибок при фитировании угловых распределений протонов. Показано, что v3 и v1 имеют разную зависимость от поперечного импульса, таким образом нельзя считать, что в проводимом анализе v3 появляется за счет систематической ошибки при извлечении v1. Также на простой модели изучалась зависимость чувствительности v3 и v4 от доступной статистики. В 2015г. был продолжен анализ потоков заряженных каонов К⁺, уточнен аксептанс в котором возможно провести надежное вычитания фона. В целом, было показано, что для каонов желательна специфическая настройка реконструкции и отбора треков, но и в стандартной версии имеется возможность получения нового результата. Для подготовки публикации потребуется сравнение с моделями.

Результаты анализа докладывались на совещаниях коллаборации ХАДЕС, на международной 17 Ломоносовской конференции по физике элементарных частиц, которая состоялась в Москве 20-26 августа 2015г.

Группа ИЯИ РАН продолжила в 2015г. участие в создании новой детекторной системы установки ХАДЕС - электромагнитного калориметра для исследований на пучках как действующего ускорителя SIS18 в GSI, так и создаваемого ускорителя SIS-100 на ФАИР в Дармштадте, Германия. Завершены работы по реконструкции модулей калориметра. В результате около 1000 модулей подготовлено для ИХ дальнейшей сборки с фотоумножителями и системой мониторирования. и для тестирования на стенде в ГСИ, созданном группой ИЯИ.

1.6.3 Эксперимент NA61 «Исследование рождения адронов в адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействиях на ускорителе SPS в ЦЕРН»

Группа ИЯИ принимала участие в подготовке переднего адронного калориметра к сеансам по измерению выходов частиц в реакции сеанс по набору данных в реакции Ar+Sc при энергия ускоренных в SPS ядер аргона 13А, 19А, 30А, 40А, 75А и 150А ГэВ/с, который был проведен в феврале-апреле 2015 г. и в реакции p+Pb взаимодействий при 158 ГэВ/с в

октябре 2015г. Группа ИЯИ обеспечивала работоспособность калориметра и контроль качества данных во время сеанса, участвовала в рабочих сменах NA61 во время этих сеансов.

Была разработана конструкция и изготовлен дополнительный короткий модуль калориметра для улучшения отклика калориметра в экспериментах с более тяжелыми ядрами. Он представляет собой короткий (2 секции) модуль, который аналогичен по своей структуре центральным модулям адронного калориметра, но имеет некоторые особенности, связанные с его использованием в эксперименте.

Проведены Монте Карло расчеты утечек адронного ливня во всем калориметре, возникающих при прохождении адронов и тяжелых ионов с энергией в диапазоне 13 - 150 ГэВ через калориметр, а также энергетического разрешения и линейности отклика переднего адронного калориметра без дополнительного модуля и с учетом дополнительного модуля, который установлен непосредственно в пучке перед адронным калориметром.

Для обеспечения работы этого короткого модуля в условиях высоких загрузок и большого динамического диапазона в планируемых экспериментах на прямых пучках тяжелых ионов, в нем были использованы фотодиоды MPPC (Hamamatsu), с более быстрым временем восстановления, вместо используемых в настоящее время фотодиоды MAPD-3A (Zecotec). Также была произведена замена используемых в настоящее время в одном из центральных модулей лавинных фотодетекторов MAPD-3A на более быстрые фотодетекторы MPPC. В этих же двух модулях проведена модернизация аналоговой электроники.

ИЯИ РАН участвует в разработке и изготовлении аналогичного переднего адронного калориметра фрагментов для эксперимента CBM, который готовится на ускорительном комплексе SIS100 ФАИР (FAIR) в Дармштадте. В 2015г. было подписано соглашение о сотрудничестве между коллаборациями NA61 и CBM и ИЯИ по сотрудничеству в разработке и тестированию модулей переднего адронного калориметра. В рамках этого сотрудничества, во время тестового протонного сеанса в октябре 2015г.на установке NA61, группой ИЯИ были проведены измерения отклика модуля калориметра с электроникой считывания, разработанной для модулей калориметра CBM.

Проведены тестовые измерения отклика модуля калориметра с электроникой считывания на базе модуля CAEN на базе чипа DRS4.

В настоящее время на установке NA61 готовится модернизация электроники считывания на базе этого чипа многих детекторов установки, включая и адронный калориметр. Поэтому, полученные результаты позволят подготовить программное обеспечение и разработать метод анализа данных с калориметра после такой модернизации.

Выполнена калибровка переднего адронного калориметра с дополнительным коротким модулем на пучках мюонов и адронов.

- Группа ИЯИ участвовала в разработке и подготовке нового Меморандума с предложением по проведению скана по энергии для реакции Pb+Pb, который был представлен для рассмотрения в SPSC. Проведены Монте Карло расчеты точности определения угла плоскости реакции для измерения потоков частиц в Pb+Pb взаимодействиях с помощью переднего адронного калориметра в эксперимента на установке NA61.

Группа ИЯИ участвовала в анализе данных, полученных для реакции Be + Be, Ar+Sc и Pb+Pb.

Разработана программа для коррекции амплитудных распределений сигналов в секциях модулей калориметра, вызванных нестабильностью работы считывающей электроники калориметра.

Группа ИЯИ принимала участие в рабочих совещаниях NA61(SHINE) и выступала с докладами при обсуждении полученных результатов и координации работ на установке. Были представлены доклады на международных конференциях.

По теме 4: Эксперимент CBM «Исследование свойств сжатой барионной материи на установке CBM в GSI (Дармшадт, Германия)»

В течение 2015г. велись работы по моделированию переднего адронного калориметра с целью разработки методов определения центральности и угла плоскости реакции в столкновениях тяжелых ядер и улучшения точности. Изучались корреляции с другими детекторными системами СВМ для более точного определения центральности в ядроядерных взаимодействий.

В октябре 2015г проведен тестовый сеанс на пучке протонов в ЦЕРНе, на котором впервые был измерен отклик модуля калориметра переднего адронного калориметра установки NA61 с прототипом считывающей электроники, разработанным для калориметра установки CBM. На основе результатов, проводимого в настоящее время анализа полученных данных, будет принято решение о модернизации этой электроники, т.к. она сейчас оптимизирована для считывания информации с электромагнитного калориметра установки XAДЕС.

В ноябре 2015г. подготовлен и подписан контракт ФАИР-ИЯИ на разработку и изготовление переднего адронного калориметра установки СВМ в ИЯИ РАН. Начаты работы по разработке конструкторской документации на изготовление модулей калориметра.

1.6.4 Эксперимент MPD «Исследование коллективных эффектов и не нуклонных степеней свободы в ядрах, переходных процессов в сжатой ядерной материи при столкновениях протонов и тяжёлых ионов с ядрами»

В течение 2015г. велись работы по моделированию переднего адронного калориметра фрагментов с целью разработки методов определения центральности и угла плоскости реакции в столкновениях тяжелых ядер и улучшения точности. Изучались корреляции с другими детекторными системами НИКА/МПД для более точного определения центральности в ядро-ядерных взаимодействий. Был представлен новый технический проект калориметра. Предложен вариант детектора с большим аксептансом и поперечными размерами.

Измерение состояний чармония по их распаду на пару лептонов в MPD эксперименте на коллайдере НИКА при энергиях $\sqrt{S_{NN}} = 4 - 11$ ГэВ на нуклон может дать важную информацию для решения проблемы аномального подавления J/ ψ мезонов. Однако в настоящее время не имеется измерений сечения рождения чармония в столкновениях тяжелых ионов при энергии ниже $\sqrt{S_{NN}} = 17$ ГэВ. Проведены оценки выходов чармония в эксперименте MPD/NICA.

2 Лаборатория фотоядерных реакций

Руководитель темы: д.ф.-м.н., профессор Владимир Георгиевич Недорезов Основные исполнители:

Гуревич Григорий Манович	д.фм.н.	зав. сект.
Джилавян Леонид Завенович	к.фм.н.	Снс
Долбилкин Борис Сергеевич	д.ф-м.н.,	B.H.C.
Кондратьев Рудольф Леонидович	к.ф-м.н.,	C.H.C
Лапик Александр Михайлович		н.с.
Лисин Валерий Павлович	к.ф-м.н	зав.сект.
Мушкаренков Александр Николаевич	к.ф-м.н	н.с.
Недорезов Владимир Георгиевич	д.ф. - м.н.	зав.лаб.
Полонский Андрей Леонидович	к.ф-м.н.,	н.с.
Руднев Николай Вячеславович		M.H.C.
Русаков Артур Владимирович		н.с.
Солодухов Геннадий Васильевич	к.ф-м.н	зав.сект.
Сорокин Юрий Иванович	к.ф-м.н	н.с.
Тулупов Борис Алексеевич	к.ф-м.н	C.H.C
Туринге Андрей Арисович	к.ф-м.н	с.н.с.

2 ΡΕΦΕΡΑΤ

Отчет содержит 8 страниц, перечень публикаций из 41 наименования.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЯДЕР, НУКЛОН, ФОТОН, МЕЗОН

В отчете приведены новые результаты, полученные в 2015 году в лаборатории фотоядерных реакций ИЯИ РАН по физике электромагнитных взаимодействий нуклонов и ядер. Особое внимание уделено изучению поляризационных эффектов и спиновой структуры нуклонов. Начато изучение нелинейных эффектов квантовой электродинамики во взаимодействиях интенсивных электромагнитных полей с веществом на пучках электронов, релятивистских ионов и фемтосекудных тераваттных лазеров. Все приведенные в отчете результаты являются новыми и соответствуют мировому уровню.

Цель работы: прецизионное исследование электромагнитных взаимодействий нуклонов и ядер; исследование свойств адронов в ядерной среде, изучение их связанных состояний (мезонные ядра, дельта-ядра, гиперядра); изучение нелинейных эффектов квантовой электродинамики во взаимодействиях интенсивных электромагнитных полей с веществом на пучках релятивистских ионов, электронов и фемтосекудных тераваттных лазеров;

2 Введение

За последние годы изучение электромагнитных взаимодействий ядер в ведущих научных центрах США, Японии, Германии и других стран характеризовалось существенным расширением тематики исследований и применением новых методов. Это включало в себя прецизионное измерение амплитуд фоторождения мезонов на свободных и связанных нуклонах, изучение спиновых структурных функций и формфакторов нуклонов,

исследование коллективных возбуждений ядер (гигантских резонансов), фото – и электроделения ядер. Эксперименты выполнялись на пучках реальных и виртуальных фотонов, релятивистских ионов и фемтосекундных лазеров с большой импульсной мощностью. На этой основе развивались прикладные исследования с использованием фотоядерных методов для создания систем безопасности, детектирования взрывчатых веществ и делящихся материалов, медицинской диагностики и др. В настоящем отчете приведены результаты исследований, выполненных в лаборатории фотоядерных реакции ИЯИ РАН в рамках указанной тематики.

2 Основная часть. Содержание отчета.

Приведенные результаты относятся к следующим направлениям исследований:

1. Электромагнитные взаимодействия нуклонов и ядер; свойства адронов и их связанных состояний в ядерной среде (мезонные ядра, дельта-ядра, гиперядра).

2. Свойства гигантских резонансов в ядрах.

3. Нелинейные эффекты квантовой электродинамики во взаимодействиях интенсивных электромагнитных полей с веществом на пучках релятивистских ионов, электронов и фемтосекундных тераваттных лазеров.

 Методики получения и использования короткоживущих изотопов на электронных ускорителях.

5. Источник медленных нейтронов на базе линейного ускорителя ЛУЭ-8.

Результаты:

1. Исследованы реакции множественного рождения мезонов и мультифрагментации ядер углерода, а также их полные сечения фотопоглощения в области энергий фотонов от 700 до 1500 МэВ. Измерена вероятность вылета нуклонов различной множественности вплоть до полного развала ядра углерода на отдельные нуклоны (рисунок 2.1). Полученные данные интерпретированы в рамках теоретической модели RELDIS.



Рисунок 2.1 - Вероятность распада ядра углерода под действием фотонов с энергией 700 – 500 МэВ на протоны и нейтроны с разной множественностью. Точки – эксперимент, гистограмма – расчет по каскадно-испарительной модели RELDIS.

Проведена сборка и наладка основных элементов детектора BGO-OD в эксперименте на ускорителе ELSA (Бонн, Германия). Проведены пучковые испытания и получены предварительные данные по фоторождению мезонов и фрагментации ядер при энергии фотонов до 4 ГэВ.

2. В рамках задачи «полного опыта» в фоторождении мезонов на нуклонах получены первые в мире данные по спиновым асимметриям для реакции $\gamma p \rightarrow \pi^0 \eta p$ при энергиях фотонов от 1050 до 1450 МэВ. Измерения выполнены международной коллаборацией А2 на ускорителе MAMI C с использованием детектора Crystal-Ball/TAPS и протонной поляризованной мишени ОИЯИ-ИЯИ. Полученные данные подтверждают предположение о доминировании в этой реакции амплитуды $\Delta 3/2^-$. Результаты чувствительны к небольшим вкладам от других парциальных волн.

3.Коллаборацией A2 на ускорителе МАМІ С выполнены измерения асимметрий комптоновского рассеяния на протоне в области энергий Δ-резонанса с использованием пучка циркулярно/линейно поляризованных фотонов и продольно/поперечно поляризованной протонной мишени, созданной сотрудниками ОИЯИ и ИЯИ РАН. Из данных измерений впервые получены экспериментальные значения всех четырех спиновых поляризуемостей протона, которые описывают реакцию спина протона на воздействие налетающего поляризованного фотона.

4. На ускорителе МАМІ С выполнены измерения дифференциальных сечений фоторождения ω -мезонов на протоне при энергиях налетающих фотонов от порога реакции $\gamma p \rightarrow \omega p$ до 1400 МэВ в пределах полного углового диапазона. Высокое качество данных

вблизи порога открывает доступ к ряду интересных физических аспектов процесса. В частности, получена оценка длины ωN-рассеяния.

5. Исследовано фоторождение $\pi\eta$ -пар на нуклонах от порога до энергии налетающих фотонов 1.4 ГэВ. Впервые выполнены измерения квазисвободных реакций $\gamma p \rightarrow p\pi^0 \eta$, $\gamma n \rightarrow n\pi^0 \eta$, $\gamma p \rightarrow n\pi^+ \eta$ и $\gamma n \rightarrow p\pi^- \eta$ на нуклонах, связанных в дейтроне. Чтобы исследовать эффекты взаимодействия в конечном состоянии, были также изучены соответствующие реакции на протонной мишени. Для конечного состояния $\pi^0 \eta$ было также исследовано когерентное рождение в реакции $\gamma d \rightarrow d\pi^0 \eta$. Эксперименты проведены на пучке меченых фотонов ускорителя MAMI с использованием 4π - электромагнитного калориметра на основе детекторов Crystal Ball и TAPS. Выполнено сравнение экспериментальных результатов с предсказаниями изобарной модели.

6. На пучке меченых фотонов от ускорителя МАМІ С коллаборацией А2 измерены дифференциальные сечения реакции $\gamma p \rightarrow \pi^0 p$ вплоть до энергии в системе центра масс W=1.9 ГэВ. Новые результаты, полученные с высоким энергетическим и угловым разрешением, увеличивают существующую базу данных по фоторождению π^0 на ~47%. Благодаря беспрецедентной статистической точности и покрытию полного углового диапазона результаты чувствительны к высшим парциально-волновым амплитудам.

7. Измерены полные сечения, угловые распределения и распределения инвариантных масс для фоторождения $\pi^0\pi^0$ пар на свободных протонах и на нуклонах, связанных в дейтроне. Измерения выполнены на ускорителе МАМІ при энергиях энергетически меченых фотонов до 1400 МэВ. Результаты по дифференциальным сечениям для свободных и квазисвободных протонов почти идентичны по форме, но отличаются по абсолютной величине на $\leq 15\%$, что указывает на присутствие эффектов взаимодействия в конечном состоянии. Данные для квазисвободных нейтронов аналогичны протонным данным в области второго резонанаса, но различаются при более высоких энергиях. Проведено сравнение с расчетами по двухпионной модели МАІD и модели связанных каналов Бонн-Гатчина.

8. Выполнены измерения эффективности регистрации нейтронов с энергией до 400 МэВ в кристаллах NaI детектора Crystal Ball. Данные об эффективности получены из исследования фоторождения π^0 -мезонов на дейтериевой мишени с использованием пучка энергетически меченых фотонов от ускорителя MAMI.

9. Предложен проект вывода поляризованных гало-антипротонов из накопителя установки FAIR с помощью изогнутого кристалла кремния и магнитного септума для проведения экспериментов с твердой поляризованной мишенью. Для мишени длиной 10 см расчетная светимость составляет 10³⁰ см⁻²с⁻¹.

10. Содружеством ИЯИ РАН, НИЯУ ("МИФИ") и Cyclotron Institute, Texas A&M University (США) проведены работы по изучению высокоэнергетических изоскалярных монопольных (ИСМ) возбуждений типа частица-дырка (p-h) в средне-тяжелых ядрах с целью определения коэффициента сжимаемости ядерной материи. В рамках частичнодырочной дисперсионной оптической модели изучена усредненная по энергии изоскалярных монопольных возбуждений двойная переходная плотность для ядра ²⁰⁸Pb в широком энергетическом интервале, включающем изоскалярный гигантский монопольный резонанс и его обертон. Проанализированы усредненные по энергии силовые функции указанных гигантских резонансов. Изучены теоретические аспекты возможности восстановления унитарности, нарушаемой в модели вследствие использования оптического потенциала.

11. С помощью γ - активационной методики на тормозном пучке с максимальной энергией 55 МэВ исследовано фоторасщепление изотопов титана. Определены выходы и интегральные сечения фотопротонных реакций на изотопах ^{47, 48, 49, 50}Ti. Показано, что расчеты по программе TALYS, не учитывающей изоспиновую структуру ГДР, не описывает выход фотопротонных реакций на тяжелых изотопах титана ^{49, 50}Ti.

12. Изучены общие отличия в сечениях фотоядерных реакций и параметрах гигантского резонанса в ядрах, связанные с использованием спектров тормозных фотонов Шиффа, Зельцера и Бергена. Показано, что структура в сечениях исследуемых реакций зависит также от типа мониторирования пучков.

13. В диапазоне энергий фотонов от 4 до 46 МэВ измерены сечения реакции 115 In(γ , γ')^{115m}In. Показано, что энергии фотонов около 27 МэВ второй пик отсутствует. Уточнены параметры пика вблизи порога реакции 15 In(γ , n). Рассмотрены возможности использования этой реакции для мониторирования потоков тормозных фотонов в гамма-активационных работах.

14. Разработана методика выделения вклада изовекторного электрического квадрупольного гигантского резонанса на фоне доминирующего изовекторного электрического дипольного гигантского резонанса при измерении асимметрии вперед-назад вылета быстрых нейтронов в реакции (γ , n) на изотопах свинца с помощью пороговых нейтронных детекторов.

15. Для сечений реакций ${}^{14}N(\gamma, 2n){}^{12}N$, ${}^{14}N(\gamma, 2p){}^{12}B$, ${}^{13}C(\gamma, p){}^{12}B$, используемых в разрабатываемом фотоядерном методе обнаружения скрытых взрывчатых веществ, проведены компиляция известных экспериментальных и модельно-расчетных данных, а также самостоятельные расчеты по программам TALYS и EMPIRE. Получены указания на существенное занижение уровней модельно рассчитанных величин по сравнению с доступными результатами измерений.

16. В рамках моделей взаимодействия излучения с веществом, реализованных в программах GEANT и MCNP, проведены расчеты эмиссии γ-квантов, электронов, позитронов из характерных мишеней при распадах радиоизотопов ¹²N и ¹²B, образованных в этих мишенях.

16. Разработана методика фотоядерного получения и радиохимического извлечения образуемого в мишени из металлического цинка естественного изотопного состава в результате реакции 68 Zn(γ , p) радионуклида 67 Cu, применяемого в медицине для радиоиммунотерапии.

17. Разработана методика экспериментального определения выходов реакций ${}^{14}N(\gamma, 2n){}^{12}N$ и ${}^{14}N(\gamma, 2p){}^{12}B$ при $E_e \sim 50$ МэВ с учетом выхода фоновой реакции ${}^{13}C(\gamma, p){}^{12}B$.

18. Совместно с ЛАЯ и ЛНИ ИЯИ РАН создана компьютерная модель фотонейтронного W-Ве-источника тепловых нейтронов, проведены исследования и расчеты параметров источника с целью получения максимальной плотности потока тепловых нейтронов в центре замедлителя. Оптимизация параметров источника выполнена с помощью программы MCNP5 (Monte-Carlo-N-Particle), моделирующей процессы взаимодействия, гамма-квантов, электронов и нейтронов с конструкционными материалами источника. Оценены значения потоков быстрых и тепловых нейтронов внутри и снаружи источника. Показана возможность достижения плотности тепловых нейтронов в измерительной полости порядка 10⁸ нейтрон/см²/с.

19. С учетом результатов моделирования изготовлен прототип фото-нейтронного W-Be- источника тепловых нейтронов (рис.2). В источнике предусмотрены внутренняя полость для облучения образцов тепловыми нейтронами, и каналы для вывода тепловых и быстрых нейтронов из источника. Проведен монтаж источника на пучке электронов линейного ускорителя ЛУЭ-8-5 ИЯИ РАН. Для оптимизации параметров источника проведены дополнительные работы: установлен дополнительный вакуумпровод, проведена юстировка пучка, установлено дополнительное охлаждение вольфрамовой мишени. Проведены пробные сеансы на пучке электронов ускорителя ЛУЭ-8-5. Плотность потока тепловых нейтронов в измерительной полости источника была оценена по активации образца Cu-64 и составила ~107 нейтрон/см2с при среднем токе электронов 10 мкА. Проведено измерение потока быстрых нейтронов в выводном канале источника.



Рисунок 2.2 - Фотонейтронный источник в процессе монтажа на ускорителе ЛУЭ-8-ИЯИ РАН.

2 ПУБЛИКАЦИИ:

- реферируемые журналы (включая работы, принятые к печати)

1. P.P.Martel, G.Gurevich, R Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. Measurements of Double-Polarized Compton Scattering Asymmetries and Extraction of the Proton Spin Polarizabilities. Phys. Rev. Lett. 114, 112501 (2015).

2. M.Martemianov, G.Gurevich, R Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. A new measurement of the neutron detection efficiency for the NaI Crystal Ball detector. Journal of Instrumentation JINST, 10, T04001 (2015).

3. I.I.Strakovsky, R Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. Photoproduction of the ω meson on the proton near threshold. Phys. Rev. C 91, 045207 (2015).

4. J.R.M.Annand, G.Gurevich, R Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. First measurement of target and beam-target asymmetries in the $\gamma p \rightarrow \pi^0 \eta p$ reaction. Phys. Rev. C 91, 055208 (2015).

5. A.Kaeser, R Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. The isospin structure of photoproduction of $\pi\eta$ pairs from the nucleon in the threshold region. Phys. Lett. B 748, 244 (2015).

6. P. Adlarson, G.Gurevich, R.Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. Measurement of π^0 photoproduction on the proton at MAMI C. Phys. Rev. C 92, No. 2, 024617 (2015).

7. M. Dieterle, R Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. Photoproduction of π^0 -pairs off protons and off neutrons. Eur. Phys. J. A, 51, 142 (2015).

8. S.Schumann, G.Gurevich, R Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. Threshold π^0 hotoproduction on transverse polarized protons at MAMI. Phys. Lett. B (in print).

9. М.Л.Горелик, Ш.Шломо, Б.А.Тулупов, М.Г.Урин "О свойствах высокоэнергичных изоскалярных монопольных возбуждений в среднетяжелых сферических ядрах", ЯФ, т. 78, стр. 595, 2015.

10. M.L.Gorelik, S.Shlomo. B.A.Tulupov, M.H.Urin "Properties of high-energy isoscalar monopole excitation in medium-heavy mass spherical nuclei", Phys.At.Nucl., v.78, p.551, 2015.

11. M.L.Gorelik, S.Shlomo. B.A.Tulupov, M.H.Urin "On Properties of High-Energy Isoscalar Monopole (p-h)-Type Excitations in Medium-Heavy Mass Spherical Nuclei", EPJ Web of Conferences (принято к печати).

12. M.L.Gorelik, S.Shlomo. B.A.Tulupov, M.H.Urin "Investigation of the energy-averaged double transition density of isoscalar monopole excitations in medium-heavy mass spherical nuclei", Physical Review (послано в печать).

13. Л.З.Джилавян, А.М.Лапик, Б.А.Тулупов "Разделение вкладов изовекторных *E*2 и *E*1 гигантских резонансов в прямых и обратных реакциях с реальными и виртуальными фотонами", ЭЧАЯ (послано в печать).

14. С.С. Белышев, Л.З. Джилавян, Б.С. Ишханов, И.М. Капитонов, А.А. Кузнецов, В.Н. Орлин, К.А. Стопани. «Фотоядерные реакции на изотопах титана». Ядерная физика, 2015, том 78, №3-4, с. 246–255.

15. S.S. Belyshev, L.Z. Dzhilavyan, B.S. Ishkhanov, I.M. Kapitonov, A.A. Kuznetsov, V.N. Orlin, and K.A. Stopani. "Photonuclear Reactions on Titanium Isotopes". Physics of Atomic Nuclei, 2015, Vol. 78, No.2, pp. 220–229.

16. Л.З. Джилавян. «Экспериментальные параметры изовекторного *E*1-гигантского резонанса в зависимости от корректности учета спектров тормозных фотонов». Известия РАН. Серия физическая. 2015, том 79, № 4, с. 581–586.

17. L. Z. Dzhilavyan. "Experimental Parameters of the Isovector *E*1 Giant Resonance, Depending on the Correctness of Bremsstrahlung Photon Spectra Calculations". Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics, 2015, Vol. 79, No. 4, pp. 537–542.

18. Л.З. Джилавян. «Сечение реакции 115 In(γ, γ') 115m In в области *E*1 гигантского резонанса». Ядерная физика, 2015, том 78, №7-8, с. 668–677.

19. L.Z. Dzhilavyan. "Cross Section for the Reaction $^{115}In(\gamma, \gamma')^{115m}In$ in the Region of the *E*1 Giant Resonance". Physics of Atomic Nuclei, 2015, Vol. 78, No. 5, pp. 624–633.

20. Л.З. Джилавян. «Возможность разделять изовекторные *E*1 и *E*2 гигантские резонансы при измерении асимметрии вылета нейтронов с помощью пороговых детекторов» Известия РАН. Серия физическая. 2015, том 80, № 3.

21. О.И. Ачаковский, С.С. Белышев, Л.З. Джилавян, Ю.Н. Покотиловский. «Сечения реакций ¹⁴N(γ , 2n)¹²N, ¹⁴N(γ , 2p)¹²B, ¹³C(γ , p)¹²B». Известия РАН. Серия физическая. 2015, том 80, № 3.

22. С.С. Белышев, Л.З. Джилавян, Ю.Н. Покотиловский. «Эмиссия γ-квантов, электронов, позитронов из характерных мишеней при распадах образованных в этих мишенях ¹²N и ¹²B». Известия РАН. Серия физическая. 2015, том 80, № 3.

23. V.Nedorezov, A. Lapik, A.Mushkarenkov, V. Nedorezov, A.Turinge, N.Rudnev e.a. (GRAAL collaboration), Disintegration of 12 C nuclei by 700–1500 MeV photons, Nucl.Phys. A940 (2015) 264-278.

24. P. Levi Sandri, V.Nedorezov, A. Lapik, A.Mushkarenkov, V. Nedorezov, A.Turinge, N.Rudnev. e.a. First Measurement of the Σ Beam Asymmetry in η ' Photoproduction off the Proton near Threshold, Eur.Phys.J. A51 (2015) 7, 77.

25.A.А.Туринге*, А.М.Лапик, А.М.Мушкаренков, В.Г.Недорезов N.Rudnev. Fragmentation of Light Nuclei by Intermediate Energy Photons. , Phys.Part.Nucl.Lett. 11 (2014) 54-59.

26. K.A.Ivanov, A.V.Rusakov, A.A.Turinge, V.Nedorezov e.a. (9 authors). Novel photonuclear techniques based on femtosecond lasers, Phys.Part.Nucl.Lett. 11 (2014) 54-59.

27. V. Vegna, A. Lapik, A.Mushkarenkov, V. Nedorezov, A. Ignatov, A.Turinge, N.Rudnev, e.a. . Measurement of the Σ beam asymmetry for the ω photo-production off the proton and the neutron at GRAAL. Phys.Rev. C91 (2015) 6, 065207.

- доклады на конференциях и школах

1. Г.М.Гуревич. Измерение спиновых поляризуемостей протона. Восьмые Черенковские чтения. Москва, ФИАН, 14.04.2015.

2. G.M.Gurevich. First measurement of the proton spin polarizabilities. 65 International conference NUCLEUS-2015 (Saint-Petersburg, June 29 – July 3, 2015). Book of abstracts, p. 54 (2015).

3. G.M.Gurevich, A.A.Lukhanin, F.Maas, Yu.A.Plis, A.O.Sidorin, A.V.Smirnov, A.Thomas, Yu.A.Usov. On the feasibility of using an extracted polarized antiproton beam of the HESR with a solid polarized target. XVI International Workshop in Polarized Sources, Targets and Polarimetry. PSTP2015, Ruhr-University Bochum, Germany, 14-18 September 2015.

4. G.M.Gurevich, V.P.Lisin. Measurement of the proton spin polarizabilities at MAMI. XIV International Seminar on Electromagnetic Interactions "EMIN-2015" Moscow, October 5-8, 2015.

5. M.L.Gorelik, S.Shlomo. B.A.Tulupov, M.H.Urin. Unitarity of the particle-hole dispersive optical model. 65 International conference NUCLEUS-2015 (Saint-Petersburg, June 29 – July 3, 2015). Book of abstracts, p. 145 (2015).

6. M.L.Gorelik, S.Shlomo. B.A.Tulupov, M.H.Urin. On Properties of High-Energy Isoscalar Monopole (p-h)-type Excitations in Medium-Heavy Mass Spherical Nuclei, The International Conference "Nuclear Structure and Related Topics" NSRT-2015, Dubna, Russia. Book of Abstracrs, p.38.

7, M.L.Gorelik, S.Shlomo. B.A.Tulupov, M.H.Urin. Properties of High-Energy Isoscalar Monopole Excitations in Medium-Heavy Mass Spherical Nuclei. XIV International Seminar on Electromagnetic Interactions "EMIN-2015" Moscow, October 5-8, 2015.

8. S.S.Verbitsky, L.Z.Dzhilavyan, A.M.Lapik, V.N.Ponomarev, A.V.Rusakov, B.A.Tulupov. Scintillation Spectrometer Ability for Forward-to-Backward Asymmetry Measuring at Neutron Emission in (γ , n_0)-Reactions. XIV International Seminar on Electromagnetic Interactions "EMIN-2015" Moscow, October 5-8, 2015.

9. L.Z. Dzhilavyan. "Possibilities to separate IVE1 & IVE2 giant resonances by forward-tobackward asymmetries measured with neutron threshold detectors". Book of abstracts of LXV International Conference "Nucleus 2015" (editor A.K. Vlasnikov). Saint-Petersburg State University. Saint-Petersburg. 2015. P. 109.

10. O.I. Achakovskiy S.S. Belyshev, L.Z. Dzhilavyan, Yu.N. Pokotilovski. "Cross sections of the reactions ${}^{14}N(\gamma, 2n){}^{12}N$, ${}^{14}N(\gamma, 2p){}^{12}B$, ${}^{13}C(\gamma, p){}^{12}B$ ". Book of abstracts of LXV International Conference "Nucleus 2015" (editor A.K. Vlasnikov). Saint-Petersburg State University. Saint-Petersburg. 2015. P. 109.

11. S.S. Belyshev, L.Z. Dzhilavyan, Yu.N. Pokotilovski. "Emission of γ -quanta, electrons, positrons from characteristic targets at decays of produced in the targets ¹²N and ¹²B". Book of abstracts of LXV International Conference "Nucleus 2015" (editor A.K. Vlasnikov). Saint-Petersburg State University. Saint-Petersburg. 2015. P. 269.

12. Р.А. Алиев, С.С. Белышев, В.В. Ханкин, А.А. Кузнецов, Г.С. Алешин, А.Б. Приселкова, Л.З. Джилавян, С.Н. Калмыков, Б.С. Ишханов. Возможности фотоядерного получения медицинских радионуклидов. VIII Всероссийская конференция по радиохимии «Радиохимия – 2015 (г. Железногорск Красноярского края, 28 сентября – 2 октября 2015 г.)», Секция 7 «Ядерная медицина». Тезисы докладов. С. 430.

13. L.Z. Dzhilavyan. "About yield measuring for the reactions ${}^{14}N(\gamma, 2n){}^{12}N$ and ${}^{14}N(\gamma, 2p){}^{12}B$ ". Proceedings of the XIIV International Seminar on ElectroMagnetic Interactions of Nucleai (EMIN – 2015, October 5-5 Moscow, Russis). INR RAS, Moscow, 3 pp.

14.B.Bantes, V.Nedorezov, A. Lapik, A.Mushkarenkov, V. Nedorezov, N.Rudnev e.a. The BGO Calorimeter of BGO-OD Experiment. , J.Phys.Conf.Ser. 587 (2015) 1, 012042.

15. V.Nedorezov. Multifragmentation of nuclei: new experimental approaches and results, PoS BaldinISHEPPXXII (2015) 042.

16. I.A.Pshenichnov, V.Nedorezov, A.Turinge, Multifragment break-up of 12-C in photonuclear reactions: a theorist's point of view, in PoS BaldinISHEPPXXII (2015) 046.

17. Andreev A.V, Ilic R.D., Konobeevsky E.S., Latysheva L.N., Sobolevsky N.M., Solodukhov G.V., Zuyev S.V. Optimization of a Photoneutron W-Be-source of thermal neutrons. Тезисы доклада на Международной конференции «Ядро 2014», Минск, 2014 г.

18. Andreev A.V., Burmistrov Yu.M., Gromov A.V., Konobeevski E.S., Mordovskoy M.V., Solodukhov G.V., Zuyev S.V./ W-Be PHOTONEUTRON SOURCE OF INR RAS // LXV International Conference on Nuclear Physics «Nucleus 2015. New Horizons in Nuclear Physics, Nuclear Engineering, Femto- and Nanotechnologies». June 29 – July 3, 2015, Peterhof, Saint-Petersburg.

19. Andreev A.V., Burmistrov Yu.M., Konobeevski E.S., Pletnikov E.V., Sitnikov N.M., Zuyev S.V. / NEUTRON ACTIVATION ANALYSIS OF AEROSOL FILTERS AT PHOTONEUTRON SOURCE OF INR RAS // LXV International Conference on Nuclear Physics «Nucleus 2015. New Horizons in Nuclear Physics, Nuclear Engineering, Femto- and Nanotechnologies». June 29 – July 3, 2015, Peterhof, Saint-Petersburg.

20. A.Andreev1, Yu.Burmistrov1, A.Gromov1, R.Ilić2, E.Konobeevsky1, E.Koptelov1, L.Latysheva1, M.Mordovskoi1, V.Ponomarev1, S.Potashev1, A.Rogov3, S.Sabinin1, S.Sidorkin1, N.Sobolevsky1, G.Solodukhov1, V.Tishin1, S.Zuyev1 «Mathematical modeling of neutron sources on the basis of fragmentation and spallation processes and (γ ,n) reactions» 1Institute for Nuclear Research RAS, Moscow, Russia 2"VINČA" Institute of Nuclear Sciences, Belgrade, Serbia 3Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia. NUFRA2015, Kemer, Turkey, October 2015.

- препринты

1. M.Martemianov, G.Gurevich, R Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. A new measurement of the neutron detection efficiency for the NaI Crystal Ball detector. arXiv: 1502.07317v1[physics.ins-det].

2. P. Adlarson, G.Gurevich, R.Kondratiev, V.Lisin, A.Mushkarenkov, A.Polonski et al. Measurement of π^0 photoproduction on the proton at MAMI C. arXiv: 1506.08849 [hep-ex].

3. Л.З. Джилавян. «Возможности разделять IVE1 и IVE2 гигантские резонансы при измерении асимметрии вперед-назад вылета нейтронов с помощью пороговых детекторов» Препринт ИЯИ РАН, Москва, 1402/2015. 1402/2015, июнь 2015.

4. С.С. Вербицкий, Л.З. Джилавян, А.М. Лапик, В.Н. Пономарев, А.В. Русаков, Б.А. Тулупов. Об измерении асимметрии вперед-назад вылета нейтронов в реакциях (ү, n₀) с помощью сцинтилляционных спектрометров. Препринт ИЯИ РАН, Москва, 1411/2015, октябрь 2015.

5. О.И. Ачаковский, С.С. Белышев, Л.З. Джилавян, Ю.Н. Покотиловский. «Сечения реакций ¹⁴N(γ , 2*n*)¹²N, ¹⁴N(γ , 2*p*)¹²B, ¹³C(γ , *p*)¹²B и эмиссия γ -квантов, электронов, позитронов из характерных мишеней при распадах образованных в них ¹²N и ¹²B. Препринт ИЯИ РАН, Москва, 1399/2015, 1399/2015, март 2015.

6. Л.З. Джилавян. Проект измерений на ЛУ-50 выходов реакций ¹⁴N(γ,2n)¹²N и ¹⁴N(γ,2p)¹²B. Препринт ИЯИ РАН, Москва, 1400/2015, 1400/2015, март 2015.

Проведенные мероприятия:

XIV Международный семинар «Электромагнитные взаимодействия ядер – EMIN-2015», 10-12 октября 2015 г., Москва, 120 участников.

3 Лаборатория атомного ядра

Руководитель темы: Евгений Сергеевич Конобеевский

3.1 Исследование взаимодействия нуклонов с малонуклонными системами и легкими ядрами

на пучках Московской мезонной фабрики.

Руководитель темы: Евгений Сергеевич Конобеевский

Основные исполнители:

Мордовской М.В, снс, кфмн Зуев С.В., снс, кфмн

Исполнители:

Поташев С.И., снс, кфмн Бурмистров Ю.М., мнс Каспаров А.А., стажер-исслед.

3.1 Реферат

NN И *PP* КОРРЕЛЯЦИИ, ДЛИНА РАССЕЯНИЯ, КВАЗИСВОБОДНОЕ РАССЕЯНИЕ, СПЕКТРОМЕТРИЯ НУКЛОНОВ

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 ³Не и ³Н разработана программа экспериментов по исследованию реакций $d + {}^{2}H \rightarrow {}^{2}He + (nn), n + {}^{3}H \rightarrow {}^{2}H + (nn)$ и n + ${}^{2}H \rightarrow p + (nn)$. В эксперименте впервые будет проведено прямое определение энергии *пп*-квазисвязанного синглетного ¹S₀ состояния в различных реакциях, на основе сравнения этих энергий и их анализа проведены оценки степени *пл*-корреляций в различных реакциях и определен механизм самих этих корреляций. Теоретический анализ измеренных в разных реакциях пл-корреляций (энергий плсостояния) синглетного $^{1}S_{0}$ квазисвязанного позволит исследовать зависимости эффективного притяжения, возникающего между нейтронами от характера их исходного состояния

В результате проведенного кинематического моделирования этих реакций были определены параметры детектирующей системы. Впервые отмечено, что форма энергетического распределения частиц от распада квазисвязанного состояния однозначно связана с энергией этого состояния. Проведена обработка предварительных данных по исследованию реакции $d + {}^{2}\text{H} \rightarrow (pp) + (nn)$ с регистрацией двух протонов и нейтрона [1]. Целью эксперимента являлось получение энергетического (временного) спектра нейтронов. В области модельных максимумов в экспериментальном спектре наблюдались явные пики, однако для количественных оценок энергии квазисвязанного состояния статистика пока недостаточна.

В 2015 г. велась работа по подготовке и проведению эксперимента на нейтронном канале РАДЭКС в реакциях $n+{}^{2}\text{H}\rightarrow p+n+n$. В качестве активной мишени в этом эксперименте будет использован жидкий дейтерированный сцинтиллятор C₆D₆, являющийся одновременно дейтериевой мишенью и детектором вторичных нейтронов. Для определения световыхода различных сцинтилляторов при облучении нейтронами был поставлен эксперимент на пучке дейтронов циклотрона У-120 НИИЯФ МГУ [2]. В эксперименте детекторы облучались моноэнергетическими нейтронами, полученными в реакции $d+{}^{2}\text{H}\rightarrow{}^{3}\text{H}e+n$ в различных конфигурациях совпадательного эксперимента с регистрацией, как нейтрона, так и ${}^{3}\text{He}$.

В декабре 2015 г. были проведены предварительные измерения реакция $n+^{2}H\rightarrow p+n+n$ на нейтронном канале РАДЭКС. Реакция была исследована в геометрии взаимодействия в конечном состоянии при энергии первичных нейьолнлв 20-50 МэВ с целью получения данных об энергии квазисвязанного синглетного состояния динейтронной системы. Отбирались события тройных совпадений – протона (в активной мишени) и двух нейтронов в нейтронных детекторах. Обработка данных сеанса позволит получить информацию о временных спектрах нейтронов, измеренных в реации nd-развала в геометрии взаимодействия в конечном состоянии, и на их основе получить данные о энергии квазисвязанного состоянии, и на их основе получить данные о энергии квазисвязанного состояния при нескольких энергиях нейтронов.

3.1 Введение

Настоящий проект направлен на экспериментальное исследование нейтроннейтронного взаимодействия, и в частности, механизмов *пп*-корреляций в малонуклонных системах. 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 2*N* и 3*N* взаимодействий с использованием уравнений Фаддеева (УФ). Однако оказалось, что во многих случаях наблюдаются сильные расхождения экспериментальных данных с результатами наиболее полных и точных на сегодня Фаддеевских расчетов.

В частности, такие расхождения были обнаружены в реакции *nd*-развала в кинематике нейтрон-нейтронного квазисвободного рассеяния (КСР) при энергии 25 МэВ. Оказалось, что экспериментальные сечения *nn*-КСР превышают теоретические оценки на ~ 18%, при этом теория хорошо описывает сечения *np*-КСР, измеренные в той же кинематике КСР. Подобная критическая ситуация обнаружена также в данных для *nd*- и *pd*- развала в "Space Star" кинематике. Оказалось, что экспериментальные данные для *pd* и *nd* развала сильно

отличаются друг от друга, тогда как теоретические сечения развала оказываются почти одинаковыми и не совпадают с экспериментальными данными.

Возможное объяснение этих расхождений состоит в существенном усилении в системах 3 H(*pnn*) и 3 He(*ppn*) nn- и pp-корреляций в поле третьего нуклона за счет предполагаемого существования в этих системах нестатических и зависящих от относительного импульса парных и трехчастичных сил. В этом случае частичная фокусировка двух тождественных нуклонов в поле третьего, нетождественного, может приводить к парным корреляциям тождественных нуклонов притягивающего характера в спин-синглетном 1 S₀-состоянии, т.е. сверхпроводящего типа. Основная идея предлагаемых нами экспериментов состоит в том, что если из 3 H быстро удалить протон, то наблюдаемый характер импульсных распределений "оставшейся" *nn* пары не должен измениться. И можно, рассчитывать, что измеренные *nn*-корреляции, в частности энергии *nn*- синглетного состояния окажутся не те, которые присущи свободным *nn*- системам.

В настоящем проекте предлагается исследование реакции подхвата протона из ядра ${}^{3}\text{H} - n + {}^{3}\text{H} \rightarrow {}^{2}\text{H} + (nn)$, а также реакций $n + {}^{2}\text{H} \rightarrow {}^{1}\text{H} + (nn)$ и $d + {}^{2}\text{H} \rightarrow (pp) + (nn)$ с регистрацией как заряженной частицы ${}^{2}\text{H}({}^{1}\text{H}, pp)$, так и нейтронов от развала синглетного nn ${}^{1}S_{0}$ состояния. В экспериментах будет проведено прямое определение энергии nn-квазисвязанного синглетного ${}^{1}S_{0}$ состояния в различных реакциях и на основе сравнения этих энергий и их анализа проведены оценки степени nn-корреляций в различных реакциях и определен механизм самих этих корреляций.

3.1 Основные результаты

В рамках темы предлагается исследование как реакции подхвата протона из ядра ³Н

$$n+^{3}H\rightarrow^{2}H+(nn)$$
 (2)

так и реакций

$$\begin{array}{ll} n+^{2}H \rightarrow {}^{1}H+(nn), & (3) \\ d+^{2}H \rightarrow (pp)+(nn) & (4) \end{array}$$

с регистрацией как заряженной частицы 2 H, 1 H или pp, так и нейтронов от развала синглетного *nn* ${}^{1}S_{0}$ состояния.

В эксперименте будет проведено прямое определение энергии *пп*-квазисвязанного синглетного ${}^{1}S_{0}$ состояния в различных реакциях и на основе сравнения этих энергий и их анализа проведены оценки степени *пп*-корреляций в различных реакциях и определен механизм самих этих корреляций. При исследовании реакции (2) в ядре мишени ³Н может изначально существовать коррелированная *пп*-пара, в реакциях (3,4) такое состояние может образовываться динамически. Теоретический анализ измеренных в разных реакциях (1-3) *пп*-

корреляций (энергий *nn*-квазисвязанного синглетного ${}^{1}S_{0}$ состояния) позволит исследовать зависимости эффективного притяжения, возникающего между нейтронами от характера их исходного состояния в свободном пространстве.

Основные результаты полученные в 2015 г.

В результате проведенного кинематического моделирования реакций (2-4) были определены параметры детектирующей системы [3]. Впервые отмечено, что форма энергетического распределения частиц от распада квазисвязанного состояния однозначно связана с энергией этого состояния [1]. При условии, что детектирование частицы происходит под углом, соответствующим (или близким к) углу вылета NN-системы в двухчастичной реакции, попасть в детектор могут только "развальные" частицы, вылетающие в системе центра масс двухнуклонной системы или вперед (~0°), или назад (~180°). В результате получается специфический энергетический (и соответствующий ему временной) спектр, характеризующийся двумя пиками с расстоянием между ними, зависящим от энергии квазисвязанного состояния.



Fig. 3. Time-of-flight spectra of neutrons from the breakup of the ^{2}n quasibound state for its energies of (1) 200, (2) 80, and (3) 30 keV. The parameters of the simulation are identical to those in Fig. 1.



Видно, что различным энергиям квазисвязанного состояния соответствуют различные расстояния между пиками. Следует отметить, что форма спектров развальных частиц зависит только от энергии квазисвязанного состояния и кинетической энергии двухнуклонной системы до ее развала, и не зависит от реакции, в которой эта система (nn, np или pp) была образована. Таким образом, проведенное моделирование реакций показало, что при определенных кинематических условиях полного эксперимента (регистрация трех частиц под определенными углами с определением их энергий) энергии синглетных состояний могут быть определены, исследуя вид энергетических спектров продуктов реакции.

2. Проведена обработка предварительных данных по исследованию реакции $d + 2H \rightarrow (pp) + (nn)$ с регистрацией двух протонов и нейтрона [1]. Целью эксперимента являлось получение энергетического (временного) спектра нейтронов и сравнение его с результатами моделирования для различных энергий квазисвязанного состояния nn-системы. В области модельных максимумов в экспериментальном спектре наблюдались явные пики, однако для количественных оценок энергии квазисвязанного состояния статистика пока недостаточна.



Рисунок 3.2 - Экспериментальный и моделированный временные спектры вторичного нейтрона. Моделирование проведено для энергии квазисвязанного состояния nn-системы 80 кэВ.

3. В 2015 г. велась работа по подготовке и проведению эксперимента на нейтронном канале РАДЭКС в реакциях n+2H→p+n+n. В качестве активной мишени в этом эксперименте будет использован жидкий дейтерированный сцинтиллятор C6D6, являющийся одновременно дейтериевой мишенью и детектором вторичных нейтронов. В качестве детекторов вторичных нейтронов будут использованы водородосодержащие сцинтилляторы.

а) Поскольку регистрация нейтронов может проходить в присутствие сильного үфона необходимо обеспечить эффективное отделение нейтронных событий от событий, вызванных гамма-квантами. Для исследования различных вариантов n-ү разделения по форме импульсов проводилось облучение быстрых сцинтилляторов нейтронами и гаммаквантами PuBe-источника. В качестве детекторов использовались сцинтилляторы на основе кристаллов стильбена и жидкие водородо-содержащие и дейтерированные сцинтилляторы. Рассмотрены различные варианты оптимизации n-γ разделения, в том числе метод линеаризации, использование двумерной информации и поворота координат [4].

б) Для определения световыхода различных сцинтилляторов при облучении нейтронами был поставлен эксперимент на пучке дейтронов циклотрона У-120 НИИЯФ МГУ [2]. В эксперименте детекторы облучались моноэнергетическими нейтронами, полученными в реакции d+2H→3He+n в различных конфигурациях совпадательного эксперимента с регистрацией, как нейтрона, так и ³Не. Проведенное моделирование энергии дейтронного пучка 15 МэВ показало, что при возможно получение квазимоноэнергетического пучка нейтронов в интервале энергий 3–14 МэВ, с разбросом по энергии, зависящим от углового аксептанса детектора гелионов. Были проведены измерения спектров световыхода и эффективности регистрации нейтронов для различных сцинтилляторов при нескольких значениях энергии нейтронов.

В декабре 2015 г. были проведены предварительные измерения реакция n+2H→p+n+n на нейтронном канале РАДЭКС. Реакция была исследована в геометрии взаимодействия в конечном состоянии при энергии первичных нейтронов 20-50 МэВ с целью получения данных об энергии квазисвязанного синглетного состояния динейтронной системы. Была использована схема эксперимента, показанная на рис.3.1. В качестве активной мишени будет использован жидкий дейтерированный сцинтиллятор C6D6, являющийся одновременно дейтериевой мишенью и детектором вторичных нейтронов.



Рисунок 3.3 - Схема эксперимента по исследованию реакции nd-развала

В качестве детекторов вторичных нейтронов (D1-D4) использованы водородосодержащие сцинтилляторы.Отбирались события тройных совпадений – протона (в активной мишени) и двух нейтронов в нейтронных детекторах. Обработка данных сеанса позволит получить информацию о временных спектрах нейтронов, измеренных в реации ndразвала в геометрии взаимодействия в конечном состоянии, и на их основе получить данные о энергии квазисвязанного состояния nn-системы при нескольких энергиях нейтронов.

3.1 Литература

- 1. Е.С.Конобеевский, С.В.Зуев, А.А.Каспаров, В.М.Лебедев, М.В.Мордовской, А.В.Спасский / Исследование реакции d + d → 2He + 2n при энергии дейтронов 15 МэВ // Ядерная физика. 2015, Т. 78, № 7-8, с. 687–695.
- 2. С.В.Зуев, А.А.Каспаров, Е.С.Конобеевский, В.М.Лебедев. М.В.Мордовской, $d + {}^{2}H \rightarrow {}^{3}He + n$ КАК ИСТОЧНИК А.В.Спасский РЕАКШИЯ / КВАЗИМОНОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ НЕЙТРОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ // Известия РАН. Серия Физическая (в печати).
- С.В.Зуев, А.А.Каспаров, Е.С.Конобеевский, М.В.Мордовской, И.М.Железных, А.Г.Гасанов, В.М.Лебедев, А.В.Спасский, З.Я.Садыгов / УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ NN-КОРРЕЛЯЦИЙ В РЕАКЦИИ d + ²H → n + n + p + p // Известия РАН. Серия Физическая (в печати).
- 4. Kasparov A.A., Konobeevski E.S., Mordovskoy M.V., Zuyev S.V. / Digital n-γ pulse-shape discrimination with nanosecond waveform digitizer // LXV International Conference
"NUCLEUS 2015" "New Horizons in Nuclear Physics, Nuclear Engineering, Femto- and Nanotechnologies", Saint-Petersburg, June 29 – July 3, 2015, Book of Abstracts, p. 253.

3.1 ПУБЛИКАЦИИ

- 1. Е.С.Конобеевский, С.В.Зуев, А.А.Каспаров, В.М.Лебедев, М.В.Мордовской, А.В.Спасский / Исследование реакции d + d → 2He + 2n при энергии дейтронов 15 МэВ // Ядерная физика. 2015, Т. 78, № 7-8, с. 687–695.
- Е.С.Конобеевский, В.М.Лебедев, 2. С.В.Зуев, А.А.Каспаров, М.В.Мордовской, $d + {}^{2}H \rightarrow {}^{3}He + n$ А.В.Спасский РЕАКЦИЯ КАК ИСТОЧНИК / НЕЙТРОНОВ КВАЗИМОНОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ НЕЙТРОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ // Известия РАН. Серия Физическая (в печати).
- С.В.Зуев, А.А.Каспаров, Е.С.Конобеевский, М.В.Мордовской, И.М.Железных, А.Г.Гасанов, В.М.Лебедев, А.В.Спасский, З.Я.Садыгов / УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ NN-КОРРЕЛЯЦИЙ В РЕАКЦИИ d + ²H → n + n + p + p // Известия РАН. Серия Физическая (в печати).

ДОКЛАДЫ на Конференциях

- E.Konobeevski, V.Lebedev, M.Mordovskoy, A.Spasskii, S.Zuyev / The use of d(d,n)3He reaction as a tool for neutron detectors examination // LXV International Conference "NUCLEUS 2015" "New Horizons in Nuclear Physics, Nuclear Engineering, Femto- and Nanotechnologies", Saint-Petersburg, June 29 July 3, 2015, Book of Abstracts, p. 90. Устный доклад
- 2. Konobeevski E.S., Mordovskoy M.V., Zuyev S.V., Zheleznykh I.M., Gassanov A.G., Sadygov Z.Y. / Setup for studying pp-correlation effects in d + 2H→(nn)+(pp) AND 3He+2H→3H+(pp) reactions // LXV International Conference "NUCLEUS 2015" "New Horizons in Nuclear Physics, Nuclear Engineering, Femto- and Nanotechnologies", Saint-Petersburg, June 29 – July 3, 2015, Book of Abstracts, p. 91. Устный доклад
- Kasparov A.A., Konobeevski E.S., Mordovskoy M.V., Zuyev S.V. / Digital n-γ pulse-shape discrimination with nanosecond waveform digitizer // LXV International Conference "NUCLEUS 2015" "New Horizons in Nuclear Physics, Nuclear Engineering, Femto- and Nanotechnologies", Saint-Petersburg, June 29 – July 3, 2015, Book of Abstracts, p. 253. Устный доклад
- 4. E. Konobeevski, A.Kasparov, V.Lebedev, M.Mordovskoy, A.Spassky, S.Zuyev / Determination of Energies of NN-Quasibound Singlet States in dd→(nn)^s+(pp)^s and dd→(np)^s+(np)^s Reactions // The XIV international Seminar on Electromagnetic Interactions of nuclei, EMIN-2015, Moscow, October 5-8, 2015, Moscow, Russia, INR RAS. Стенд
- 5. А.А.Каспаров, Е.С.Конобеевский, С.В.Зуев / Математические методы разделения импульсов, вызванных нейтронами и гамма-квантами // Системы компьютерной математики и их приложения: материалы XVI Международной научной конференции, посвященной 75-летию профессора В.П. Дьяконова. Смоленск: Изд-во СмолГУ, 2015, выпуск 16, с. 24. Устный доклад

3.2 Исследование структуры и механизмов взаимодействия слабосвязанных ядер с ядрами при средних энергиях

Руководитель темы: Евгений Сергеевич Конобеевский, зав. лаб., кфмн

Основные исполнители:

Заварзина В.П., снс, кфмн Зуев С.В., снс, кфмн Курлович А.С., стажер-исследователь Сергеев В.А., снс, кфмн

Исполнители

Каспаров А.А., стажер-исслед. Пафомов В.Е., снс, дфмн Хохлов Ю.К., снс, кфмн

3.2 Реферат

ЛЕГКИЕ ГАЛО ЯДРА, КЛАСТЕРНАЯ СТРУКТУРА, КВАЗИМОЛЕКУЛЯРНЫЕ СОСТОЯНИЯ, КВАЗИСВОБОДНОЕ РАССЕЯНИЕ, ЯДЕРНЫЕ ФОТОЭМУЛЬСИИ.

Работа направлена на решение фундаментальной проблемы ядерной физики – проблемы существования кластерной структуры ядер. Строгая корреляция между нуклонами приводит к явлению кластеризации. Ядра ⁶Не и ⁶Li представляют значительный экспериментальный и теоретический интерес из-за кластерной структуры низколежащих состояний, рассматриваемых как ⁴He + 2n и ⁴He + d, соответственно. Для нейтронно-избыточных ядер имеются как теоретические [1], так и экспериментальные [2, 3] основания для предположения о существовании динейтронного кластера.

Более сложная структура ядра ⁸Не дает и большую возможность рассмотрения кластерной структуры ядра, как комбинаций различных нейтрон-нейтронных корреляций – динейтрон, динейтронный конденсат и др. с различными корами (⁴He, ⁶He). Проведенное нами моделирование реакций ⁶He+p и ⁸He+p [1] показало, что события квазисвободного рассеяния протона на различных кластерах занимают различные кинематические области на диаграммах Далитца, и обнаружение таких областей позволит сделать выводы о кластерной структуре исследуемых гало-ядер.

Экзотические молекулярно-подобные кластерные-структуры, описываемые как двух фермионные t-t, t-h или h-hсистемы ($t={}^{3}H$, $h={}^{3}He$), являющиеся аналогом двух- нуклонной системы рассматриваются теоретически и наблюдаются экспериментально [4-5]. Тем не менее, физика таких три-нуклонных кластерных состояний остается неясной.

Для изучения кластерной структуры высоковозбужденных состояний в ядрах ⁶Li и ⁶He подготовлен проект, в котором будет проведено исследование реакций

$${}^{6}\text{Li} + {}^{7}\text{Li} \rightarrow {}^{7}\text{Li} + {}^{6}\text{Li}^{*} \rightarrow {}^{7}\text{L} + t + {}^{3}\text{He}$$
$$\rightarrow {}^{7}\text{L} + d + {}^{4}\text{He}$$
$${}^{6}\text{Li} + {}^{7}\text{Li} \rightarrow {}^{7}\text{Be} + {}^{6}\text{He}^{*} \rightarrow {}^{7}\text{Be} + t + t$$

(1),

(2),

 $n + {}^{7}Li \rightarrow {}^{2}H + {}^{6}He^* \rightarrow {}^{2}H + t + t$ (3).

Реакции 1 и 2 будут исследованы на пучке ионов ⁶Li с энергией 50–54 МэВ на пеллетроне 15 UD Межуниверситетского ускорительного центра (IUAC, Нью-Дели, Индия). Реакция (3) будет исследована на нейтронном канале РАДЭКС Института ядерных исследований Российской академии наук.

3.2 Введение

Большой интерес вызывает исследование кластерной структуры легких ядер. Структура возбужденных состояний ядер с А=6 рассматривалась в работе [6]. Было отмечено, что если в ядрах ⁶Не и ⁶Ве основное и низколежащие состояния имеют структуру ⁴He+N+N, а высоковозбужденные состояния, в основном, структуру t+t И h+h, соответственно, (где h это 3 He), то в 6 Li эти две конфигурации не являются взаимоисключающими и обе могут существовать для одного состояния. Существующая информация о структуре, энергиях и ширинах высоковозбужденных состояний в легких ядрах довольно противоречива и требуют дальнейшего изучения. В предлагаемых экспериментах будет не только получена информация о существовании рахличных кластерных состояний, но и исследованы моды их распада, т.е. определены веса различных кластерных конфигураций различных состояний в различных реакциях и с использованием различных методов.

3.2 Основные результаты

1. В работт [7] рассматривалась возможность экспериментального изучения структуры гало-ядер в реакциях квазисвободного рассеяния протона на кластерах этих ядер. Для этого была создана программа кинематического моделирования ядерных реакции с несколькими частицами в конечном состоянии, в том числе реакций, идущих через образование возбужденных промежуточных состояний продуктов [8]. Проведенное моделирование реакции взаимодействия протона с ядром 8Не в обратной кинематике при энергии 8Не – 40 МэВ позволило получить угловые и энергетические распределения вторичных частиц при различном представлении кластерной структуры ядра 8Не. На рис. 3.4 показаны двумерные диаграммы Ер – ЕНе и Θ p – Ер для кластеризации 8Не с кором 4Не.



Рисунок 3.4 - Результаты кинематического моделирования для кластеризации ⁸Не с кором ⁴Не – двумерные диаграммы в координатах : $a - E_p - E_{He}$ и $\delta - \Theta_p - E_p$. На рисунке: области *1* – область фоновых событий для реакции развала ⁸Не + $p \rightarrow {}^{4}$ Не + p + n + n + n + n, 2 – КСР $p - {}^{4}$ Не, 3 – КСР $p - {}^{4}n$, 4 – КСР $p - {}^{2}n$.

Наглядно показано, что существуют выделенные области в угловых и энергетических распределениях вторичных частиц, которые однозначно связаны с реакциями на определенных кластерах и соответствуют определенным кластерным конфигурациям галоядер. Сделаны предложения возможных экспериментов.

2. Совместно с экспериментальной группой из Межуниверситетского ускорительного центра (IUAC, Нью-Дели, Индия) подготовлен проект эксперимента по исследованию кластерной структуры легких слабосвязанных ядер в реакциях

$${}^{6}\text{Li} + {}^{7}\text{Li} \rightarrow {}^{7}\text{Li} + {}^{6}\text{Li}^{*} \rightarrow {}^{7}\text{L} + t + {}^{3}\text{He}$$
(1),

$${}^{6}\text{Li} + {}^{7}\text{Li} \rightarrow {}^{7}\text{Be} + {}^{6}\text{He}^{*} \rightarrow {}^{7}\text{Be} + t + t$$
(2).

$$n + {}^{7}Li \rightarrow {}^{2}H + {}^{6}He^* \rightarrow {}^{2}H + t + t$$
(3).

Реакции 1 и 2 будут исследованы на пучке ионов ⁶Li с энергией 50–54 МэВ на пеллетроне 15 UD Межуниверситетского ускорительного центра (IUAC, Нью-Дели, Индия). Реакция (3) будет исследована на нейтронном канале РАДЭКС Института ядерных исследований Российской академии наук.

а) Проведено моделирование эксперимента с использованием созданной программы расчета кинематических переменных. Проведенное моделирование показало возможность исследования интервала энергий возбуждения ⁶Li от порога развала до энергии порядка 30

МэВ. В процессе моделирования были рассмотрены возможности выделения искомого канала развала ⁶Li* \rightarrow t + ³He от фонового ⁶Li* \rightarrow d + ⁴He. В последнем случае регистрируемыми частицами будут ⁷Li и ⁴He или ⁷Li и d. На рис. 2 показаны результаты моделирования двумерных диаграмм E(⁷Li)–E(t), E(⁷Li)–E(⁴He), E(⁷Li)–E(d), при условиях: угол регистрации ⁷Li – 20°, угол регистрации второй частицы (t или ⁴He или d) – 55°. Видно, что различным каналам развала ⁶Li* соответствуют различные области двумерной диаграммы, что позволит однозначно выделить искомые события. Кроме того в канале развальной частицы будет проводиться $\Delta E - E$ анализ, который позволит проводить отбор событий регистрации тритонов от событий регистрации дейтронов или альфа-частиц.



Рисунок 3.5 - Двумерные диаграммы $E(^{7}Li)-E(t)$, $E(^{7}Li)-E(^{4}He)$, $E(^{7}Li)-E(d)$ при условиях: $\Theta(^{7}Li) = 20^{\circ}$, $\Theta(cl) = -55^{\circ}$ (cl = t, ⁴He, d). Энергия пучка ⁶Li - 54 МэВ.

б) Для проведения эксперимента разработана система сбора информации на основе цифровых сигнальных процессоров (ЦСП) [9]. Система сбора данных была опробована в эксперименте по исследованию реакции $d + 2H \rightarrow 2He + n + n$ [10]. Система позволяет регистрировать в совпадении сигналы с детекторов заряженных и нейтральных частиц с определением их энергий и времен пролета. При этом вся необходимая информация может быть получена при использовании минимального набора блоков электроники, а обработка оцифрованных сигналов дает широкие возможности для отбора и анализа полученных данных.

3.2 Литература

- 1. M.V.Zhukov et al. // Phys. Rep. 231, 151 (1993).
- 2. Yu.Ts.Oganessian et al. // Phys. Rev. C 60, 044605 (1999).
- 3. G.Belovitsky, E.Konobeevski, A.Stepanov, V.Zavarzina, S.Zuyev, S.Lukyanov,

Yu.Sobolev // International Journal of Modern Physics. E 17, N10, 2331 (2009).

4. S. Nakayama et al., Phys. Rev. Lett. 87 (2001) 122502; Prog. Theor. Phys. Suppl. 14, (2002) 603.

5. H. Akimune et al., Phys. Rev. C67 (2003) 051302(R)

6. A. Abbas, arXiv: physics/0306186v1 [physics.gen-ph] 26/ Jun 2003.

7. Е.С. Конобеевский, С.В. Зуев, А.А. Каспаров Возможности исследования структуры гало-ядер в реакциях квазисвободного рассеяния протона при низких энергиях ЯФ 2015, Т. 78, № 7-8, с. 739

8. 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. Серия физическая. 2014. Т. 78, № 5, с. 527–531

9. С. В. Зуев, Е. С. Конобеевский, М. В. Мордовской / СИСТЕМА СБОРА ДАННЫХ ДЛЯ УСТАНОВКИ С РЕГИСТРАЦИЕЙ СОВПАДАЮЩИХ СОБЫТИЙ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ СИГНАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОРОВ // ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2014, том 78, № 5, с. 532–536.

10. Е.С.Конобеевский, С.В.Зуев, А.А.Каспаров, В.М.Лебедев, М.В.Мордовской, А.В.Спасский / Исследование реакции d + d → 2He + 2n при энергии дейтронов 15 МэВ // Ядерная физика. 2015, Т. 78, № 7-8, с. 687–695.

3.2 Применение приближенных методов расчета сечений и импульсных распределений наблюдаемых частиц к реакциям с однонуклонными гало-ядрами.

Проведено сравнение приближенных методов расчета реакции срыва валентного нуклона гало-ядра, основанных на различных предположениях о размерах сталкивающихся чдер. Результаты вычислений дифференциальных сечений этой реакции демонстрируют определенные преимущества усовершенствованного «приближения малого радиуса ядрамишени» при радиусах поглощения нуклона 2-4 фм.

3.2 ПУБЛИКАЦИИ

1. Е.С. Конобеевский, С.В. Зуев, А.А. Каспаров Возможности исследования структуры гало-ядер в реакциях квазисвободного рассеяния протона при низких энергиях ЯФ 2015, Т. 78, № 7-8, с. 739

2. Е.С.Конобеевский, С.В.Зуев, А.А.Каспаров, В.М.Лебедев, М.В.Мордовской, А.В.Спасский / Исследование реакции d + d → 2He + 2n при энергии дейтронов 15 МэВ // Ядерная физика. 2015, Т. 78, № 7-8, с. 687–695.

3. V.E. Pafomov, V.A. Sergeev, V.P. Zavarzina /MOMENTUM DISTRIBUTIONS IN STRIPPING REACTIONS OF HALO NUCLEI ON LIGHT TARGET// EXON-2014. Proceedings of the International Symposium on EXOTIC NUCLEI. 2015. World Scientific Publishing. 2015.P. 67-72.

4. V.E. Pafomov, V.A. Sergeev, V.P. Zavarzina / LONGITUDINAL MOMENTUM ISTRIBUTIONS IN STRIPPING REACTIONS WITH HALO NUCLEI // Известия РАН, серия физ. (в печати).

ДОКЛАД на Конференции:

V.E. Pafomov, V.A. Sergeev, V.P. Zavarzina / LONGITUDINAL MOMENTUM ISTRIBUTIONS IN STRIPPING REACTIONS WITH HALO NUCLEI // LXV International Conference "NUCLEUS 2015" "New Horizons in Nuclear Physics, Nuclear Engineering, Femtoand Nanotechnologies", Saint-Petersburg, June 29 – July 3, 2015, Book of Abstracts, p191. Устный доклад

3.2 Вне темы

1. Рассматривалось излучение быстрых заряженных частиц при наличии границы раздела пустоты с "левым" ферродиэлектриком. Выявлена количественная тождественность различных явлений, имеющая место в случае "разноправых" сред. Показано, что переходное излучение на границе с "левой" средой количественно совпадает с частным случаем аннигиляционного излучения на границе с "правой" средой с участием различных заряженных частиц. Получено обобщение переходного излучения заряженной частицы на границе с одноосным кристаллом на излучение с участием частиц различных зарядов и скоростей.

В.Е. Пафомов / К электродинамике сплошных сред. //КСФ ФИАН №10. Т. 42 2015. С.
 28-32.

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

Ю.К. Хохлов / Замечания о электромагнитных волнах в среде с отрицательными є и µ. II. //КСФ ФИАН №12 2015г

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

Научный руководитель: А.В.Андреев.

Соисполнители: ЛФЯР и ЛНИ ИЯИ РАН

Основные исполнители: Зуев С.В., снс, кфмн Бурмистров Ю.М., мнс Мордовской М.В, зав.сект., кфмн Поташев. С.И., снс, кфмн

Исполнители Сабинин С.Л. Тишин В.В.

3.3 Реферат

НЕЙТРОННО-АКТИВАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ, ГАММА СПЕКТРОМЕТР, НИЗКОФОНОВАЯ КАМЕРА, ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ, АКТИВНАЯ И ПАССИВНАЯ ЗАЩИТА, ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ, ФОТОНЕЙТРОННЫЙ ИСТОЧНИК.

Исследования по теме направлены на разработку методов и аппаратуры низкофоновых измерений гамма-излучений с использованием германиевых гаммаспектрометров. В процессе исследований также проводятся работы по разработке новых методик нейтронно-активационного анализа с улучшенными метрологическими характеристиками, исследования конденсированных сред, радиационного материаловедения и других физических задач с использованием тепловых и быстрых нейтронов высокоинтенсивного компактного W-Be фотонейтронного источника на основе серийного промышленного электронного ускорителя ЛУЭ-8-5.

3.3 Введение

В рамках Приоритетного направления развития науки, технологий и техники в Российской Федерации «Рациональное природопользование» и Критических технологий Российской Федерации – «Технологии поиска, разведки, разработки месторождений полезных ископаемых и их добычи» и «Технологии мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации ее загрязнения» актуальным является использование разрабатываемых методов и аппаратуры низкофоновых измерений гамма-излучений с использованием германиевых гамма-спектрометров для нейтронно-активационного анализа (НАА), который получил широкое распространение в анализе высокочистых веществ и геологических проб.

НАА и инструментальные методы, которые используются при анализе, имеют преимущества из-за их высокой чувствительности, производительности и относительной дешевизны. При этом большое значение для определения содержания нано и микро примесей в веществах имеет наличие интенсивных источников нейтронов и высокоэффективных прецизионных гамма-спектрометров, работающих в условиях малого естественного фона.

В процессе НАА проводят облучение образцов нейтронами, которые получают, используя дорогостоящие установки – реакторы, нейтронные генераторы, микротроны и др., что существенно повышает стоимость анализа. Внимание, обращаемое в последнее время на развитие аналитических методов, в значительной мере связано с сокращением числа исследовательских реакторов, возросшими требованиями к радиационной безопасности и проблемами с лицензированием при работе на них.

При этом в последние два десятилетия новые ядерно-физические методы анализа практически не разрабатывались. В связи с этим в качестве более экономичной замены, представляет интерес использование для НАА фотонейтронных источников на базе промышленных низкоэнергетических линейных ускорителей электронов на энергии 6 - 10 МэВ и низкофоновых гамма-спектрометров. Так как плотность потока нейтронов фотонейтронных источников обычно не превышает ~ 10⁹ нейтрон/с·см², то это диктует необходимость помимо обеспечения максимальной плотности потока нейтронов для облучения образцов, использовать гамма-спектрометр с минимальными фоновыми характеристиками, чтобы также обеспечить возможность определения элементов с низкими содержаниями в образцах. Достаточно низкая плотность потока нейтронов имеет при этом и свои преимущества, т.к. позволяет проводить неразрушающий анализ и измерения практически сразу после облучения образцов из-за достаточно низкой их активности, а также размещать измерительную установку вблизи от источника нейтронов из-за низкого фона при его работе. Это обстоятельство делает предложенную процедуру анализа значительно радиационно-безопасной, чем анализ с использованием ядерного реактора. Всё это удешевляет анализ и делает его безопасным, как для исполнителей анализа, так и для персонала помещений, расположенных в непосредственной близости к лаборатории, выполняющей такой анализ. Тем самым устраняются основные недостатки НАА – необходимость использования ядерных реакторов, а также проблемы, связанные с хранением и утилизацией радиоактивных отходов.

3.3 Основные результаты

В качестве источника нейтронов в процессе разработки методов и аппаратуры низкофоновых измерений гамма-излучений с использованием германиевых гаммаспектрометров применялся фотонейтронный W-Be-источника тепловых нейтронов. Фотонейтронный источник запущен на электронном пучке линейного ускорителя ЛУЭ-8-5 Института ядерных исследований РАН в 2015 году (рис. 3.6). Оригинальная конструкция источника позволяет проводить как облучение образцов во внутренней камере источника, так и работу с выведенными пучками нейтронов (быстрых - 0.5-5 МэВ, тепловых, или промежуточных).



Рисунок 3.6 - W-Ве-фотонейтронный источник на пучке электронов ускорителя ЛУЭ-8-5 ИЯИ РАН

В результате моделирования получен спектр нейтронов фотонейтронного источника внутри рабочей полости источника. Спектр характеризуется наличием нейтронов помимо тепловых, также быстрых (более 100 кэВ) и промежуточных (резонансных) энергий. Проведены измерения плотности потока тепловых и быстрых нейтронов во внутренней камере источника и на выходе наклонного измерительного нейтронного канала методом нейтронно-активационного анализа с эталонными образцами Cd, Cu, In, Mn, Sc, Zn и др. (рис. 3.7). Плотность потока тепловых нейтронов в измерительной полости источника составила ~107 нейтрон/см2с при среднем токе электронов 10 мкА. Проведено измерение потока быстрых нейтронов в выводном канале источника. Исследовано влияние нейтронных фильтров из различных материалов (B4C, Cd, Li2CO3) на соотношение тепловых и быстрых нейтронов на выходе измерительного канала источника.



Рис унок 3.7 - Гамма-спектр активированного образца Sc. Плотность потока тепловых нейтронов в камере на 1 мкA – N = $0.63 \cdot 10^6$ см⁻²c⁻¹ μ A⁻¹

Исследования проводились с использованием низкофонового гамма спектрометра на базе детектора из особочистого германия с «пассивной» защитой (рис. 3ю8).



Рисунок 3.8 - Камера гамма-спектрометра на базе детектора из особочистого германия с «пассивной» защитой (верхняя часть защиты сдвинута)

Проводились работы по разработке новых методик нейтронно-активационного анализа с улучшенными метрологическими характеристиками. Исследовались образцы материалов аэрозольных фильтров, предназначенных для отбора проб аэрозолей в процессе аэрологических измерений. Определялись фоновые составляющие, которые могут вносить вклад в дальнейшие измерения с аэрозольными пробами. Образцы фильтров из кварцевого волокна и стекловолокна облучались потоком тепловых нейтронов в рабочей камере фотонейтронного источника. Активность образцов была измерена в низкофоновой камере с помощью у-спектрометра из особочистого германия. Результаты нейтронно-активационного анализа показали на отсутствие заметных фоновых вкладов для кварцевых фильтров и характерное для фильтров из стекловолокна присутствие в у-спектрах сильных линий от распада ²⁴Na. Проведен нейтронно-активационный анализ атмосферных аэрозолей, отбираемых на специальные аналитические фильтрующие материалы НИИФХИ с помощью беспилотных средств пробоотбора (ЦАО, МАИ). Разработаны и опробованы методики измерения сверхмалых содержаний элементов в аэрозольных пробах. Отработана методика идентификации, определения периода полураспада и выполнения высокочувствительного определения содержания радиоактивных и стабильных нерадиоактивных элементов. Идентификация линий была проведена по результатам определения энергии и периода полураспада для наблюдаемых линий и также по результатам НАА для эталонных образцов NaCl и NaHCO₃. Результаты нейтронно-активационного анализа указывают на возможность уверенного определения содержания Na, Cl, K, Mn в атмосферных аэрозолях.

По результатам анализа ⁴¹К в аэрозольном фильтре и образцов NaCl и NaHCO₃, получены независимые оценки плотности потока тепловых и быстрых нейтронов во внутренней камере источника, которые совпали с измерениями методом нейтронноактивационного анализа с эталонными образцами Cd, Cu, In, Mn, Sc, Zn и др.

Начаты работы по НАА с облучением в источнике золотосодержащих геологических образцов и измерениями в низкофоновой камере (рис. 3). Достигнуты нижние пределы определения элементов: Au ~ 0.1 г/т., As ~ 10^{-3} % масс, Sb ~ 10^{-3} % масс, Mn ~ 10^{-4} % масс при облучении в источнике при плотности потока нейтронов ~ 10^7 нейтрон/ с·см² и времени активации ~ 3 часа. Отработаны методики относительного, компараторного и К0-методов определения содержаний примесей в пробах методом НАА, созданы соответствующие программы для расчетов.



Рисунок 3.9 - Гамма-спектр активированного геологического образца (число импульсов – энергия гамма-квантов в кэВ. Время активации – 3 часа, плотность потока тепловых нейтронов ~ 10⁷ нейтрон /с⋅см2

3.3 Публикации

1. С.И.Поташев, А.И.Драчев, А.А. Афонин, С.Х. Караевский, Ю.М. Бурмистров, В.Н.Марин, В.И.Разин, Е.С. Конобеевский Гибридный двухкоординатный детектор медленных нейтронов с чувствительными слоями из бора-10 размерами 400 мм×400 мм. ПРЕПРИНТ ИЯИ РАН 1416/2015 Декабрь 2015

2. С.И.Поташев, В.Н. Марин, А.А. Афонин, С.Х. Караевский, Ю.М. Бурмистров, В.И.Разин, Р.А. Садыков, Е.С. Конобеевский. Газовый позиционно-чувствительный детектор медленных нейтронов с чувствительной областью 400 мм×400 мм. ПРЕПРИНТ ИЯИ РАН 1415/2015 Декабрь 2015

Доклады на международных конференциях

- A.Andreev, Yu.Burmistrov, A.Gromov, R.Ilić, E.Konobeevsky, E.Koptelov, L.Latysheva, M.Mordovskoi, V.Ponomarev, S.Potashev, A.Rogov, S.Sabinin, S.Sidorkin, <u>N.Sobolevsky</u>, G.Solodukhov, V.Tishin, S.Zuyev / Mathematical modeling of neutron sources on the basis of fragmentation and spallation processes and (γ,n) reactions // Fifth International Conference on Nuclear Fragmentation 2015, NUFRA 2015, 4-11 October 2015, Kemer (Antalya), Turkey, Book of Abstracts, p. 45.
- Andreev A.V., Burmistrov Yu.M., Konobeevski E.S., Mordovskoy M.V., Pletnikov E.V., Sitnikov N.M., Zuyev S.V. / Neutron activation analysis of aerosol filters at photoneutron source of INR RAS // LXV International Conference "NUCLEUS 2015" "New Horizons in Nuclear Physics, Nuclear Engineering, Femto- and Nanotechnologies", Saint-Petersburg, June 29 – July 3, 2015, Book of Abstracts, p. 254.
- A.Andreev, Yu.Burmistrov, A.Gromov, M.Mordovskoy, G.Solodukhov, <u>S.Zuyev</u> / Neutron-Activation Analysis of Materials at IN-LUE Neutron Source // The XIV international Seminar on Electromagnetic Interactions of nuclei, EMIN-2015, Moscow, October 5-8, 2015, Moscow, Russia, INR RAS.

3.4 Разработка источника медленных нейтронов на базе линейного ускорителя ЛУЭ-8 Научные руководители: Г.В.Солодухов, А.В.Андреев.

ЛАЯ ИЯИ РАН совместно с ЛФЯР и ЛНИ ИЯИ РАН

Отв. исполнители: Громов А.М., Пономарев В.Н. Зуев С.В., снс, кфмн Бурмистров Ю.М., мнс Мордовской М.В., снс, кфмн

3.4 Реферат

ТЕПЛОВЫЕ И БЫСТРЫЕ НЕЙТРОНЫ, ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ, ФОТОНЕЙТРОННЫЙ ИСТОЧНИК, УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ.

Исследования по теме направлены на создание высокоинтенсивного компактного W-Be-фото-нейтронного источника на основе серийного промышленного электронного ускорителя ЛУЭ-8-5, вольфрамовой тормозной мишени, фото-нейтронной бериллиевой мишени и замедлителя быстрых нейтронов. Источник предполагается использовать для проведения работ по разработке новых методик нейтронно-активационного анализа с улучшенными метрологическими характеристиками, исследования конденсированных сред, радиационного материаловедения и других физических задач с использованием тепловых и быстрых нейтронов.

3.4 Введение

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

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

Такие источники могут обеспечить поток тепловых нейтронов порядка 10⁸ - 10⁹ нейтрон/см²·с, что сравнимо с параметрами реакторных источников нейтронов, нейтронных генераторов и микротронов при достаточно низком гамма-фоне и удовлетворительных размерах поля облучения.

3.4 Основные результаты

Совместно с ЛФЯР и ЛНИ создана компьютерная модель фото-нейтронного W-Beисточника тепловых нейтронов, проведены исследования и расчеты параметров источника с целью получения максимальной плотности потока тепловых нейтронов в измерительной полости источника (в центре замедлителя). Оптимизация параметров источника выполнена с помощью программы MCNP5 (Monte-Carlo-N-Particle), моделирующей процессы взаимодействия, гамма-квантов. электронов и нейтронов с конструкционными материалами источника. Оценены значения потоков быстрых и тепловых нейтронов внутри и снаружи источника. Показана возможность достижения плотности тепловых нейтронов в измерительной полости порядка 10⁸ нейтрон/см²с. Оптимизирована схема W-Be-фотонейтронного источника (см. рис. 3.10).



Рисунок 3.10 - Оптимизированная схема W-Be-фотонейтронного источника

С учетом результатов моделирования изготовлен фотонейтронный W-Be-источник тепловых нейтронов. Монтаж источника был проведен на пучке электронов линейного ускорителя ЛУЭ-8-5 (см. рис. 3.11). Все работы по изготовлению источника проводились силами исполнителей темы.



Рисунок 3.11 - Промышленный ускоритель электронов ЛУЭ-8-5 Института ядерных исследований РАН

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



Рисунок 3.12 - W-Ве-фотонейтронный источник на пучке электронов ускорителя ЛУЭ-8-5 ИЯИ РАН

Фотонейтронный источник запущен на электронном пучке линейного ускорителя ЛУЭ-8-5 Института ядерных исследований РАН в 2015 году (рис. 3). Оригинальная конструкция источника позволяет проводить как облучение образцов во внутренней камере источника, так и работу с выведенными пучками нейтронов (быстрых – 0.5-5 МэВ, тепловых, или промежуточных). В результате моделирования получен спектр нейтронов фотонейтронного источника внутри рабочей полости источника. Спектр характеризуется наличием помимо тепловых, также быстрых (более 100 кэВ) и промежуточных нейтронов (резонансных энергий). Проведены измерения плотности потока тепловых и быстрых нейтронов во внутренней камере источника и на выходе выведенного нейтронного канала методом нейтронно-активационного анализа с эталонными образцами Cd, Cu, In, Mn, Sc, Zn и др. Плотность потока тепловых нейтронов в измерительной полости источника составила ~10⁷ нейтрон/см²с при среднем токе электронов 10 мкА. Проведено измерение потока быстрых нейтронов в выведенном канале источника. Исследовано влияние нейтронных фильтров из различных материалов (B₄C, Cd, Li₂CO₃) на соотношение тепловых и быстрых нейтронов на выходе измерительного канала источника. Начаты работы по нейтронноактивационному анализу с использованием нейтронов фотонейтронного источника.

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

Результаты работы доложены на Международных конференциях NUFRA 2015 [1], NUCLEUS 2015 [2] и EMIN-2015 [3].

3.4 Доклады на международных конференциях

- A.Andreev, Yu.Burmistrov, A.Gromov, R.Ilić, E.Konobeevsky, E.Koptelov, L.Latysheva, M.Mordovskoi, V.Ponomarev, S.Potashev, A.Rogov, S.Sabinin, S.Sidorkin, N.Sobolevsky, G.Solodukhov, V.Tishin, S.Zuyev / Mathematical modeling of neutron sources on the basis of fragmentation and spallation processes and (γ,n) reactions // Fifth International Conference on Nuclear Fragmentation 2015, NUFRA 2015, 4-11 October 2015, Kemer (Antalya), Turkey, Book of Abstracts, p. 45.
- Andreev A.V., Burmistrov Yu.M. Gromov A.V., Konobeevski E.S., Mordovskoy M.V., Solodukhov G.V., Zuyev S.V. / W-Be photoneutron source of INR RAS // // LXV International Conference "NUCLEUS 2015" "New Horizons in Nuclear Physics, Nuclear Engineering, Femto- and Nanotechnologies", Saint-Petersburg, June 29 – July 3, 2015, Book of Abstracts, p. 252.
- 3. A.Andreev, Yu.Burmistrov, E.Konobeevski, L.Latysheva, M.Mordovskoy, N.Sobolevsky,

G.Solodukhov, S.V.Zuyev / Multipurpose compact W-Be photoneutron source IN-LUE of Institute for Nuclear Research RAS // The XIV international Seminar on Electromagnetic Interactions of nuclei, EMIN-2015, Moscow, October 5-8, 2015, Moscow, Russia, INR RAS.

 3.4.1 Исследование взаимодействия нейтронов малых энергий с ядрами с возбуждением коллективных степеней свободы
 Основные исполнители
 Суркова Инна Владимировна, снс, кфмн
 Мордовской Михаил Вадимович, зав.сект., кфмн
 Осипчук Игорь Иванович, нс, кфмн

3.4.1 Реферат

ОПТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СО СВЯЗЬЮ КАНАЛОВ, НЕЙТРОН-ЯДЕРНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ, МАГИЧЕСКИЕ И ПОЛУМАГИЧЕСКИЕ ЧИСЛА НУКЛОНОВ

В течение ряда лет в Лаборатории атомного ядра проводился систематический анализ экспериментальных данных по взаимодействию нейтронов с энергиями до 3 МэВ с четночетными сферическими ядрами среднего и тяжелого веса ($56 \le A \le 206$). В результате было получено единое (c одним набором параметров) описание совокупности низкоэнергетических нейтронных данных для сферических четно-четных ядер. Расчеты эффективных нейтронных сечений и силовых функций нейтронов проводились в рамках двухфононного приближения оптической модели со связью каналов (ОМСК). При этом было подтверждено, а в ряде случаев установлено впервые, существование ряда так называемых полумагических (нетрадиционных магических) чисел нуклонов.

Одновременно было установлено существование плавной зависимости неупругих сечений нейтронов от произведения чисел валентных нуклонов ядра-мишени — так называемая N_pN_n -систематика неупругих сечений нейтронов. Такая систематика, в частности, позволила определить значения ряда нетрадиционных магических (или полумагических) чисел нуклонов и таким образом легла в основу разработанного метода поиска полумагических чисел, на основе анализа нейтронных данных в терминах оптической модели со связью каналов. Применение этого метода для уже известных (с разной степенью достоверности) полумагических чисел N=38, 56, 64 и Z=40, 64 показало полное совпадение результатов такого применения с результатами, полученными ранее другими авторами. Это совпадение может рассматриваться как свидетельство надежности предложенного метода.

3.4.1 Основной результат:

На основе полученных ранее результатов по единому описанию совокупности нейтронных данных для большого числа ядер 58≤ А ≤ 250 было получено оптимальное описание для сложных с точки зрения единого подхода деформированных ядер. Значения параметров квадрупольной деформации, определяющие матричные элементы связи каналов в оптической модели, исходно принимались равными значениям, полученным из электромагнитных процессов, например [1]. В то же время из расчетов различных авторов при возбуждении вибрационных уровней при неупругом рассеяния протонов и нейтронов на околомагических ядрах, следует, что для ядер с замкнутой нейтронной оболочкой β_{pp}[·]<β_{nn}[·]<β^{эм}, а для ядер с замкнутой протонной оболочкой соотношение обратное. Экспериментальные исследования неупругого рассеяния протонов и нейтронов на околомагических ядрах показывают различия ядерных и электромагнитных параметров деформации [2]. Для деформированных ядер нами было получено хорошее феноменологическое описание нейтронных данных при значениях β_2 существенно меньших (~30%) чем величины, определенные из кулоновского возбуждения.

Необходимо исследовать причину такого различия в параметрах квадрупольной деформации и проанализировать такие изменения с точки зрения *N*_p*N*_n–систематики.

[1]. S. Raman et al.// Atom Data Nucl. Data Tabl. 1987. V.36. P.1.

[2]. Hacuat G. // Second Inter. Symp. On Neutron Induced Reactions. Smolenice. 1979.3.4.1 Доклад на конференции

Мордовской М.В., Суркова И.В. // Параметр квадрупольной деформации четночетных ядер в области $58 \le A \le 250$ и оптическая модель со связью каналов.// Доклад на // LXV International Conference "NUCLEUS 2015" "New Horizons in Nuclear Physics, Nuclear Engineering, Femto- and Nanotechnologies", Saint-Petersburg, June 29 – July 3, 2015, Book of Abstracts, p. 168. Стенд. 3.5 Разработка основ создания средств аварийной радиационной защиты третьего поколения (AP3_3) и методов испытаний и контроля для повышения безопасности экологической чистоты ядерной энергетики».

Руководитель темы: Бенецкий Борис Алексеевич

Основные исполнители: Лифанов Михаил Николаевич, нс, кфмн Плотникова Марина Викторовна, нс

3.5 Реферат

РАДИАЦИЯ, АВАРИЯ, ОБЛУЧЕНИЕ, ТЯЖЕСТЬ ПОСЛЕДСТВИЙ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ, ДОЗИМЕТРИЯ, ДОЗИМЕТР, РАДИОМЕТР, ГАММА ДОЗЫ, БЕТА ДОЗЫ, КОРРЕЛЯЦИЯ ДОЗ, СОЧЕТАННОЕ ОБЛУЧЕНИЕ, ПОРАЖАЮЩИЙ ФАКТОР.

В результате ранее проведенных работ была сформулирована проблема контроля радиационной безопасности пожарных при ликвидации аварий и ЧП на радиационноопасных объектах. Эта проблема состоит в наличии разрыва между определениями (понятий) дозовых характеристик и норм радиационной безопасности (в частности – пределов доз), с одной стороны и реальными возможностями инструментальных средств и методов измерений необходимых параметров многофакторного воздействия радиационных поражающих факторов при авариях с другой. Отчет содержит результаты анализа некоторых аспектов этой проблемы и рекомендации по их разрешению.

3.5 Введение

Исследования по теме проводились в соответствии с квартальным планом и являются продолжением ранее выполненных работ. 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 //Препринт ИЯИ – 1380/2014, 40 С. и М.Н. Лифанов, Б.А. Бенецкий /Проблемы дозиметрии при ликвидации последствий ядерных и радиационных аварий//Ядерная физика и инжиниринг, 2013, том 4, № 12, С 1072-1076

Проводился анализ современного состояния радиационной безопасности пожарных и ликвидаторов и возможностей контроля воздействия поражающих факторов при сочетанном облучении, сопровождающем аварии и пожары на радиационно-опасных объектах. Суть проблемы заключается в том, что основной предел доз установлен Нормами радиационной безопасности для эффективной эквивалентной дозы Е –

величины, не измеряемой в условиях аварийного облучения. Эта величина является количественной характеристикой сочетанного воздействия радиационных поражающих факторов на весь организм человека, учитывающей как относительную биологическую эффективность ионизирующих излучений, так и радиационную чувствительность органов и тканей. Вследствие чего она наиболее полно отражает совокупное воздействие радиации на организм человека. В стационарных условиях требования по обеспечению радиационной безопасности (в форме ограничений допустимой плотности потоков при внешнем облучении или пределов годового поступления радиоактивности в организм) могут быть выполнены для каждого радиационно-поражающего фактора в отдельности. И лля ИХ совокупности путем сложения Д03 при наличии соответствующего инструментального обеспечения.

3.5 Основные результаты.

Ранее (см. отчет по теме за 3 кв.2014) была проведена систематизация данных измерений и оценок дозовых характеристик аварийного облучения на корабельных ЯЭУ. Первичные данные этих наблюдений содержатся в монографии [1]. В аварийных условиях гамма дозы измерялись дозиметрами, прокалиброванными в единицах экспозиционных доз (рентгенах). Частично – индивидуальными, частично коллективными с учетом времени пребывания в отсеках с различной радиационной обстановкой. Дозы бета облучения определялись по медико-биологическим показателям в ходе сортировки и наблюдения за пострадавшими (см. годовой отчет по теме за 2014 г.). Было установлено, что значительная доля тяжести сочетанного радиационного поражения связана с инкорпорацией йода-131 в щитовидных железах пострадавших. Его активность измерялась в стационаре после их эвакуации с ПЛА и приводились к начальному значению на основании законов распада и выведения радионуклида из организма человека. Эти данные указывают на быстрый рост активности инкорпорированного йода с увеличением дозы воздействия основного фактора – проникающего гамма облучения (см. таблицу 3.1). В случае конкретной аварии удалось определить коэффициент корреляции ρ доз гамма излучения и активностей радиойода в щитовидной железе у 122 пострадавших, и он составил $\rho = 0,50 \pm 0,13$. Был определен вклад внутреннего облучения от инкорпорированного радиойода. Для его вычисления (переход от столбца 2 к столбцу 3 таблицы 1) использовался дозовый коэффициент 1,60 мкЗв/Бк.

Таблица 3.1 - Сравнение эффективной эквивалентной дозы, формируемой внешним гамма облучением, с вкладами в общую эффективную эквивалентную дозу «неосновных» поражающих факторов сочетанного облучения при авариях на ядерных энергетических установках.

Эффе	Акти	Вклад в	Вклад	Вк	Тяже
ктивная	вность	эффективную	облучения от	лад бета	СТЬ
эквивалентн	йода-131 в	эквивалентну	инкорпорации	облучени	(последстви
ая доза	щитовидной	ю дозу	йода-131 в %	я в % от	я)
внешнего	железе А в	внутреннего	от основного	основног	поражения
гамма	единицах	облучения от	вклада гамма	о вклада	
облучения	106	распада йода-	облучения	гамма	
тела Е _ү , Зв	Бк	131 в		облучени	
		щитовидной		я	
		железе.Ел, Зв			
1	2	3	4	5	6
0,40	1,09	0,087 <u>+</u>	21,8 <u>+</u> 5,0	_	Луче
<u>+</u> 0,05	<u>+</u> 0,18	0,014			вая
0,65	1,5 <u>+</u>	0,120 <u>+</u>	18,5 <u>+</u> 16,	3,1	реакция,
<u>+</u> 0,35	1,1	0,088	8		или без
0,80	1,84 <u>+</u>	0,147 <u>+</u>	18,4 <u>+</u> 3,8	_	симптомов
<u>+</u> 0,05	0,36	0,029			
0,95	2,6	0,208	21,9	4,0	
1,40		_	_	4.6	ОЛБ-
<u>+</u> 0,40					Ι
2,75	_	_	_	9,1	ОЛБ-
<u>+</u> 0,75					II
4,00	19,5 <u>+</u>	1,56 <u>+</u> 0,	39,0 <u>+</u> 16,	8,5	ОЛБ-
<u>+</u> 1,00	6,5	52	3		III
9,45	92,5	7,4	78,3	10,	ОЛБ-
				6	IV
					Лет.исход

Если сравнить воздействие инкорпорации радиойода с воздействием другого «неосновного» поражающего фактора, местной лучевой травмы, или радиационного бета

ожога, (столбец 5 таблицы 1 и годовой отчет по теме за 2014 г.), то нельзя не отметить пять существенных моментов.

(1). Вклад от инкорпорации йода-131 в общую эффективную эквивалентную дозу при авариях на ЯЭУ заметно больше (см. таблицу 1, столбец 4), чем вклад (столбец 5) от бета облучения кожи.

(2). Наличие значимого объема инструментальных данных по инкорпорации йода-131 и отсутствие аналогичных данных по дозам бета излучения, которые оценивались по медико-биологическим показателям. Это различие в полноте информации носит принципиальный характер, поскольку является следствием отсутствия бета дозиметров, способных работать в реальных аварийных условиях.

(3). Возможность вычисления (для определенной выборки пострадавших) коэффициента корреляции (см. выше) между активностью инкорпорированного йода и дозой гамма излучения. Что является прямым доказательством существования и количественной мерой корреляционных связей показателей воздействия этих двух поражающих факторов.

(4). Наличие разработанной ранее математической модели, способной описать распределения тяжести радиационных поражений при авариях как следствие доминирующего влияния человеческого фактора [2], [3].

(5). Опыт успешного применения упомянутой описанию модели к инструментально измеренных распределений гамма дозы И активности инкорпорированного йода-131 при реальной аварии ЯЭУ на ПЛА.

На основании пунктов (2,4,5) можно показать, что распределения гамма дозы и активности йода-131 логнормальные, а распределения их логарифмов – гауссовы. Далее с применением стандартной процедуры, можно перейти от распределения активности инкорпорированного радиойода к распределению вклада внутреннего облучения от его распада E_J в эффективную эквивалентную дозу. Тогда распределение ln E_J также будет гауссово, и, следовательно, нормальная регрессия ln E_J по ln E_{γ} должна быть прямолинейна. Обработка данных, приведенных в таблице 1, показала, что это, действительно, так и привела к определению линейной зависимости для логарифмов:

$$\ln \langle E_J \rangle = -1,4181262 + 1,4448774 \ln E_{\gamma}$$
(1)

Или, опуская знак усреднения,

$$E_{\rm J} = 0,24216 \ E_{\gamma}^{1,44488} \tag{2}$$

В силу влияния причин, упомянутых под пунктами (1,2,3,5), менее обоснованными, но практически аналогичными были результаты, непосредственно следующие из

предположения (в отличие от предыдущего обоснования вывода соотношений (1) и (2)) о нормальной регрессии логарифма эквивалентной дозы бета облучения $\ln H_{\beta}$ по логарифму эквивалентной дозы гамма излучения $\ln H_{\gamma}$ (годовой отчет по теме за 2014 г.). Идейной основой такого предположения может служить только модель доминирования человеческого фактора при формировании тяжести поражений (п.п.4,5). Тем не менее, при нем на основании данных медицинских наблюдений и измерений гамма доз были определены параметры прямой нормальной регрессии:

 $\ln H_{\beta} = 1,\,3470 + 1,503\,\ln\,H_{\gamma} \tag{3}$

Тогда эквивалентная доза, формируемая бета облучением, оказывается связанной с эквивалентной дозой, формируемой гамма облучением, соотношением

$$H_{\beta} = 3,846 H_{\gamma}^{1,503}, \qquad (4).$$

и, соответственно, вклад бета облучения кожи в эффективную эквивалентную дозу составляет:

$$E_{\beta} = 0,\,03846 \,E_{\gamma}^{1,503} \tag{5}$$

Полученные формулы позволяют оценить вклады двух неосновных радиационных поражающих факторов в эффективную эквивалентную дозу (изотропного) сочетанного облучения тела при авариях на ЯЭУ. Результаты приведены в таблице 2. При их сопоставлении полезно иметь ввиду следующее. 1 столбец таблицы содержит разнородные, но уникальные данные измерений в аварийных условиях. 2 столбец содержит результаты, основанные на измерениях активности в условиях стационара. 3 и 4 – расчетные данные. Для оценки точности поправки по формуле (2) надо сравнивать величины, приведенные в первых трех столбцах таблицы 2. Обобщающий вывод такого сравнения может быть сформулирован так. При изменении гамма дозы E_{γ} и, соответственно, величины расчетной поправки от 18,5% E_{γ} до 78,3% E_{γ} расхождение данных во 2 и 3 столбах изменяется (по модулю) от 1,5 % E_{γ} до 12,2 % E_{γ} . Т.е. погрешность расчета дозовой поправки на внутреннее облучение йодом-131 в 6 – 12 раз меньше величины самой этой поправки, которая, в свою очередь, меньше дозы основного поражающего фактора – внешнего гамма излучения.

Таблица 3.2 - Оценки эффективных эквивалентных доз, полученных при авариях на ядерных энергетических установках. На основании данных измерений гамма доз при сочетанном облучении, последующих измерений активности йода-131 в щитовидной железе и данных наблюдений при лечении пострадавших.

Эффективная	Вклал в	Вклал в	Вклал в	Оценка	Тажесть
экриралентиа	эффектирии	эффектирии	эффектирии	оцепка 2ффективной	
я пора	эффективну	эффективну	эффективну	зущективной	(последств
я доза	Ю Экриранантии	Ю Экриранантии	N	эквивалентно	(ки
внешнего	эквивалентну	эквивалентну	эквивалентну	и дозы.	поражения
Гамма	ю дозу	ю дозу	ю дозу ю дозу		
облучения	внутреннего	внутреннего	внешнего	величин по	
тела Е _ү , Зв	облучения от	облучения от	бета	1, 3 и 4	
	распада	распада	облучения от	столбцам	
	йода-131 в	йода-131 в	Еβпо		
	щитовидной	щитовидной	формуле (5),		
	железе Е _Ј ,	железеЕл,	Зв		
	реальные	оценка по			
	дозы, Зв	формуле(2),			
		Зв			
1	2	3	4	5	6
0,40 <u>+</u> 0,05	0,087 <u>+</u> 0,014	0,064	0,009	0,473	Лучевая
0,65 <u>+</u> 0,35	0,120 <u>+</u> 0,088	0,130	0,020	0,800	реакция,
0,80 <u>+</u> 0,05	0,147 <u>+</u> 0,029	0,175	0,028	1,003	или без
0,95	0,208	0,225	0,036	1,211	симптомов
$1,40 \pm 0,40$	—	0,394	0,064	1,858	ОЛБ-І
2,75 <u>+</u> 0,75	—	1,044	0,176	3,970	ОЛБ-(II-
					III)
4,00 <u>+</u> 1,00	1,56 <u>+</u> 0,52	1,795	0,309	6,104	ОЛБ-(III —
					IV)
9,45	7,4	6,216	1,125	15,791	ОЛБ-ІV
					Лет.исход

Приведенные в первых пяти столбцах данные указывают на необходимость пересмотра оценки тяжести сочетанного поражения (см. шестые столбцы таблиц 1 и 2)

В номере 2-2015 журнала «Пожарная безопасность» опубликована статья М.Н. Лифанова и В.И. Логинова (ВНИИПО МЧС) «Дозиметр-тренажер для обучения персонала, работающего в условиях радиоактивного воздействия». Материалы, включенные в статью, являются продолжением ранее проведенных работ, посвященных повышению радиационной безопасности пожарных при авариях на радиационно-опасных объектах. Рассматриваются проблемы безопасности персонала специализированных пожарных частей (СПЧ) на АЭС. Отмечено включение РЗК в список штатных спасательных средств частей пожарной охраны АЭС и обращается внимание на то, что в связи с внедрением новых СИЗ требуется разработка организационных мероприятий по их применению, а также правовых норм радиационной безопасности для пожарных СПЧ [4]. Требуется дальнейшее усовершенствование радиационно-защитных костюмов, в частности, оснащение их радиометрическими приборами. В условиях контролируемого и особенно неконтролируемого облучения спасатели, во-первых, должны получать сигнал, что они находятся в опасной зоне, во-вторых, должен быть налажен учёт доз [5]. Приводятся технические характеристики приборов для оснащения такой спецодежды. Во время учений, которые проводятся в отсутствие радиационного воздействия, для обучения личного состава ориентированию в радиационной обстановке требуется прибор-тренажёр, дозиметра-радиометра. Ориентация имитирующий работы по показаниям индивидуального тренажёра-радиометра даёт возможность спасателям научиться загрязнения». Тренажёр-дозиметр, подсчитывающий обходить «область «дозу», используется для тренировки персонала, занятого сортировкой «поражённых», что позволяет проводить комплексные учения, которые охватывают не только спасателей, но и персонал, контролирующий безопасность работ на заражённом объекте. Излагается принцип работы имитатора-тренажёра дозиметра-радиометра, зарегистрированного как полезная модель в "Роспатенте" [6].

1. Е.Е. Гогин, В.М. Емельяненко, Б.А. Бенецкий, В.Н. Филатов Сочетанные радиационные поражения. – М.: «Известия». – 2000. – 240 с.

 Б.А. Бенецкий /О распределении тяжести поражений при радиационных авариях и способности человека игнорировать радиационный риск // КСФ, 2012, т.39, № 1, С. 34– 42.

3. Б.А. Бенецкий /О влиянии человеческого фактора на распределение тяжести поражений при ядерных и радиационных авариях и на последствия других чрезвычайных ситуаций // КСФ, 2014, т.41, № 1, С. 12–17

4. Бенецкий Б.А., Логинов В.И. Индивидуальная защита пожарных и дозиметрический контроль в условиях повышенной радиационной опасности //Пожарная безопасность № 2008-4.– С.89-95.

5. Лифанов М.Н., Бенецкий Б.А. Проблемы дозиметрии при ликвидации ядерных и радиационных аварий. //Ядерная физика и инжиниринг, 2013, том 4, № 11-12.– с. 1072-1076.

6. Патент на полезную модель № 137628 Имитатор-тренажер дозиметра радиометра // Патентообладатель: ИЯИ РАН, автор: Лифанов М. Н., Заявка № 2013136744, приоритет полезной модели 06 августа 2013 г., зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей РФ 20февраля2014г.

В результате систематизации и анализа данных измерений и оценок дозовых характеристик аварийного облучения на корабельных ядерных энергетических установках получены формулы, позволяющие оценить вклады двух неосновных радиационных поражающих факторов в эффективную эквивалентную дозу (изотропного) сочетанного облучения тела при авариях на ЯЭУ. Проведена оценка эффективных эквивалентных доз, полученных при авариях на ЯЭУ на основании данных измерений гамма доз при сочетанном облучении, последующих измерений активности йода-131 в цитовидной железе и данных наблюдений при лечении пострадавших. Полученные данные указывают на необходимость пересмотра оценки тяжести сочетанного поражения.

Разрабатывались возможные варианты индивидуально-групповой инструментальной дозиметрии, основанные на сочетании оценки вклада нейтронного компонента эффективной эквивалентной дозы на основании показаний гамманейтронного дозиметра для группы лиц, выполняющих определенную работу, и показаний их индивидуальных гамма дозиметров. Рассмотрена возможность использования для решения этой задачи дозиметра-тренажера для обучения персонала, работающего В условиях радиоактивного воздействия. Вследствие отсутствия материальной базы экспериментальная проверка и разработка методических материалов по применению дозиметрической аппаратуры не проводились.

Ввиду отсутствия серийных дозиметров-радиометров для оснащения радиационнозащитных костюмов (см. отчет за 2 кв.) разработана схема дозиметра-радиометра, оснащённого дополнительной функцией, позволяющей считывать показания прибора, размещённого внутри герметичного костюмного пространства. Проведён патентный поиск, показавший положительные перспективы патентования разработки как полезной модели. Проводится оформление заявки в Отдел интеллектуальной собственности ИЯИ.

Получены формулы, позволяющие оценить вклады двух неосновных радиационных поражающих факторов в эффективную эквивалентную дозу (изотропного) сочетанного облучения тела при авариях на ЯЭУ.

3.5 Заключение

Разработан метод оценки относительного вклада бета доз, формируемых при сочетанном гамма-бета облучении ДЛЯ определения аварийном эффективной эквивалентной дозы в режиме реального времени. Метод основан на предположении о наличии корреляционной связи доз гамма и бета излучений и поиске эмпирических закономерностей в соотношениях дозовых характеристик. Предпосылкой к такому подходу является наличие причинных связей (цепочки ядерных превращений, спектры, каскады переходов) при генерировании источников излучений в случае аварий на реакторах. Дозовый вклад бета излучения в эффективную эквивалентную дозу при фиксированной эквивалентной гамма дозе может быть в среднем хорошо описан аппроксимирующей данные наблюдений зависимостью (1). Практически такой же результат (3) может быть получен непосредственно из прямой регрессии логарифма средней эквивалентной дозы бета облучения lnH_в по логарифму дозы гамма облучения lnH_γ (2). Такое согласие является доводом в пользу справедливости предположения о наличии корреляции доз, а простота зависимостей (1) и (3) предопределяет простоту алгоритма при расчете поправок.

Из соотношений (1,2) следует также оценка гамма дозы, соответствующей порогу возникновения лучевого бета ожога при сочетанном облучении. Бета ожог, согласно данным биологической дозиметрии, возникает при бета дозах порядка 8-10 Зв, проявляется, в зависимости от степени, через сутки или часы и вследствие аварии на реакторе возможен при гамма дозах свыше 1,6-1,9 Зв. Это значение находится вблизи границы гамма дозы (2 Зв), определяющей поражение кроветворного костного мозга, приводящее к возникновению ОЛБ-2. В реальности характерные проявления субтотального бета ожога наблюдались у пострадавших при авариях на ЯЭУ, у которых были диагностированы ОЛБ не ниже 2 степени, что также говорит в пользу правильности полученных результатов. В целом, эти результаты являются некоторым приближением к решению проблемы дозиметрии многофакторного воздействия ионизирующей радиации при авариях.

3.5 Публикации

М.Н. Лифанов и В.И. Логинов (ВНИИПО МЧС) //«Дозиметр-тренажер для обучения персонала, работающего в условиях радиоактивного воздействия»./ Пожарная безопасность. №2 с. 92-95. 2015

Б.А. Бенецкий /О прогнозировании распределений тяжести индивидуальных поражений при радиационных авариях // КСФ, 2015, т.42, № 7, С. 28–38

Препринт ИЯИ РАН: Б.А. Бенецкий, М.В.Плотникова / Роль человеческого фактора в формировании последствий техногенных и антропогенных воздействий при авариях и чрезвычайных ситуациях //Препринт ИЯИ – 1403/2015, 28 С.

Патент: Заявка на патент. Способ прогнозирования распределений тяжести индивидуальных поражений при радиационных авариях, авторы Б.А. Бенецкий, М.В. Плотникова, направлена в Роспатент.

3.5 Заключение

Разработан метод оценки относительного вклада бета доз, формируемых при гамма-бета облучении аварийном сочетанном для определения эффективной эквивалентной дозы в режиме реального времени. Метод основан на предположении о наличии корреляционной связи доз гамма и бета излучений и поиске эмпирических закономерностей в соотношениях дозовых характеристик. Предпосылкой к такому подходу является наличие причинных связей (цепочки ядерных превращений, спектры, каскады переходов) при генерировании источников излучений в случае аварий на реакторах. Дозовый вклад бета излучения в эффективную эквивалентную дозу при фиксированной эквивалентной гамма дозе может быть в среднем хорошо описан аппроксимирующей данные наблюдений зависимостью (1). Практически такой же результат (3) может быть получен непосредственно из прямой регрессии логарифма средней эквивалентной дозы бета облучения lnH_b по логарифму дозы гамма облучения lnH_γ (2). Такое согласие является доводом в пользу справедливости предположения о наличии корреляции доз, а простота зависимостей (1) и (3) предопределяет простоту алгоритма при расчете поправок.

Из соотношений (1,2) следует также оценка гамма дозы, соответствующей порогу возникновения лучевого бета ожога при сочетанном облучении. Бета ожог, согласно данным биологической дозиметрии, возникает при бета дозах порядка 8-10 Зв, проявляется, в зависимости от степени, через сутки или часы и вследствие аварии на реакторе возможен при гамма дозах свыше 1,6-1,9 Зв. Это значение находится вблизи границы гамма дозы (2 Зв), определяющей поражение кроветворного костного мозга, приводящее к возникновению ОЛБ-2. В реальности характерные проявления субтотального бета ожога наблюдались у пострадавших при авариях на ЯЭУ, у которых были диагностированы ОЛБ не ниже 2 степени, что также говорит в пользу правильности полученных результатов. В целом, эти результаты являются некоторым приближением к решению проблемы дозиметрии многофакторного воздействия ионизирующей радиации при авариях.

4 Радиоизотопные исследования

Руководитель работы, заведующий лабораторией радиоизотопного комплекса, д.х.н. Б.Л.Жуйков

4 СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Ответственные исполнители:

Зав. сектором, канд. техн. Наук Ермолаев С.В.

Зав. Сектором Коханюк В.М.

Научный сотрудник канд. хим. Наук Чудаков В.М.

Исполнители:

Главный инженер установки Габриелянц Ю.Г.

Научный сотрудник Скасырская А.К.

Научный сотрудник канд. хим. Наук Лапшина Е.В.

Младший научный сотрудник Васильев А.Н.

Стажер-исследователь Остапенко В.С.

Инженер-экспериментатор Кобцев А.А.

4 ΡΕΦΕΡΑΤ

Отчет 35 с., 25 рис., 5 табл., 14 источников РАДИОИЗОТОПНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являются продукты и процессы с образованием радиоактивных изотопов, которые происходят при взаимодействии протонов средних энергий с различными материалами. Целью работ является изучение закономерностей в этих процессах (в частности. при высокой интенсивности пучка протонов), разработка эффективных методов получения радионуклидов, в особенности, тех из них, которые могут использоваться в прикладных целях, в первую очередь – для медицинской диагностики и терапии. Методология работ состоит в том, что различные мишени облучают на линейном ускорителе ИЯИ РАН, изучаются и оптимизируются режимы и конструкция мишеней. Изучаются полученные продукты и разрабатываются методы радиохимического их выделения из облученных мишеней. Изучается возможность использования полученных радионуклидов для медицинского применения, в частности, с использованием генераторов изотопов.

Получены следующие основные результаты:

 Продолжено изучение зависимости выходов стронция-82 от режима облучения рубидиевых мишеней при высоких токах протонного пучка и при различной форме и смещении пучка.

2. Исследованы характеристики генератора рубидия-82, изготовляемого на основе стронция-82 в РНЦ РХТ (С-Петербург) и ARRONAX GIP (Франция) с целью совершенствование генератора и инжекционной системы, используемых при диагностике кардиологических и онкологических заболеваний методом позитронной эмиссионной томографии (ПЭТ).

3. Проведены работы ИЯИ РАН совместно с МГУ им. М.В. Ломоносова по получению медицинских радионуклидов ²²³Ra, ²²⁵Ac и ²³⁰Pa из мишени металлического тория, облученной протонами средних энергий. Изучены процессы в генераторе ²²⁵Ac \rightarrow ²¹³Bi.

4 ВВЕДЕНИЕ

В Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт ядерных исследований РАН (ИЯИ РАН) эксплуатируется крупнейший в Европе и Азии линейный ускоритель. Особенностью этой уникальной установки является то, что имеется возможность ускорять протоны до сравнительно высоких энергий 500 МэВ (в настоящее время – 209 МэВ), при этом ускоритель обеспечивает высокую интенсивность (ток) пучка – реально до 140 мкА. В 1992 году была создана крупнейшая на тот момент в мире установка для производства изотопов на ускорителе (на отводке пучка протонов 160 МэВ), которая впоследствии регулярно модернизировалась, как и сам линейный ускоритель.

Получение медицинских изотопов на ускорителях для диагностики и терапии различных заболеваний имеет большое научное, технологическое и социальное значение. На линейном ускорителе получают в больших количествах важнейший медицинский радионуклид стронций-82 (используемый при изготовлении генераторов рубидия-82 для диагностики с помощью позитронно-эмиссионной томографии). Также, пока в небольших количествах, получают 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 важных побочных продуктов – радий-223 и протактиний-230. Также в данных исследованиях разрабатываются, изучаются и совершенствуются генераторы 82 Sr/ 82 Rb, 225 Ac/ 213 Bi и 223 Ra/ 211 Pb, при эксплуатации которых получают короткоживущие медицинские радионуклиды, являющиеся продуктом радиоактивного распада долгоживусков.

4 ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

4.1 Изучение процесса получения стронция-82 из мишеней металлического рубидия, облучаемого протонами средних энергий

4.1.1 Изучение процесса наработки стронция-82 на ускорителе ИЯИ РАН

В 2015 году проведено облучение 8 рубидиевых мишеней на линейном ускорителе ИЯИ РАН током высокой интенсивности с исходной энергией протонов 143 МэВ. При этом параметры облучения меняли с целью определения зависимости выхода стронция-82 от значения этих параметров – меняли смещение по оси Х (при том же смещении по оси У или, меняя смещение по У), а также меняли размеры пучка по Х и по У. Облученные мишени были направлены на радиохимическую переработку в ЛАНЛ, где определялся выход в каждой мишени, а также потери при химической переработке. Потери зависят от параметров облучения, так как в определенных случаях стронций необратимо сорбируется на внутренней поверхности оболочки и не может быть извлечен.

Дополнена зависимость выхода стронция-82 от смещения центра пучка по оси X (включая точки по смещению +6 и +3 мм от центра). Показано, что при достаточно узком пучке смещение +6 мм приводит к падению выхода, но всего на 5%, если размер пучка невелик (параметр «распушенности» 12.5). При смещении на +3 мм выход остается максимальным, практически таким же, как и при смещении +2, т.е. 0,88-0,90 по фактору выхода (при факторе «распушенность» 16-18). Фактор «распушенность» измеряли по графически измеренным размерам пучка, он не всегда удовлетворительно коррелирует с расчетами, полученными по температурным измерениям графитового коллиматора.

Показано, что при данной конструкции мишени и при быстром вращении пучка с определенными параметрами (сигма 2.3-2.6 мм, эллипс 5,5х4,6 мм, частота вращения пучка 4,85 кГц, частота повторения импульсов пучка 50 Гц, длина импульса – 200 мкс) повышение среднего тока до125 мкА не приводит к заметному снижению выхода. Однако, по данным ЛАНЛ это приводит к увеличению содержания примесей при растворенном рубидии, по-видимому, в результате более интенсивного взаимодействия металлического рубидия с материалом оболочки во время облучения.

Зависимость выхода стронция-82 от параметров облучения требует дополнительного изучения. В частности, будут получены новые экспериментальные данные и проведены расчеты по программе ANSYS.

4.1.2 Внедрение технологии получения стронция-82 на научно-производственном предприятии ARRONAX (Франция)

В рамках существующих Соглашений о научном сотрудничестве между ИЯИ РАН и ARRONAX GIP были проведены работы по усовершенствованию оборудования для

выделения ⁸²Sr в горячих камерах ARRONAX по технологии ИЯИ РАН. Была облучена мишень на ускорителе протонов ARRONAX с энергией 70 МэВ с высоким током пучка, усовершенствована технология переработки мишеней новым способом, основанном на прямой сорбции стронция из жидкого рубидия.

Мишень была облучена согласно следующим параметрам:

 Средний ток пучка: 	100 мкА
- Интегральный ток пучка	1300 мк·ч
- Продолжительность облучения	13 ч
- Окончание облучения	13.05.2015

При облучении не произошло сильного потемнения оболочки, что говорит об устойчивости мишени.



Рисунок 4.1 - Мишень металлического Rb, облученная на ускорителе ARRONAX.

Для выделения стронция мишень нагревали 3 ч при 330°С в локальной атмосфере аргона для обеспечения сорбции стронция на внутренней поверхности оболочки. Затем рубидий был откачан, а стронций смывали с внутренней поверхности следующим образом:

1) 3 мл H₂O, затем 6.5 мл 6М HNO₃ в течение 2 ч (97% стронция смыто);

2) 9.5 мл 4М HNO₃ ~12 ч (3% стронция смыто);

3) 9.5 мл H₂O ~2 ч (менее 0,5% стронция – предел обнаружения).

После этого полученный раствор стронция доочищали с помощью ионообменной хроматографии на колонках из Chelex 100, Dowex 1 и Dowex 50.

Откачанный рубидий переводили в окисленное состояние следующим образом:

Прокачка воздухом с расходом:

25 мл/минв течение 15 мин. при 50-55°С;100 мл/минв течение 30 мин. при 50-55°С;500 мл/минв течение 30 ч при 50-55°С.

После коррекции процедуры была достигнута полная и безопасная нейтрализация. Также была испытана нейтрализация сразу влажным аргоном (рис. 4.2).



Рисунок 4.2 - Стадии нейтрализации металлического рубидия аргоном.

Метод нейтрализации – сразу влажным аргоном был найден чересчур опасным, так как над металлическим рубидием, покрытым коркой, в этом случае образуется водный раствор гидроксида рубидия, который может затем бурно взаимодействовать с металлическим рубидием.

Продукты, образовавшиеся в мишени после облучения, приведены в табл.4.1.

Таблица 4.1 - Продукты, образовавшиеся в мишени после облучения на 05.06.15 (23 дня после окончания облучения).

Радионуклид	⁸² Sr	⁸⁵ Sr	⁸³ Rb	⁸⁴ Rb	⁸⁶ Rb
Активность, мКи	292	99.8	312 *	350	120

Кумулятивная активность, включающая ⁸³Rb, образовавшийся из ⁸³Sr.

В результате этих экспериментов технология производства стронция-82 по методу ИЯИ РАН доработана и вполне готова к регулярному производству во Франции, что и будет осуществляться в ближайшее время.

4.2 Усовершенствование конструкции и методики изготовления медицинского генератора стронций/рубидий-82 для позитронно-эмиссионной томографии

В рамках действующих научных соглашений между ИЯИ РАН и РНЦРХТ Мнздрава РФ (г. Санкт-Петербург), ИЯИ РАН и ARRONAX GIP (Франция) продолжены работы по

исследованию и улучшению характеристик разработанного в ИЯИ РАН генератора Sr-82/Rb-82, который внедряется в этих организациях для использования при кардиологических и онкологических заболеваниях методом позитронной эмиссионной томографии (ПЭТ). Также в данных организациях с участием ИЯИ РАН разрабатываются инжекционные системы для генератора. Для этого изучалась дозовая нагрузка при элюировании радиофармпрепарата (РФП) из генератора рубидия-82 и гидродинамические характеристики генераторной системы при различных скоростях элюирования.

4.2.1 Снижение дозовой нагрузки при диагностике

На основании оптимальных параметров введения радиофармпрепарата (РФП) на основе рубидия-82 при диагностировании методом ПЭТ, рекомендованных РНЦРХТ, определена радиационная нагрузка (мощность дозы гамма-излучения) на детекторы ПЭТсканера при диагностических процедурах при различных величинах диагностической дозы РФП (активность рубидия-82, вводимая в пациента), которая обусловлена остаточной активностью в пластиковом удлинителе. Показано, что максимальная величина активности рубидия-82 в пластиковом удлинителе (длина 75 см, внутренний диаметр 0.09 см) составляет ~1 мКи (38 МБк) при диагностической дозе 1300 МБк, вводимой в пациента за время 14 ± 3 с. На основании этого было рассчитано, что для обеспечения корректной работы ПЭТ-сканера максимальная толщина стационарной защиты из сплава на основе вольфрама должна быть ≤ 1.5 см при расстоянии между датчиком ПЭТ-сканера и пластиковым удлинителем с активностью ≥ 20 см.

4.2.2 Снижение гидродинамического сопротивления генераторной системы

По результатам клинических испытаний радиодиагностического средства, проведенных в РНЦРХТ, показано, что наиболее эффективно проводить элюирование в режиме постоянной скорости потока элюента. Скорость элюирования в зависимости от активности стронция-82 в генераторе меняли от 18 до 90 мл/мин в течение всего времени эксплуатации генератора рубидия-82. При этом гидродинамическое сопротивление генераторной системы увеличивается с 0,8 атм до 6-7 атм. Время элюирования для генератора с активностью по стронцию-82 от 160 до 20 мКи (от 5920 до 740 МБк) должно составлять 14 ± 3 с. Элюируемый объем радиодиагностического средства от 2 до 25 мл. В соответствии с требованиями при внутривенном введении ультра короткоживущих радиофармпрепаратов генераторного происхождения, генераторная система должна состоять из последовательно расположенных генераторной колонки, двух стерилизующих фильтров и подводящих элюент и отводящих элюат (вводимый РФП) коммуникаций.

Уменьшить гидродинамическое сопротивление генераторной системы можно путем снижения сопротивления генераторной колонки, что достигается заменой используемой трубки генераторной колонки на трубку с большим внутренним диаметром.

Были изготовлены две различные генераторные колонки с внутренним диаметром генераторной колонки 7,5 мм и 9,4 мм, характеристические размеры которых приведены в табл.4.2. Указанные генераторные колонки не заряжались радионуклидом Sr-82.

Таблица 4.2 - Основные размеры генераторных колонок.

№ колонки	Внутренний	Площадь	Длина трубки	Объём
	диаметр трубки	сечения трубки	генераторной	генераторной
	генераторной	генераторной	колонки, см	колонки, см ³
	колонки, см	колонки, см ²		
1	0,75	0,44	2,7	1,2
2	0,94	0,71	2,7	1,9

Было измерено гидродинамическое сопротивление пустых колонок и таких же колонок с сорбентом при скорости подачи элюента (изотонический раствор) от 5 мл/мин до 200 мл/мин. Полученные результаты приведены на (рис. 4.3 и 4.4). Измерения показали, что во всем использовавшемся диапазоне скорости подачи элюента относительное уменьшение гидродинамического сопротивления колонки без сорбента составляет ~10% при переходе к колонке с трубкой большего диаметра (рис. 5), а в случае колонок с сорбентом на ~35%.



Рисунок 4.3 - Гидродинамическое сопротивление металлических компонентов генераторных колонок (колонок без сорбента)


Рисунок 4.4 - Гидродинамическое сопротивление генераторных колонок с сорбентом



Рисунок 4.5 - Гидродинамическое сопротивление генераторных колонок с сорбентом.

4.3 Отработка методики сборки генераторной колонки и зарядки генератора рубидия-82 в горячей камере (Франция, Нант, ARRONAX)

В рамках действующего научного соглашения между ИЯИ РАН и ARRONAX GIP были изготовлены две генераторные колонки, которые использовали для изготовления двух генераторов (с активностью по стронцию-82 0.1 мКи и 11 мКи) и сравнительного изучения их характеристик.

В ходе изготовления генератора с низкой активностью (0.1 мКи) совместно с персоналом ARRONAX GIP была отработана методика сборки генераторной колонки и зарядки генератора стронцием-82, проведены два рабочих семинара, высказано предложение о введении дополнительного тестирования в процессе сборки генераторной колонки, позволяющее исключить изготовление некондиционных генераторных колонок.

Генератор с активностью 0.1 мКи – это российский вариант генераторной колонки (рис. 6, слева) в защитном свинцовом контейнере (генератор ГР-02). Зарядку генератора проводили в вытяжном шкафу с ламинарным потоком и дополнительной радиационной защитой (рис. 4.7).

Второй генератор с активностью 11 мКи – это генераторная колонка (рис. 6, справа), аналогичная российской, но размещенная в вольфрамовом защитном контейнере (конструкция и изготовление LEMER PAX, Франция). Этот генератор впервые изготовили в горячей камере в строгом соответствии требованиям радиационной безопасности, действующим на территории Франции (рис. 8). Цель работы состояла в определении наиболее оптимального расположения компонентов установки для зарядки генератора в ограниченном пространстве горячей камеры.

По результатам проделанной работы отмечена необходимость выделения постоянного места для сборки и тестирования генераторной колонки в процессе её сборки, разработки конструкции и изготовления стендов для проведения этих работ, а также зарядки генератора стронцием-82 в горячей камере и его тестирования.



Рисунок 4.6. Генераторные колонки на фланце (слева – для генератора ГР-02, ИЯИ РАН; справа – для генератора с вольфрамовым защитным контейнером LEMER РАХ)



Рисунок 4.7 - Зарядка в ламинарном шкафу. Вариант генератора ГР-02 (ИЯИ РАН)



Рисунок 4.8 - Зарядка генератора в горячей камере. Генератор - в защитном вольфрамовом контейнере LEMER PAX.

4.3.1 Исследование долговечности генератора рубидия-82 с разными конструкциями колонки

Для изучения зависимости между конструкцией колонки генератора рубидия-82 и максимальным возможным периодом ее эксплуатации были изготовлены, собраны и заряжены стронцием-82 четыре генераторных колонки, отличающиеся длиной трубки генераторной колонки, сечением внутреннего объема генераторной колонки и его объемом. Фиксация трубки генераторной колонки осуществлялось с помощью стандартных муфт и фриттов производства Swagelok. Подвод элюента и отвод элюата проводили через стандартные трубки с внутренним диаметром 1,6 мм. Характеристики изготовленных генераторных колонок представлены в табл. 4.3.

N⁰	Диаметр	Сечение	Длина	Объем	Macca	Плотность
колонки	колонки,	колонки,	колонки,	колонки,	сорбента,	сорбента,
	СМ	см ²	СМ	cm ³	Г	г/ с м ³
1	1,17	1,07	2,7	2,89	8,4	2,9
2	0,40	0,13	2,7	0,34	1,0	2,9
3	0,87	0,59	2,7	1,60	4,8	3,0
4	1,17	1,07	4,6	4,94	14,8	3,0

Таблица 4.3 - Основные характеристики генераторных колонок

Колонки изготавливали и тестировали по стандартной запатентованной разработанной в ИЯИ РАН методике. Единообразие заполнения колонок сорбентом оценивали по гидродинамическому сопротивлению колонок и величине плотности сорбента (приведена в табл. 4.3). Все колонки были заряжены одинаковым количеством стронция-82 (~ 0,125 мКи). В связи с длительностью эксперимента окончание работы перенесено на первый квартал 2016 г.

4.4 Разработка и совершенствование метода получения актиния-225, радия-223 и протактиния-230 для терапии онкологических заболеваний

Для осуществления работ по изучению процессов выделения актиния-225, радия-223 и протактиния-230 из облученного тория в период 01-02.03.2015 была облучена экспериментальная ториевая мишень. В соответствии с договором, заключенным между ИЯИ РАН и МГУ им. Ломоносова (кафедра радиохимии), были проведены совместные работы по дальнейшему развитию технологии выделения.

4.4.1 Совершенствование хроматографических процедур для получения радиевой фракции высокой радионуклидной чистоты

Предложенная ранее схема выделения радия-223 одновременно с актинием-225 имеет возможности для усовершенствования с целью получения продукта более высокой чистоты. В прежней схеме очистку радия проводили с помощью катионообменной смолы Dowex 50x8 и экстракционно-хроматографического сорбента Sr Resin (TrisKem) (Отчет ЛРИК за 2014 г, раздел 3.4). Полученный указанным способом продукт содержит детектируемые (в сумме ~ 0,5%) примеси сурьмы и серебра. Проведено систематическое изучение сорбции сопутствующих радию продуктов облучения на Dowex 50x8 и Sr Resin.

Определены массовые коэффициенты сорбции основных ионов в элюате DGA Resin в зависимости от концентрации хлорной и винной кислот на Dowex 50x8 (Таблица 4). Винную кислоту использовали как реагент, образующий комплексы с сурьмой, которые не задерживаются смолой. Для определения влияния винной кислоты в сильнокислых средах на сорбцию провели три серии экспериментов:

- сорбция из хлорнокислых растворов в отсутствии винной кислоты ([HClO₄] = 5·10⁻³ – 4 М);

- сорбция из растворов с постоянной концентрацией хлорной кислоты (1 М) и переменной концентрацией винной (10⁻³ – 1 М);

- сорбция из растворов с постоянной концентрацией винной кислоты (1 М) и переменной концентрацией хлорной (0,5–4 М).

Установлено, что оптимальным для проведения сорбции Ra-Ba и элюирования Sb с колонки Dowex 50x8 является раствор, содержащий 0,5-1 M хлорную и 1 M винную кислоту. Кроме того, результаты статических экспериментов показывают, что указанным раствором отделяются также Cs, Ru и Te, в то время как Ag в форме Ag(I) остается на колонке.

Таблица 4.4 - Массовые коэффициенты распределения D_w некоторых ионов в зависимости от концентрации хлорной и винной кислотами на Dowex 50x8.

	D _w (Ra)	D _w (Ba)	D _w (Cs)	D_{w} (Sb)	D _w (Ag)	D _w (Ru)	D _w (Te)
0.005 M HClO ₄	>5000	>1000	1169±83	53±5	>500	504±33	126±9
0.1 M HClO ₄	4997±65	>1000	150±16	26±5	>500	298±13	27±5
0.5 M HClO ₄	322±21	631±24	22±3	7±2	200±16	40±6	1±1

1 M HClO ₄	137±14	155±11	8±1	4±2	42±25	28±6	3±2
2 M HClO ₄	28±4	35±6	1±1	2±2	20±15	8±3	2±2
3 M HClO ₄	16±4	16±2	1±1	2±1	27±14	5±2	4 ± 2
4 M HClO ₄	13±2	12±2	1±1	3±1	24±15	4±2	5±2
1 M HClO ₄ + 1 M винная к-та	57±5	76±8	5±3	2±2	63±35	8±3	1±1
1 М НСЮ4 + 10 ⁻¹ М винная к-та	102±7	127±10	5±1	1±1	87±37	12±3	1±1
1 М НСЮ4 + 10 ⁻² М винная к-та	116±7	134±10	5±1	2±1	100±35	13±4	2±1
1 М НСЮ ₄ + 10 ⁻³ М винная к-та	138±7	145±12	6±1	3±1	84±39	13±4	7±4
0.5 М НСЮ4 + 1 М винная к-та	158±9	246±14	15±3	4±3	428±24	28±4	8±2
1 M HClO ₄ + 1 M винная к-та	57±5	76±8	5±3	2±2	63±35	8±3	1±1
2 M HClO ₄ + 1 M винная к-та	16±4	19±5	4±1	2±1	84±27	5±2	7±3
3 M HClO ₄ + 1 M винная к-та	10±2	11±3	2±1	1±1	38±25	3±2	4±2
4 M HClO ₄ + 1 M винная к-та	9±2	7±3	1±1	1±1	36±24	2±1	4±2

Основываясь на полученных данных сорбции в статических условиях, исследовали различные варианты колоночного (динамического) разделения. В результате были определены оптимальные параметры выделения Ra-Ba фракции на Dowex 50x8 (Puc. 9). При пропускании исходного раствора и промывании колонки раствором смеси кислот (1 M HClO₄ + 1 M винная кислота) полностью элюируются Sb, Te, Cs, а также Nb. Затем раствором 2 M HClO₄ десорбируется >99% Ag, а Ba-Ra фракция, с примесями Ru и Ag (< 1%), элюируется 4 M HClO₄.



Рисунок 4.9 - Профиль элюирования радия и радионуклидных примесей с колонки Dowex 50x8. Исходный раствор – элюат DGA Resin в 1 М HClO₄ + 1 М винная к-та, $V_{copf} = 2,0$ мл, $\emptyset = 6$ мм, $\upsilon = 0,4-0,5$ мл/мин.

Отделение радия от бария и окончательную доочистку от других радионуклидов проводили на сорбенте Sr Resin. Были проведены эксперименты по определению коэффициентов удерживания радия и сопутствующих ему катионов в статических условиях в широком диапазоне концентраций хлорной кислоты, т.к. опубликованные в литературе данные ограничиваются диапазоном 0,5-8 М. Полученные значения k` представлены на рис. 4.10.



Рисунок 4.10 - Зависимости k` ионов Ba, Ra, Ag и Cs при сорбции на смоле Sr Resin от концентрации HClO₄. Штриховыми линиями показаны данные из работы Horwitz P. Radium Separation Method. // [57th Radiobioassay & Radiochemistry Measurements Conference Sandestin, Florida, 2011, p. 431-435].

Максимум удерживания радия и бария на Sr Resin соответствует 0,5-3 М HClO₄, причем для Ra максимальное значение k` превосходит 10^2 , а для Ba достигает 10^3 свободных колоночных объемов. Te, Sb, I, La и Ru вовсе не проявляют сродства к сорбенту, что находится в соответствии с принципом соответствия размеров иона и краунэфира. При этом цезий почти не сорбируется в этих условиях (k` < 10), а сорбция серебра снижается в данном диапазоне концентраций кислоты от нескольких десятков до единиц свободных колоночных объемов.

Указанные значения k` хорошо согласуются с литературными данными и позволяют предложить три варианта колоночного выделения радия:

- сорбция Ra (а также Ba и Ag) из 0,5-3 М HClO₄, затем элюирование радия концентрированным раствором хлорной кислоты;

- сорбция Ra (а также Ba и Ag) из 0,5-2 М HClO₄, затем элюирование радия 3 М азотной кислотой;

- сорбция Ra и Ba из 4 М HClO₄, элюирование серебра 4 М хлорнокислым раствором,

затем десорбция радия 3 М азотной кислотой.

Основываясь на полученных данных сорбции в статических условиях, исследовали различные варианты колоночного разделения. Оптимальные параметры финишной

очистки, при которых получили радиевую фракцию с радионуклидной чистотой > 99.8%, представлены на рис. 4.11.



Рисунок 4.11 - Профиль элюирования радия и радионуклидных примесей с колонки Sr Resin. Исходный раствор – элюат Dowex 50x8 в 4 М HClO₄, $V_{cop6} = 2,5$ мл, Ø = 6 мм, v = 0,4-0,5 мл/мин.

В данном случае радийсодержащий раствор после разделения на Dowex 50x8 непосредственно подавали на колонку со Sr Resin. Колонку промывали раствором 4 М HClO₄ до полной десорбции серебра, при этом также отделялись остатки La, Ru и Te (Te не показан по причине крайне низкого содержания). Затем радий элюировали раствором 3 М HNO₃, а барий оставался на сорбенте.

4.4.2 Выделение радия-223 из органической фазы после экстракции тория

Поскольку после отделения тория ²²³Ra накапливается из ²²⁷Th, исследована возможность его реэкстракции из органических растворов Д-2-ЭГФК растворами хлорной кислоты (Табл. 5) с последующей доочисткой на Sr Resin.

<u> </u>	$\Psi K (1.11)$	в толуоле) р	астворами	хлорной ки	аслоты. Пог	решность с	составляет	He oonee 5%
		Th	Pa	Zr	Nb	Ce	Sb	Ι
	0,1 M	< 1%	<1%	< 1%	< 1%	89%	27%	24%
	0,5 M	< 1%	<1%	< 1%	< 1%	88%	47%	26%
	1 M	< 1%	<1%	< 1%	< 1%	100%	43%	26%
	2 M	< 1%	< 1%	< 1%	< 1%	69%	47%	26%

Таблица 4.5 - Реэкстракция тория и сопутствующих продуктов его облучения из Д-2-ЭГФК (1:1 в толуоле) растворами хлорной кислоты. Погрешность составляет не более 5%.

5 M	< 1%	<1%	< 1%	< 1%	100%	37%	25%
7 M	< 1%	< 1%	< 1%	< 1%	77%	6%	26%
9 M	< 1%	< 1%	< 1%	< 1%	11%	3%	23%

В широком диапазоне концентраций хлорнокислые растворы реэкстрагируют вместе с радием только церий, сурьму и йод и, таким образом, являются подходящими для проведения его реэкстракции. Это удобно еще и тем, что позволяет проводить концентрирование радия на Sr Resin, непосредственно подавая реэкстракт на колонку, заполненную сорбентом.

На Рис. 4.12 показан профиль элюирования радия и радионуклидных примесей с колонки Sr Resin. Реэкстракцию радия из органической фазы Д-2-ЭГФК проводили 2 М хлорной кислотой, а полученный раствор непосредственно подавали на колонку, которую затем промывали хлорной кислотой той же концентрации до прекращения элюирования йода. Сурьма и церий выходили с первыми порциями элюата.

Радий десорбировали 3 М азотной кислотой, общий объем фракции не превысил 10 мл. В полученном таким образом радии γ-спектрометрически не было обнаружено радионуклидных примесей, и радионуклидная чистота составила не менее 99,8%.



Рисунок 4.12 - Профиль элюирования радия и радионуклидных примесей с колонки Sr Resin. Исходный раствор – реэкстракт из органической фазы после ЖЖЭ Д-2-ЭГФК (1:1 в толуоле) в 2 М HClO₄, V_{сорб} = 2,5 мл, Ø = 6 мм, v = 0,4-0,5 мл/мин.

4.4.3 Оптимизация способа совместного выделения актиния-225 и радия-223 из облученного тория

На основании проведенных экспериментов предложена усовершенствованная методика одновременного выделения радия и актиния из облученной ториевой мишени. Принципиальная схема разделения представлена на рис. 13 и включает стадии:

-вскрытие и растворение мишени в 7 М HNO₃ с добавлением каталитического количества HF(< 10⁻² M);

- отделение Th(IV) двукратной жидкость-жидкостной экстракцией раствором Д-2-ЭГФК в толуоле (1:1);

- выделение актиний-лантанидной фракции на колонке DGA Resin (сорбция радионуклидов из рафината в 6 М HNO₃, десорбция 0,01 М HNO₃);

- доочистка ²²⁵Ac от лантанидов на колонке TRU Resin в 3 М HNO₃;

- выпаривание радийсодержащего элюата с колонки DGA Resin, растворение остатка в 1 М HClO₄ + 1 М винной кислоте;

- выделение Ra-Ba фракции из полученного раствора на колонке Dowex 50x8 (элюирование 1 M HClO₄ + 1 M винной кислотой, затем 2 M HClO₄ и 4 M HClO₄);

- доочистка 223 Ra от бария и следов серебра и рутения на колонке Sr Resin (колонка промывается 4 М HClO₄, 223 Ra десорбируется 3 М HNO₃);

- выдерживание органической фракции после отделения Th(IV) 21 день для накопления радия, который реэкстрагируют 2 М HClO₄;

- доочистка полученного реэкстракта ²²³Ra (сорбируют на колонке со Sr Resin, а затем элюируют 3M HNO₃).

Таким образом, в результате переработки мишени по описанной методике можно получить в качестве продукта растворы нитрата актиния (III) и нитрата радия (II) в 3 М азотной кислоте.

191



Рисунок 4.13 - Схема выделения ²²⁵Ас и ²²³Ra из облученной протонами ториевой мишени.

4.4.4 Сорбция и выщелачивание ²²³Ra на частицах гидроксиапатита

Проведены эксперименты по разработке научных подходов к получению нового радиофармацевтического препарата на основе ²²³Ra, в качестве носителя которого используются биодоступные и биоразлагаемые частицы гидроксиапатита (ГАП).

Определены кинетические характеристики и оптимальные условия проведения сорбции радионуклида на различных текстурных формах гидроксиапатита (варьировали размер частиц, их удельную поверхность и порозность), а также обратимость данного процесса в физиологической среде (0,9% раствор NaCl). В качестве сорбента выступали сферические гранулы ГАП (ГАП_{сф}), в том числе подвергнутые высокотемпературной обработке (ГАП_т) и водная суспензия нанокристаллов ГАП. Кроме того, в ряде экспериментов²²³Ra вводился непосредственно в процессе синтеза самого ГАП.

Установлено, что в условиях эксперимента максимальное извлечение радионуклида из водных растворов достигается при значении pH 5-7 (рис. 4.14) и соотношении твердой/жидкой фаз > 10 мг/мл (рис. 4.15).



Рисунок 4.14 - Зависимость сорбции радия на ГАП от рН матричного раствора.



S, m²/ml

Рисунок 4.15 - Зависимость сорбции радия на ГАП от соотношения твердой и жидкой фаз. Сорбция на наночастицах показана синим, на сфероидах 350 мкм – красным цветом.

Частицы ГАП_т практически не сорбировали радий, в то время как гранулы ГАП_{сф} за 2 ч извлекают более 80% (рис. 4.16). При этом в физиологическом растворе десорбция составила $50\pm5\%$ (рис. 4.17). Динамику проникновения радия вглубь пористых гранул сорбента удалось визуализировать и оценить с помощью метода авторадиографии. Нанокристаллы ГАП уже в первые 10 минут извлекают почти 98% радионуклида (рис. 16), при этом степень десорбции падает до $8\pm5\%$ (рис. 4.17). Введение ²²³Ra в щелочную среду в процессе синтеза ГАП (pH~12) закономерно приводит почти к 100% извлечению

его из раствора. Однако степень десорбции в этом случае оказалась выше (15±5 %) (рис. 4.17), что возможно связано с образованием собственной фазы гидроксида радия и его последующим переходом в раствор. Во всех случаях степень десорбции можно понизить температурной обработкой (800-900⁰C) сорбента с радионуклидом.





Рисунок 4.16 - Кинетическая зависимость сорбции радия на ГАП различного типа. Сорбция на наночастицах показана синим, на сфероидах 350 мкм – красным, а на сфероидах 350 мкм после отжига при 1200 ^оС – зеленым цветом.





Рисунок 4.17 - Кинетическая зависимость десорбции радия с частиц НАР различного типа. Синим цветом обозначена десорбция радия с наночастиц, в которые радий вводили во время синтеза, красным - с наночастиц, на которых радий сорбировали из раствора, зеленым - десорбция со сфероидов 350 мкм, а желтым – со сфероидов 350 мкм, которые после сорбции отжигали при 900 °C.

4.4.5. Выделение ²³⁰Ра из облученной ториевой мишени с учетом ранее разработанного способа совместного выделения²²⁵Ас и²²³Ra

 230 Ра, наряду с 225 Ас и 223 Rа, - перспективный для ядерной медицины альфаизлучатель. Около 8% 230 Ра распадается в 230 U (20,8 дн.), который является материнским радионуклидом в генераторной паре 230 U / 226 Th (31 мин.), причем последний порождает быструю цепочку распадов с вылетом четырех альфа-частиц.



Была предложена схема выделения ²³⁰Ра (рис. 18).

Рисунок 4.18 - Схема совместного выделения ²²⁵Ac, ²²³Ra и ²³⁰Pa.

При выборе методики выделения ²³⁰Ра в качестве отправной точки использовали разработанный ранее способ совместного выделения ²²⁵Ac и ²²³Ra. Основное требование заключалось в том, чтобы выделение ²³⁰Ра не ухудшало чистоту и выход ²²⁵Ac и ²²³Ra.

4.4.5.1 Экстракционное отделение протактиния

Изучена экстракция Ра из растворов тория, облученного протонами, в соляной кислоте различной концентрации. Экстракцию проводили в делительной воронке в течение 3-5 минут, расслаивание фаз длилось приблизительно 30 мин. Соотношение фаз 1:1. В органическую фазу, помимо Ра, переходили Sb, Nb и Ru (рис. 4.19). Обнаружено, что в растворе 5 М HCl достигается количественная экстракция Ра и наименьшее содержание примесей. Из водной фазы извлекали ²²⁵Ac и ²²³Ra по ранее разработанному способу.



Рисунок 4.19 - Зависимость извлечения ²³⁰Ра из солянокислых растворов. Для очистки Ра от Nb органическую фазу дважды промывали 4 % раствором C₂H₂O₄ в 5 M HCl. Реэкстракцию Ра проводили 8 % раствором C₂H₂O₄, при этом в водную фазу переходят также небольшие количества (~1-2%) Sb и Ru. Для удаления Ru раствор упаривали с добавлением HClO₄.

4.4.5.2 Хроматографическое разделение протактиния и сурьмы

Окончательную очистку Pa от Sb проводили на анионообменной смоле AG 1x8. После удаления Ru остаток растворяли в 3 M HCl объемом 4 мл и пропускали через колонку, заполненную AG 1x8. Для вымывания Pa использовали также 3 M HCl. Кривая элюирования представлена на Puc. 4.20.



Рисунок 4.20 - Кривая элюирования Ра с колонки, заполненной AG 1x8.

Радиоизотопы сурьмы остались сорбированными на колонке. Радионуклидная чистота выделенной протактиниевой фракции составила не менее 99%.

4.4.5.3 Определение коэффициентов распределения Ра в статических условиях на сорбенте DGA Resin

Экстракционно-хроматографические смолы перспективны как для разделения 230 Pa и 230 U, так и в качестве сорбента для генератора 230 U / 226 Th. В то же время доступно немного литературных данных, часто противоречивых, по коэффициентам распределения Pa на таких сорбентах.

Были проведены эксперименты по изучению сорбции Ра на смоле DGA Resin (Triskem) в растворах азотной кислоты. Для этого к навескам сорбента (50 мг) добавляли 2 мл раствора HNO₃ соответствующей концентрации, содержащего Ра, и перемешивали в течение 3 часов. Полученные результаты в сравнении с литературными данными для U представлены на рис. 4.21.



Рисунок 4.21 - Зависимость коэффициентов распределения U и Pa от концентрации HNO₃ на DGA Resin. ● - полученные данные для Pa, ● данные для U из работы E.P. Horwitz, P.R. McAlister, A.H. Bond, R.E. Barans. [Solvent extraction and Ion Exchange, 2005, v. 23, p. 219].

Как видно из рисунка, коэффициенты распределения со значениями в несколько сотен наблюдаются в диапазоне концентраций 1 - 5 M HNO₃ с максимумом в диапазоне 4-6 M HNO₃. В растворах с концентрацией > 7 M HNO₃ протактиний не образует комплексов с сорбентом DGA Resin, поэтому значения коэффициентов распределения резко падают.

Сравнение коэффициентов распределения для Ра и U показывают, что в диапазоне концентраций 0,01 – 1 М HNO₃ можно эффективно отделить их друг от друга.

4.4.6 Изучение режимов элюирования $^{225}Ac \rightarrow ^{221}Fr \rightarrow ^{213}Bi$ генератора

В настоящее время распространены 225 Ac/ 213 Bi генераторные системы, в которых 225 Ac фиксирован на катионообменной смоле типа Dowex-50, а 213 Bi смывают йодидсодержащими растворами. По сравнению с ними генератор, в котором 213 Bi получают в результате отделения и распада более короткоживущего 221 Fr, обладает преимуществами, а именно:

- для отделения ²²¹Fr требуется менее агрессивный элюент, чем йодид-содержащий раствор, что снижает химическую и радиолитическую нагрузку на сорбент с ²²⁵Ac;

- 213 Ві находится в динамическом (вековом) равновесии с 225 Ас, но, благодаря непрерывному отделению 221 Fr, пространственно удален от 225 Ас и сконцентрирован в другом месте, например, на второй колонке. Таким образом, появляется возможность выбирать среду, в которой 213 Ві будет получен из генератора, что ведет к сокращению времени приготовления соединения, меченного 213 Ві.

Для оптимизации накопления и получения ²¹³Ві была разработана и экспериментально опробована математическая модель генератора радионуклидов типа $A \xrightarrow{\lambda_1} B \xrightarrow{\lambda_2} C \xrightarrow{\lambda_3}$, где λ_1 , λ_2 , λ_3 - постоянные распада. Согласно модели, материнский радионуклид A фиксирован на сорбенте, через который с объемной скоростью Q движется раствор, отделяющий промежуточный радионуклид B, распадающийся в целевой радионуклид C. В общем случае, скорости q_2 и q_3 движения B и

С могут быть любыми в диапазоне $0 \le q_2, q_3 \le \mathbb{Q}$. Обозначим $k = \frac{q_3}{q_2}$.

В случае *q*₂≥*q*₃ объемная активность С в произвольном месте *V* объема элюата описывается следующими уравнениями.

В диапазоне $0 \le V \le kV_{e2}$:

$$\frac{dA_{3}}{dV} = \frac{\lambda_{3}\lambda_{2}A_{1}^{0}e^{-\lambda_{1}t_{e}}}{q_{2}(\lambda_{3}-\lambda_{1}-k(\lambda_{2}-\lambda_{1}))} \left(e^{-(\lambda_{2}-\lambda_{1})\frac{V}{q_{2}}} - e^{-(\lambda_{3}-\lambda_{1})\frac{V}{q_{3}}}\right)$$
(1)

В диапазоне $kV_{e2} \le V \le V_{e2}$:

$$\frac{dA_{3}}{dV} = \frac{\lambda_{3}\lambda_{2}A_{1}^{0}}{q_{2}(\lambda_{3}-\lambda_{1}-k(\lambda_{2}-\lambda_{1}))} \left(e^{-(\lambda_{2}-\lambda_{1})\frac{V}{q_{2}}}e^{-\lambda_{1}t_{e}} - e^{-(\lambda_{2}-\lambda_{3})\frac{V}{(q_{2}-q_{3})}}e^{(k\lambda_{2}-\lambda_{3})\frac{V_{e2}}{(q_{2}-q_{3})}}\right)$$
(2)

где

 A_1^0 – исходная активность материнского радионуклида A; t_e – длительность элюирования; V_{e2} —объем, занимаемый радионуклидом В в общем объеме V_e элюата, пропущенного через сорбент за время t_e элюирования.

В случае $q_2 \le q_3$ профиль объемной активности С также состоит из двух диапазонов: $0 \le V \le V_{e2}$ и $V_{e2} \le V \le kV_{e2}$. Уравнение для первого диапазона совпадает с уравнением (1). В диапазоне $V_{e2} \le V \le kV_{e2}$:

$$\frac{dA_3}{dV} = \frac{\lambda_3 \lambda_2 A_1^0}{q_2 (\lambda_3 - \lambda_1 - k(\lambda_2 - \lambda_1))} \left(e^{\frac{(\lambda_3 - k\lambda_2)}{(k-1)} t_e} e^{(\lambda_2 - \lambda_3) \frac{V}{(q_3 - q_2)}} - e^{-\lambda_1 t_e} e^{-(\lambda_3 - \lambda_1) \frac{V}{q_3}} \right)$$
(3)

Модель позволяет рассчитать объемную активность радионуклидов В и С в любой точке элюата. На рис. 4.22 показаны профили объемной активности С, рассчитанные для различных значений *k*.



Рисунок 4.22 - Профили объемной активности С в зависимости от скоростей движения В и С. В расчете использованы λ_1 , λ_2 , λ_3 для ²²⁵Ac, ²²¹Fr и ²¹³Bi, соответственно; $t_e = 20$ мин; $q_2 = 1,93$ мл/мин.

Наиболее интересными с практической точки зрения являются два случая.

k = 0 (красная кривая на рис. 4.22): радионуклид С, образуясь, останавливается, например, сорбируется.

k = 1 (синяя кривая на рис. 4.22): радионуклиды В и С движутся в потоке элюата с одинаковой скоростью.

Кроме того, скорость движения *q*₂ франция во многих случаях (движение раствора по трубкам и в определенных условиях через сорбенты) можно считать близкой к скорости Q потока элюата.

4.4.6.1 Оценка коэффициента распределения Ві на Actinide Resin

Для экспериментальной проверки модели ²²⁵Ac адсорбировали на колонке (H = 4,7 см, \emptyset = 0,37 см), заполненной экстракционно-хроматографической смолой Actinide Resin (TrisKem). Были проведены эксперименты, в которых через колонку пропускали раствор 0.25 М HNO₃ с разными скоростями. Длительность элюирования была фиксированной (230 мин) и достаточно большой для достижения ²¹³Bi динамического равновесия с ²²⁵Ac. Данные по активности ²¹³Bi, оставшегося на сорбенте, представлены на рис. 4.23.



Рисунок 4.23 - Активность ²¹³Ві, оставшегося на сорбенте, в зависимости от скорости элюирования.

Красная линия на рис. 4.23 представляет собой теоретическую кривую, рассчитанную по уравнениям (1, 2), в которых $k = 8,92 \cdot 10^{-4}$, а скорость движения ²²¹Fr равна скорости потока элюата. Отношение скоростей k связано с коэффициентом распределения k` соотношением: k`= $\frac{1-k}{k}$. Значение коэффициента распределения для Bi

на смоле Actinide Resin в растворе 0,25 М HNO₃ оказалось равным k`=1120. По литературным данным (Е. Р. Horwitz, R. Chiarizia, et M. L. Dietz, Reactive and Functional Polym. 33 (1997) 25-36), в растворах 0,2-0,3 М HCl значения k` для Bi находятся в диапазоне 1000-2000, что согласуется с полученным результатом.

4.4.6.2 Поверхностная сорбция и миграция ²¹³Ві

Ранее (Отчет ЛРИК за 2014 г, раздел 3.6.2) был успешно испытан двухколоночный $^{225}Ac \rightarrow ^{221}Fr \rightarrow ^{213}Bi$ генератор, в котором ^{221}Fr количественно смывали с первой колонки, содержащей ^{225}Ac на Actinide Resin, раствором 0.25 М HNO₃ и направляли элюат в кварцевую трубку, соединяющую первую колонку со второй, заполненной тем же сорбентом. В трубке рассчитанной длины ^{221}Fr распадался в ^{213}Bi , последний накапливался на второй колонке до достижения равновесия с ^{225}Ac . Было показано, что такой генератор позволяет получить до 90% ^{213}Bi .

В случае использования трубок не из кварца, а из других материалов таких, как политетрафторэтилен (ПТФЭ), полиэтилен (ПЭ) и силикон, наблюдали сорбцию висмута на внутренней поверхности трубок. Для описания поверхностной сорбции и миграции ²¹³Ві были проведены следующие эксперименты. К колонке с материнским ²²⁵Ас присоединяли трубки с одинаковым внутренним объемом равным 45 мл. В течение фиксированного (230 мин) и достаточно большого для достижения ²¹³Ві динамического равновесия с ²²⁵Ас времени пропускали с разными скоростями один и тот же элюент, затем измеряли активность ²¹³Ві в трубке. Для анализа полученных результатов по предложенной математической модели была рассчитана сетка изолиний, показанная на рис. 24 широкими кривыми.



Рисунок 4.24 - Определение отношения скорости движения ²¹³Ві в трубках из различных материалов к скорости потока.

Каждая изолиния соответствует определенному значению k, который в данном случае равен отношению скорости движения висмута к скорости потока (q_2 =Q). Например, для скорости потока 2 мл/мин, при полной сорбции висмута в трубке (k = 0) окажется 95% его активности, а при отсутствии сорбции (k = 1) – около 20%. Представленные на рис. 4.24 экспериментальные данные показывают, что сорбция висмута на кварце пренебрежимо мала. Это согласуется с полученными ранее результатами для двухколоночного генератора. Для трубок из других материалов наибольшую сорбцию обнаружили на силиконе (k = 0,37), для ПТФЭ k = 0,48 и для ПЭ k = 0,54.

Тот факт, что висмут движется в трубке медленнее потока элюата, дает возможность реализовать еще один вариант $^{225}Ac \rightarrow ^{221}Fr \rightarrow ^{213}Bi$ генератора, схема и прототип которого представлены на рисунке 4.25.

202



Рисунок 4.25 - Схема и прототип генератора с накоплением ²¹³Ві в трубке. Параметры прототипа: элюент – 0,25 М HNO₃, размеры трубки накопления ²¹³Ві (L × Ø) - 7,5 м × 4,5 мм, материал трубки – ПТФЭ, скорость пропускания элюента 0,5 мл/мин.

Извлечение ²¹³Ві осуществляется в три стадии. На первой стадии раствор из конической колбы проходит через колонку с материнским ²²⁵Ас и вымывает ²²¹Fr в трубку, где происходит накопление ²¹³Ві до достижения равновесия с ²²⁵Ас. На второй стадии с помощью кранов изолируют колонку с ²²⁵Ас и быстро вытесняют раствор из трубки воздухом в коническую колбу, где он готов для повторного использования. Длина трубки накопления, рассчитанная из экспериментально измеренной скорости миграции ²¹³Ві внутри трубки, была достаточной для того, чтобы весь ²¹³Ві остался сорбированным на ее внутренней поверхности. На третьей стадии в верхний флакон добавляют 3-5 мл раствора 0,1-1 М соляной кислоты и смывают им ²¹³Ві со стенок трубки в нижний флакон.

4 Заключение

Проведены следующие исследования и разработки:

 Изучена зависимость выхода стронция-82 от параметров пучка в ходе длительных облучений 8 мишеней током высокой интенсивности на линейном ускорителе ИЯИ РАН.
Установлены оптимальный размер, положение и интенсивность пучка.

- В ходе совместных работ с французским центром ARRONAX GIP усовершенствована технология получения стронция-82 на пучке протонов 70 МэВ с химическим выделением методом прямой сорбции из металлического рубидия. Получаемый стронций-82 используется в медицинских целях в России, Франции и США.

- Усовершенствована конструкция и методика изготовления медицинского генератора стронций-82/рубидий-82 для позитронно-эмиссионной томографии для использования в

203

России и Франции. В результате снижена дозовая нагрузка при проведении ПЭТ и улучшены гидродинамические характеристики генератора, что приведет к большей производительности при медицинской диагностике.

- Отработана методика сборки генераторной колонки и зарядки генератора рубидия-82 в горячей камере ARRONAX (Франция, Нант), что ускорит широкомасштабное внедрение генератора во Франции и России.

- Проведены эксперименты с облученной ториевой мишенью, по получению альфаизлучающих радионуклидов для ядерной медицины;

- Усовершенствована методика выделения ²²³Ra высокой радионуклидной чистоты, а также общая методика одновременного выделения ²²³Ra и ²²⁵Ac из облученной ториевой мишени;

- Изучены процессы сорбции и выщелачивания²²³Ra на частицах гидроксиапатита, являющегося перспективным носителем радионуклидов для новых радиофармпрепаратов;

 Разработана методика выделения ²³⁰Ра из облученной ториевой мишени, совместимая с общей методикой одновременного выделения ²²³Ra и ²²⁵Ac;

- Изучены режимы извлечения ²¹³Bi из ²²⁵Ac \rightarrow ²²¹Fr \rightarrow ²¹³Bi генератора;

Результаты работ доложены на конференциях:

1) 9th Symposium on Targeted Alpha Therapy, Warsaw, Poland, May 19 - 21, 2015;

2) VIII Всероссийская конференция по радиохимии "Радиохимия 2015", г.

Железногорск Красноярского края, 28 сентября – 2 октября 2015 г.

3) I Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы

разработки, производства и применения радиофармацевтических препаратов»

РАДИОФАРМА-2015, г. Москва, 17-19 июня 2015 г.

4 Публикации и доклады

1. В.М. Чудаков, Б.Л. Жуйков, С.В. Ермолаев, В.М. Коханюк, М.И. Мостова, С.В. Шатик, В.В. Зайцев, О.А. Штуковский, Л.А. Тютин, А.М. Гранов. Медицинское изделие генератор рубидия-82. РАДИОФАРМА-2015. І Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы разработки, производства и применения радиофармацевтических препаратов». Сборник тезисов. Москва, 17-19 июня 2015, ФГБУ «ГНЦ РФ – Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна, с.17.

2. Ю.А.Тихонов, Б.Л.Жуйков. Применение 2015. ядерно-физических методов в медицине. Общее собрание Отделения физических наук РАН, Москва, ФИАН, 7 декабря.

3. V. Ostapenko, A. Vasiliev, E. Lapshina, S. Ermolaev, R. Aliev, Yu. Totskiy, B. Zhuikov, S. Kalmykov. Extraction chromatographic behavior of actinium and REE on DGA, Ln and TRU resins in nitric acid solutions. J Radioanal Nucl Chem, 2015, v. 306, issue 3, p. 707-711.

4. E.V. Lapshina, S.V. Ermolaev, B.L. Zhuikov, A.N. Vasiliev, V.S. Ostapenko, R.A. Aliev, S.N. Kalmykov. α – Emitting radionuclides from natural thorium irradiated with protons. 9th Symposium on Targeted Alpha Therapy, Warsaw, Poland, May 19 - 21, 2015.

5. V.S. Ostapenko, A.N. Vasiliev, E.V. Lapshina, S.V. Ermolaev, B.L. Zhuikov, R.A. Aliev, S.N. Kalmykov. Extraction chromatographic behavior of actinium and REE. 9th Symposium on Targeted Alpha Therapy, Warsaw, Poland, May 19 - 21, 2015.

6. A.N. Vasiliev, V.S. Ostapenko, E.V. Lapshina, S.V. Ermolaev, B.L. Zhuikov, R.A. Aliev, S.N. Kalmykov. Evaluation of hydroxyapatite particles as carriers for ²²³Ra recovered from proton-irradiated thorium. 9th Symposium on Targeted Alpha Therapy, Warsaw, Poland, May 19 - 21, 2015.

7. С.В. Ермолаев, А.К. Скасырская. Хроматографическое разделение ²²⁵Ac, ²²¹Fr и ²¹³Bi в динамических условиях. VIII Всероссийская конференция по радиохимии "Радиохимия 2015", г. Железногорск Красноярского края, 28 сентября – 2 октября 2015 г.

8. В.С. Остапенко, А.Н. Васильев, С.В. Ермолаев, Е.В. Лапшина, И.Л. Синенко, Т.Ю. Екатова, Б.Л. Жуйков, С.Н. Калмыков. Выделение ²³⁰Ра из облученной ториевой мишени. VIII Всероссийская конференция по радиохимии "Радиохимия 2015", г. Железногорск Красноярского края, 28 сентября – 2 октября 2015 г.

9. А.Н. Васильев, В.С. Остапенко, Е.В. Лапшина, С.В. Ермолаев, Б.Л. Жуйков, С.С. Данилов, С.Н. Калмыков. Выделение ²²³Ra из природного тория, облученного протонами. VIII Всероссийская конференция по радиохимии "Радиохимия 2015", г. Железногорск Красноярского края, 28 сентября – 2 октября 2015 г.

10. А.В. Северин, А.Н. Васильев, В.С. Остапенко, Е.В. Лапшина, Е.В. Черных, С.Н. Калмыков. Особенности сорбционного взаимодействия ²²³Ra с различными текстурными формами гидроксиапатита – перспективного носителя терапевтических альфа-эмиттеров. VIII Всероссийская конференция по радиохимии "Радиохимия 2015", г. Железногорск Красноярского края, 28 сентября – 2 октября 2015 г.

11. И.Л. Синенко, В.С. Остапенко, Т.Ю. Екатова, А.Н. Васильев, Е.В. Лапшина, С.Н. Калмыков. Определение коэффициентов распределения Ас, La, Ce и Pa на сорбентах TRU, LN и DGA Resin. VIII Всероссийская конференция по радиохимии «Радиохимия-2015», г. Железногорск Красноярского края, 28 сентября- 20ктября 2015г.

4 Патенты

1. B.L. Zhuikov, S. V. Ermolaev, V. M. Kokhanyuk. Method for producing radiostrontium. Патент США 8929505 В2. Дата публикации 6 января 2015.

2. 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. US Patent US9058908 B2. Дата публикации 16 июня 2015.

3. В.М. Чудаков, Б.Л.Жуйков, В.М. Коханюк. Генератор рубидия-82 и способ его приготовления. Патент РФ №2546731, зарегистрирован 4 марта 2015.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В отчёте представлены результаты фундаментальных и прикладных работ, проведённых по государственному заданию в соответствии с планом научных исследований ИЯИ РАН на 2015 год. Из полученных результатов можно выделить следующие важнейшие результаты работ:

Мультифрагментация ядер углерода под действием фотонов. Исследованы реакции мультифрагментации ядер углерода под действием фотонов с энергией 700 – 1500 МэВ. Впервые получены данные о вероятности вылета нуклонов различной множественности вплоть до полного развала ядра углерода на отдельные нуклоны. Изучены энергетические и угловые распределения образующихся фрагментов. Показано, что экспериментальные данные хорошо согласуются с расчётами в рамках каскадно-испарительной модели RELDIS. ИЯИ РАН в коллаборации GRAAL.

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